

УДК 621.375.4

СВЧ МИС широкополосных усилителей как универсальные компоненты современной радиоэлектронной аппаратуры ¹

¹ Савченко Е. М., ² Першин А. Д., ³ Кузьмин А. Ю.

¹ *Российский технологический университет (РТУ МИРЭА)
Проспект Вернадского, д. 78, Москва, 119454, Российская Федерация
rector@mirea.ru*

² *АО «Научно производственное предприятие “Пульсар”»
Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Российская Федерация
administrator@pulsarnpp.ru*

³ *АО «Государственный завод “Пульсар”»
Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Российская Федерация
administrator@pulsarnpp.ru*

Получено: 25 апреля 2020 г.

Отрецензировано: 30 апреля 2020 г.

Принято к публикации: 11 мая 2020 г.

Аннотация: *Представлена хронология развития монолитных широкополосных усилителей, имеющих в основе схему Дарлингтона. Рассмотрены этапы формирования современной производимой номенклатуры широкополосных усилителей Дарлингтона как неотъемлемой части ЭКБ для всех видов РЭА.*

Ключевые слова: *широкополосный усилитель, схема Дарлингтона, отрицательная обратная связь, сверхвысокочастотный усилитель, СВЧ МИС.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Савченко Е. М., Першин А. Д., Кузьмин А. Ю. СВЧ МИС широкополосных усилителей как универсальные компоненты современной радиоэлектронной аппаратуры // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 1. С. 75—97.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Савченко, Е. М. СВЧ МИС широкополосных усилителей как универсальные компоненты современной радиоэлектронной аппаратуры // Е. М. Савченко, А. Д. Першин, А. Ю. Кузьмин // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 1. — С. 75—97.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Microwave monolithic ICs of broadband amplifiers as universal components of modern electronic equipment

Ye. M. Savchenko¹, A. D. Pershin², and A. Yu. Kuzmin³

¹*Russian Technological University (RTU MIREA)
78, Vernadsky Prospect, Moscow, 119454, Russian Federation
rector@mirea.ru*

²*Scientific Production Enterprise "Pulsar", JSC
27, Okrugnoy proezd, Moscow, 105187, Russian Federation
administrator@pulsarnpp.ru*

³*State Plant "Pulsar", JSC
27, Okrugnoy proezd, Moscow, 105187, Russian Federation
administrator@pulsarnpp.ru*

Received: April 25, 2020

Peer-reviewed: April 30, 2020

Accepted: May 11, 2020

Abstract: *A chronology of the development of monolithic broadband amplifiers based on the Darlington scheme is presented. The stages of the formation of the modern manufactured range of Darlington wideband amplifiers as an integral part of the electronic components for all types of electronic equipment are considered.*

Keywords: *broadband amplifier, Darlington circuit, negative feedback, microwave amplifier, microwave monolithic IC.*

For citation(IEEE): Ye. M. Savchenko et al. "Microwave monolithic ICs of broadband amplifiers as universal components of modern electronic equipment," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 1, pp. 75–97, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Многообразие видов современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) СВЧ диапазона, создает необходимость иметь широкий спектр универсальной электронной компонентной базы (ЭКБ), одной из неотъемлемых составляющих которой являются усилители сигналов малой и средней мощности. Основой универсальности для таких усилителей являются широкая полоса рабочих частот (от десятков мегагерц до десятков гигагерц), однополярное питание и малые габариты всего усилительного звена [1, 2]. К широкополосным усилителям (ШПУ) относятся усилители, ши-

рина полосы пропускания которых превышает их центральную рабочую частоту [3]. В области СВЧ диапазона частот для реализации ШПУ наибольшее распространение получили схема усилителя с распределенным усилением (УРУ) и схема широкополосного усилителя на основе составного транзистора Дарлингтона с отрицательной обратной связью (ШПУ с ООС).

Схема УРУ построена по принципу формирования эквивалентных длинных линий, в которых емкостные составляющие схемы формируются емкостями усилительных элементов, а индуктивные — катушками индуктивности или полосковыми линиями в зависимости от диапазона рабочих частот. Схема УРУ позволяет достигать верхней границы диапазона рабочих частот более 70—80 % от граничной частоты используемых транзисторов [2, 4]. К основным недостаткам УРУ можно отнести: большие размеры кристалла МИС (многозвенная структура усилителя и использование большого числа индуктивных элементов), относительно низкий коэффициент усиления (как правило, 8—12 дБ), высокий коэффициент шума в области нижних частот, двухполярное питание (для большинства схем) и требование к последовательности его подачи (при использовании нормально-открытых транзисторов).

В ШПУ с ООС на основе составного транзистора реализован принцип двухстороннего согласования и выравнивания амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) коэффициента усиления посредством введения отрицательной обратной связи, которая в наиболее простом варианте реализуется включением резистора между входом и выходом усилительного каскада. Верхняя рабочая частота схемы, как правило, составляет 20—30 % от граничной частоты единичного усиления используемых транзисторов, нижняя — определяется цепями обвязки (дроссельная катушка индуктивности и разделительные конденсаторы) и может достигать 0 Гц, обеспечивая работу ШПУ на постоянном токе. Схема является компактной, простой в применении, имеет однополярное напряжение питания, что важно для универсального усилительного СВЧ компонента, так как упрощает его применение. Таким образом, ШПУ с ООС является одной из наиболее распространенных широкополосных усилительных схем, что подтверждается выпуском большой номенклатуры таких изделий зарубежными производителями СВЧ ЭКБ.

В данной работе представлен обзор эволюции СВЧ широкополосных усилителей с отрицательной обратной связью параллельно с развитием технологий СВЧ МИС, а также показаны достигнутые на данный момент мировые и отечественные результаты по их разработке.

2. Составной транзистор Дарлингтона (1953—1980 гг.)

В качестве усилительного элемента в ШПУ с ООС получил наибольшее распространение транзистор, запатентованный Сиднеем Дарлингтоном в 1953 г. как составной транзистор с высоким коэффициентом передачи тока базы (β) в схеме с общим эмиттером [5], и раскрывший свои преимущества с развитием полупроводниковых технологий (рис. 1).

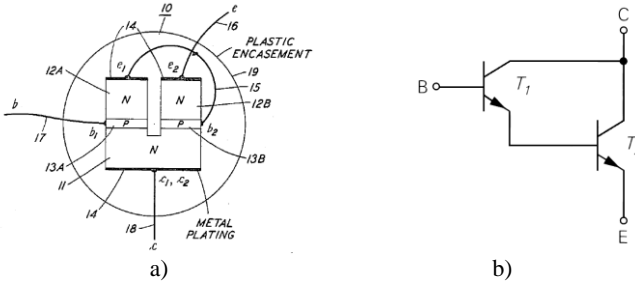


Рис. 1. Составной транзистор Дарлингтона 1953 г. (а), схема составного транзистора Дарлингтона (б).

Fig. 1. 1953 Darlington composite transistor (a), Darlington composite transistor circuit (b)

На протяжении многих лет схема использовалась как составной транзистор для общего применения. Кроме того, представляла большой интерес потенциальная область применения схемы в качестве усилителя ВЧ и СВЧ, согласованного с волновым трактом посредством выполнения условия двухстороннего согласования для источника тока, управляемого напряжением (рис. 2а). Однако введение отрицательной обратной связи (R) было затруднено из-за влияния значительного фазового сдвига в переходах база — эмиттер существовавших на то время биполярных транзисторов, который приводил к самогенерации в усилительном каскаде из-за перехода отрицательной обратной связи в положительную с увеличением частоты.

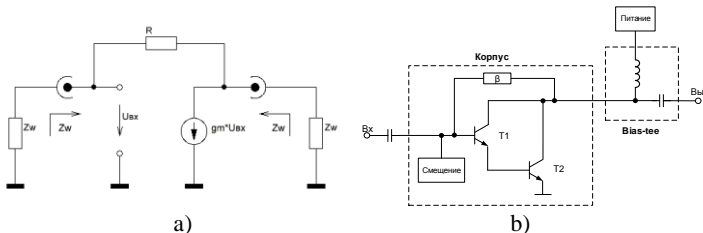


Рис. 2. Схема двухстороннего согласования источника тока управляемого напряжением (а); схема усилительного каскада Дарлингтона с реализацией двухстороннего согласования (схема с ООС) (б).

Fig. 2. Scheme of bilateral matching of a voltage-controlled current source (a); Darlington amplifier stage circuit with bi-directional matching (negative feedback circuit) (b)

Впервые сконструировать устойчивый усилитель с ООС на основе составного транзистора Дарлингтона удалось в 1980 г. (Карл Батъес, Tektronix, Inc.) вводом дополнительного транзистора в диодном включении [6] (рис. 3а). Добавление транзистора позволило снизить коэффициент усиления по току общей структуры с β^2 до 2β , обеспечивая при этом значение f_i в 1,5—2 раза больше, чем у единичного транзистора. При этом падение коэффициента усиления модифицированной структуры составляло 6 дБ на октаву, вместо 12 дБ как для составного транзистора. К преимуществам схемы также относится меньший фазовый сдвиг (в отличие от составного транзистора Дарлингтона), что позволило сделать структуру пригодной для использования с отрицательной обратной связью.

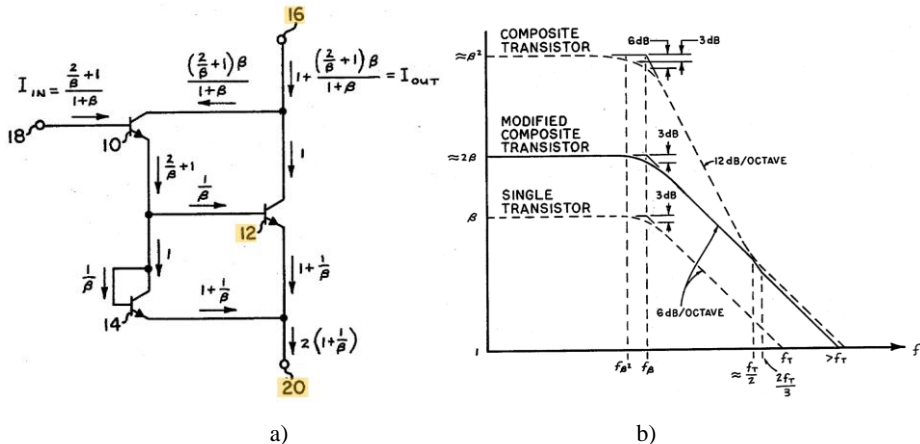


Рис. 3. Схема широкополосного усилителя с ООС, запатентованная Карлом Батъесом в 1980 г. (а) и сравнительная АЧХ (б).

Fig. 3. Circuit of a broadband amplifier with negative feedback, patented by Karl Battjes in 1980 (a) and comparative frequency response (b)

3. Обзор монолитных усилителей на основе транзисторной пары Дарлингтона на мировом рынке в 1981—1999 гг.

Началу развития компактных интегральных схем, в том числе СВЧ широкополосных усилителей, способствовала разработка стандартов сотовой связи, для которой требовалась общая миниатюризация портативных устройств, а также повышение рабочих частот.

В 1981 г. на основе Si биполярного технологического процесса с граничной частотой транзисторов $f_i=10$ ГГц компания Avantec разработала полностью интегральный широкополосный усилитель на основе составного транзистора с отрицательной обратной связью по напряжению

MSA0736 [7] (рис. 4). Введение резистивной ООС позволило в диапазоне частот от 0 до 2,5 ГГц обеспечить коэффициент усиления по мощности 10,3—13,5 дБ, чего не удавалось достичь ранее. При этом усилитель имел размеры, близкие к размерам одиночного транзистора, за счет отсутствия в схеме реактивных элементов (конденсаторов и индуктивностей). В последующем данное решение стало базовым для большинства СВЧ МИС усилителей с ООС. Из-за простоты использования возможности каскадирования (последовательного включения нескольких ШПУ для увеличения суммарного коэффициента усиления тракта без дополнительных цепей согласования) и малых размеров, в зарубежной литературе данная функциональная схема получила название gain-block (усилительный блок).

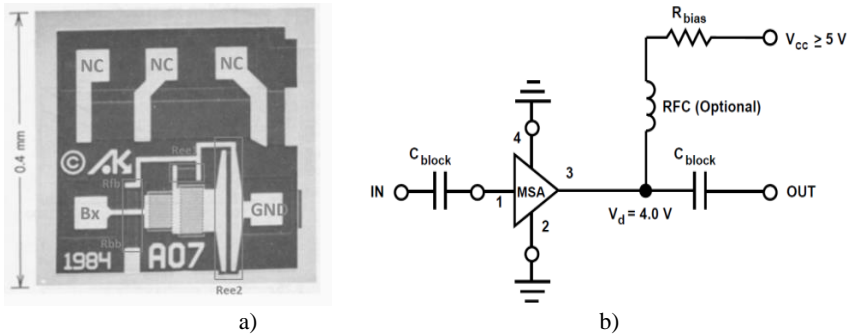


Рис. 4. Топология кристалла MSA0736 (а); схема включения при работе (б) широкополосного усилителя MSA0736 [7].

Fig. 4. The topology of the crystal MSA0736 (a); switching circuit during operation (b) of the broadband amplifier MSA0736 [7]

Вышедшие на рынок в конце 80-х гг. AlGaAs/GaAs гетеропереходные биполярные транзисторы (ГБТ) обладали большими в сравнении с Si биполярными транзисторами рабочими частотами и лучшей линейностью, что позволило значительно повысить рабочие частоты усилителей.

Технология изготовления GaAs ГБТ основана на использовании гетероэпитаксиальной структуры, где ширина запрещенной зоны эмиттера превосходит ширину запрещенной зоны базы, за счет чего возникает различие в потенциальных барьерах для электронов и дырок, вследствие чего инжекция электронов из эмиттера в базу возрастает, а поток дырок из базы в эмиттер сокращается. Это приводит к увеличению эффективности эмиттера, и как следствие, получению преимущества в создании транзистора с сильнолегированной базой. В сравнении с Si биполярными транзисторами аналогичных размеров, такие транзисторы имеют меньшее сопротивление базы, и соответственно, более высокие значения максимальной частоты

генерации (f_{max}). Тонкая эпитаксиальная база и высокая скорость носителей заряда обеспечивают малое время пролета носителей заряда через базу, что увеличивает значение граничной частоты транзистора f_i [8].

Кроме того, полуизолирующие подложки из GaAs имеют еще одно важное преимущество для усилительных схем — возможность создания сквозных отверстий и их металлизация для соединения цепи земли электрической схемы на кристалле и общего вывода корпуса, что позволяет снизить значения паразитной индуктивности в цепи общего вывода и тем самым повысить рабочие частоты.

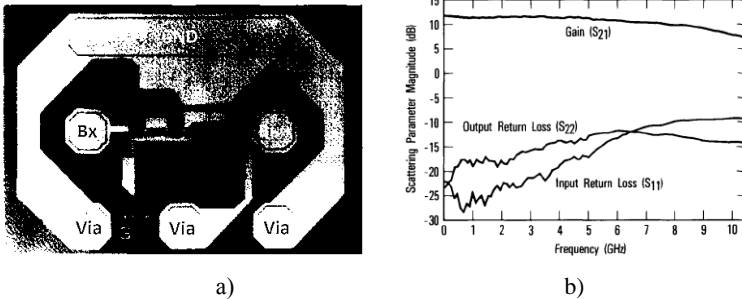


Рис. 5. Топология кристалла (а); частотные характеристики малосигнальных параметров (б) широкополосного усилителя, разработанного Кобаяши в 1989 г., TRWinc [9].

Fig. 5. Crystal topology (a); frequency characteristics of low-signal parameters (b) of a broadband amplifier developed by Kobayashi in 1989, TRWinc [9]

В 1989 г. группа ученых из TRWinc. под руководством Кевина Кобаяши, представила первый AlGaAs/GaAs ГБТ широкополосный усилитель на основе составного транзистора Дарлингтона с ООС [9]. В схеме использовались транзисторы с граничной частотой $f_i=25$ ГГц. Диапазон рабочих частот схемы составлял от 0 до 10 ГГц, коэффициент усиления от 7 до 12 дБ (рис. 5).

В начале 90-х гг. компания Stendford Microdevices выпустила линейку AlGaAs/GaAs ГБТ широкополосных усилителей с ООС с диапазонами частот до 10 ГГц: SNA-100, SNA-576, SNA-586 и др. [10, 11]. Благодаря компактной схеме ШПУ без использования реактивных элементов размеры кристаллов составляли $0,30 \times 0,33$ мм². Усилители отличались значением коэффициента усиления (от 9 до 20 дБ) за счет использования разной глубины ООС.

Наряду с AlGaAs/GaAs ГБТ, начиная с 1984 г. прорабатывались схемы широкополосных усилителей на основе GaAs полевых транзисторов с затвором Шоттки (ПТШ) [12]. Однако составной транзистор Дарлингтона на основе данной технологии распространения не получил из-за проблем с устойчивостью [13].

Наряду с AlGaAs/GaAs ГБТ для рынка гражданских мобильных устройств многие компании прорабатывали направление СВЧ МИС на SiGe ГБТ, в первую очередь из-за технологической преемственности SiGe технологии, что обуславливало больший диаметр полупроводниковых пластин и совместимость с КМОП технологией [8, 14, 15, 16]. Также к преимуществам SiGe ГБТ можно отнести меньшее значение коэффициента шума в сравнении с [15].

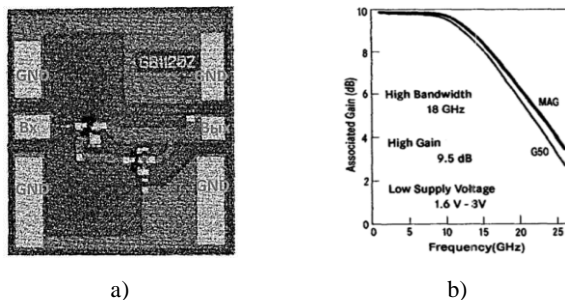


Рис. 6. Топология (а) и амплитудно-частотная характеристика (б) ИМС SiGe ГБТ ШПУ на основе транзисторной пары Дарлингтона, разработанной компанией DB Electronics в 1995 г. [15].

Fig. 6. Topology (a) and amplitude-frequency characteristic (b) of an SiGe IC for heterojunction bipolar transistors based on a Darlington transistor pair developed by DB Electronics in 1995 [15]

На рис. 6 показаны топология и малосигнальные характеристики SiGe ГБТ ШПУ на основе транзисторной пары Дарлингтона, разработанной компанией DB Electronics в 1995 г. на основе транзисторов с граничными частотами порядка 120 ГГц. Полоса рабочих частот по уровню снижения коэффициента усиления на 3 дБ составила 18 ГГц [15].

В промышленное производство SiGe ГБТ был внедрен компанией IBM в 1996 г., а в 1999 г. компания Sirenza Microdevices (в прошлом Stendford Microdevices) выпустила серию SiGe СВЧ МИС ШПУ: SGA-6589, SGA-3586, SGA-1263, SGA-9189, SGA-2486 и др. с диапазоном рабочих частот до 5 ГГц и коэффициентом шума от 2,5 до 4,7 дБ [17]. Усилители предназначались, прежде всего, для мобильных систем, и выпускались в универсальных малогабаритных пластмассовых корпусах SOT-86, SOT-89 и SOT-363.

4. СВЧ МИС широкополосных усилителей на мировом рынке, 2000 г. — н. в.

Начиная с конца 90-х гг. в схемах СВЧ ШПУ с ООС получили распространение ГБТ на основе гетероструктуры база — эмиттер: InGaP/GaAs, обладающие меньшим разрывом зоны проводимости и большим разрывом

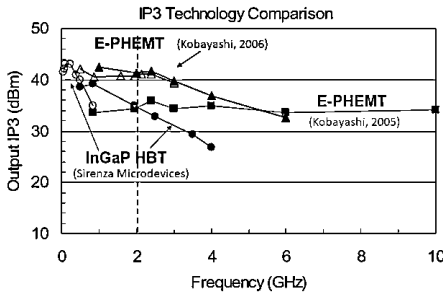
валентной зоны в сравнении со структурой AlGaAs/GaAs, что позволило обеспечить выигрыш в частотных и энергетических характеристиках транзисторов [8]. Также к преимуществам InGaP/GaAs можно отнести лучшую технологичность благодаря наличию InGaP стоп-слоя и возможности изотропного травления при формировании структуры транзистора.

В 2001 г. компания Alpha Industries освоила промышленную технологию производства InGaP/GaAs структур. В 2002 г. для ШПУ с ООС на основе InGaP/GaAs ГБТ было достигнуто значение точки пересечения интермодуляционных искажений третьего порядка (ОИПЗ) более 40 дБм на частотах до 1 ГГц и более 35 дБм на частоте 2 ГГц при напряжении питания 5 В [16], что являлось хорошим результатом, необходимым для применения в сотовых системах связи с большим числом каналов.

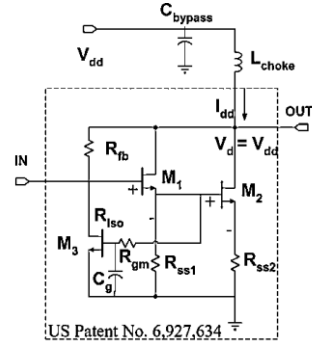
С середины 90-х гг. начали разрабатываться GaAs полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов в канале — НЕМТ, которые не уступали GaAs ГБТ по максимальным рабочим частотам, обеспечивая при этом несколько большие выходные мощности и КПД усилительных каскадов [15].

В 2006 г. Кевином Кобаяши был представлен ШПУ с ООС на основе GaAs нормально открытого (E-mode — Enhancement mode) псевдоморфного НЕМТ, который показал существенные преимущества перед InGaP/GaAs ГБТ в части ИПЗ на верхней частоте рабочего диапазона благодаря меньшей паразитной емкости затвор — сток в сравнении с диффузионной емкостью база — коллектор InGaP/GaAs ГБТ [19], что позволило повысить эффективность использования ООС на верхних частотах. Дополнительное улучшение линейности было достигнуто за счет цепи активной обратной связи на основе транзистора М3 (рис. 7), которая снижает уровень напряжения смещения первого транзистора (М1) при повышении амплитуды сигнала.

Данная схема была запатентована Кобаяши в 2005 г. как схема для динамического самосмещения ШПУ Дарлингтона на основе биполярных транзисторов. Данное решение позволило исключить из схемы включения ШПУ с ООС внешний токозадающий резистор (R_{bias}), который необходим в «классической схеме» для снижения зависимости режимного тока от напряжения питания, но ограничивающий амплитуду выходного сигнала и ухудшающий КПД усилителя. Кроме того, схема позволяет повысить стабильность режимного тока усилителя при изменении температуры кристалла [20]. Данное решение использовалось в серии ШПУ Sirenza Microdevices на основе InGaP/GaAs ГБТ (SBB серия с активным смещением) с диапазоном рабочих частот до 6 ГГц: SBB-5089, SBB-4089 и др.



a)

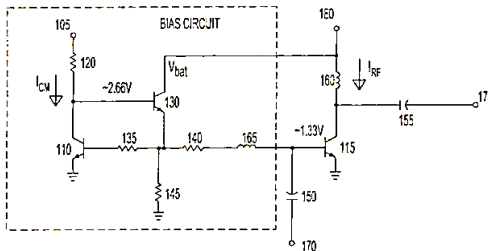


b)

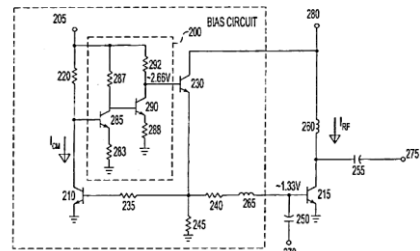
Рис. 7. Сравнительные характеристики OIP3 InGaP ГБТ (HBT) ШПУ и E-mode псевдоморфного НЕМТ ШПУ (а); схема E-mode НЕМТ ШПУ (б) [19].

Fig. 7. Comparative characteristics of OIP3 InGaP HBT and E-mode pseudomorphic HEMT (a); E-mode HEMT circuit (b) [19]

Еще одно решение по стабилизации рабочей точки транзисторов при изменении температуры и напряжения питания в усилительном каскаде с высокочастотным дросселем предложил Дуглас М. Джонсон, запатентовав в 2005 г. схему с токозадающим токовым зеркалом для усилительного транзистора (рис. 8а) [21]. В данной схеме опорный ток I_{CM} пропорционален току потребления I_{RF} , а напряжение смещения первого транзистора, в свою очередь, пропорционально опорному току I_{CM} . На рис. 8б и показана схема с температурной стабилизацией, достигаемой за счет обратной связи, реагирующей на изменения напряжения на коллекторе транзистора 210 через цепочку транзисторов: 285, 290, 230.



a)



b)

Рис. 8. Принципиальные схемы стабилизированных усилительных каскадов, предложенные Дугласом М. Джонсоном [21].

Fig. 8. Schematic diagrams of stabilized amplification cascades proposed by Douglas M. Johnson [21]

К основным преимуществам данной схемы относятся стабильность тока потребления при изменении температур и напряжений питания, возможность исключения токозадающего резистора в цепи питания, что повышает выходную мощность и увеличивает КПД усилителя.

Еще одним направлением модификации схемы ШПУ на основе составного транзистора с ООС стали активные частотно зависимые цепи коррекции. В 2005 г. была запатентована схема на основе биполярных транзисторов, позволяющая скомпенсировать фазовый сдвиг переходов база-эмиттер составного транзистора за счет частотно-зависимой цепи смещения каскодного транзистора Q22 (рис. 9) [22].

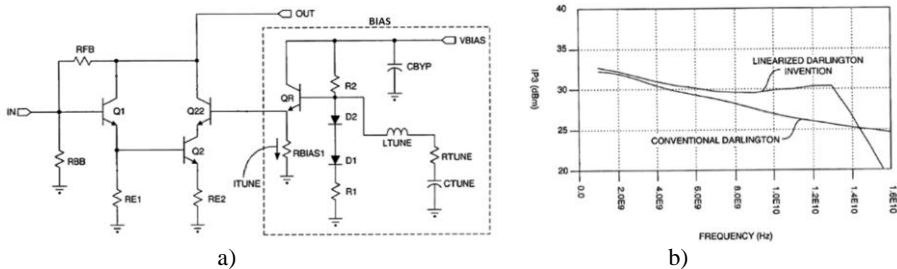


Рис. 9. Принципиальная схема (а) линейризованного ШПУ Дарлингтона, запатентованная Кевином Кобаяши в 2005 г. и частотная зависимость ОИРЗ в сравнении с «классической» схемой (б) [22].

Fig. 9. Schematic diagram (a) of a linearized Darlington HBT, patented by Kevin Kobayashi in 2005 and the frequency dependence of OIP3 in comparison with the “classical” circuit (b) [22]

Данное решение позволяет расширить диапазон рабочих частот на 25—30 % по уровню интермодуляционных искажений в сравнении с классической схемой. Особенностью настройки цепи коррекции является подбор номинала индуктивности L_{tune} , которая регулирует величину фазового сдвига в зависимости от частоты. Подбор индуктивности осуществлялся таким образом, чтобы обеспечить устойчивость усилителя в области высоких частот.

Основным недостатком использования схемы [22] является снижение максимальной выходной мощности за счет падения напряжения на переходе коллектор — эмиттер каскодного транзистора. Таким образом, данное решение в большей степени применимо к ШПУ малой и средней мощности (до 100 мВт).

С начала 2000-х гг., начали появляться публикации по разработкам ИМС СВЧ ШПУ на основе GaN НЕМТ, которые в усилительных каскадах сопоставимы с GaAs ГБТ и НЕМТ по максимальным рабочим частотам, при этом обеспечивают большие выходные мощности и КПД за счет вы-

сокого напряжения пробыа транзисторов и лучшей теплопроводности подложки (для SiC подложек).

В статье Картикьяна Кришнамурти 2000 г. показываются две ИМС СВЧ ШПУ на основе схемы « f_i -doubler» (рис. 10, а) с использованием GaAs MESFET и GaN/AlGaN HEMT техпроцессов. Схема позволяет получить полосу рабочих частот до 33 % от f_i за счет частотно-зависимой цепи смещения второго транзистора пары Дарлингтона, позволяющей увеличить верхнюю границу положительных значений коэффициента передачи тока в режиме короткого замыкания (h_{21}) до частоты, равной $2f_i$ [13]. Полученный в статье образец на основе GaN HEMT имеет значительно более высокую выходную мощность в сравнении с образцом на основе GaAs MESFET (2 Вт и 350 мВт на частоте 1 ГГц соответственно), при этом полосы рабочих частот и значения КПД обоих усилителей близки. Зависимости энергетических характеристик ИМС GaN HEMT ШПУ показаны на рис. 10, б.

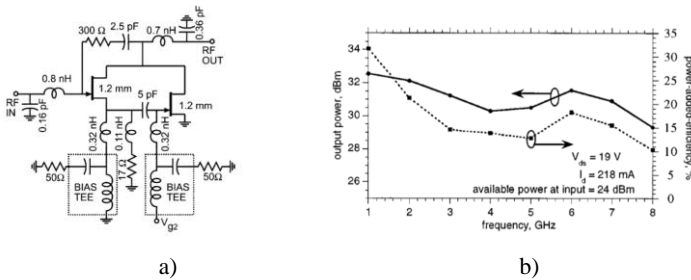
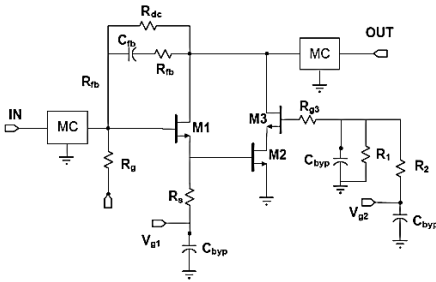


Рис. 10. Схема (а) и основные энергетические характеристики (б) усилительного каскада GaN HEMT, реализованного по схеме « f_i -doubler» [13].

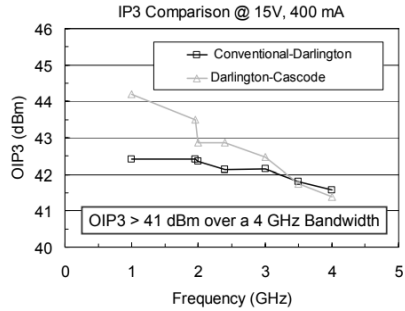
Fig. 10. Scheme (a) and main energy characteristics (b) of the GaN HEMT amplifier stage, implemented according to the “ f_i -doubler” scheme [13]

В 2007 г. Кевин Кобаяши публикует статью, в которой представлен ШПУ на основе технологии GaN/SiC HEMT с длиной затвора 0,2 мкм, в котором была достигнута мощность более 1 Вт при КПД до 21 % и ОРЗ 41—44 дБм на частотах до 4 ГГц, при этом ШПУ имеет полосу рабочих частот на малом сигнале 18 ГГц [23]. В статье рассматривается два варианта ШПУ: на основе классической схемы транзисторной пары Дарлингтона с ООС, а также с дополнительным транзистором в касковом включении (рис. 11, а). ШПУ с касковым транзистором позволяет увеличить коэффициент усиления (на 3—5 дБ) — рис. 11, с, а также улучшить значение ОРЗ на 2 дБ в диапазоне до 3 ГГц — рис. 11, d. Выходная мощность обоих образцов сопоставима (30—31 дБм в диапазоне до 4 ГГц при уровне компрессии коэффициента усиления на 1 дБ). К недостаткам ШПУ с касков-

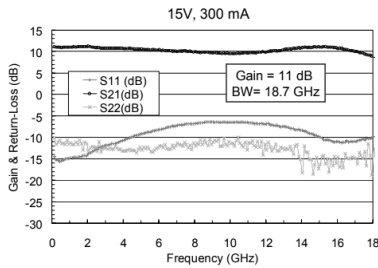
ным транзистором можно отнести большую неравномерность K_y (на 5—6 дБ в диапазоне до 18 ГГц) и худшее согласование по входу усилителя.



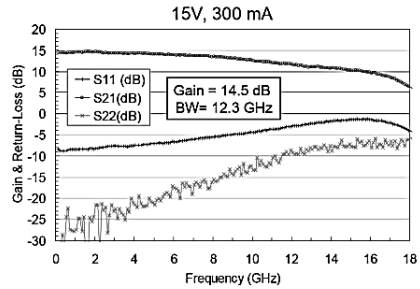
a)



b)



c)



d)

Рис. 11. Схема ШПУ с каскодным транзистором (а), сравнение интермодуляционных искажений (б), характеристики на малом сигнале ШПУ с ООС (с) и ШПУ с ООС и каскодным транзистором (д), опубликованных Кевином Кобаяши в 2007 г. [23].

Fig. 11. Scheme of HBT with cascode transistor (a), comparison of intermodulation distortions (b), characteristics of a small signal HBT with OOS (s) and HBT with OOS and cascode transistor (d) published by Kevin Kobayashi in 2007 [23]

В том же 2007 г. Кобаяши публикует еще одну работу, в которой представлен GaN/SiC НЕМТ ШПУ с ООС на основе одного каскада с общим истоком (рис. 12), согласованного методом дегенеративной индуктивности в цепи истока на минимальное значение $K_{ш} < 1$ дБ в диапазоне 1—8 ГГц [24], что достигается за счет малой длины затвора (0,2 мкм) в сочетании с высокой подвижностью электронов в канале. Смещение нормально открытых транзисторов задается отрицательным внешним напряжением. В импульсном режиме работы выходная мощность данного усилителя достигает 2,5 Вт.

В 2012 г. Шанвен Ху и др. (Нанкийский университет, Китай) публикуют схему ШПУ на основе транзисторной пары Дарлингтона с ООС и

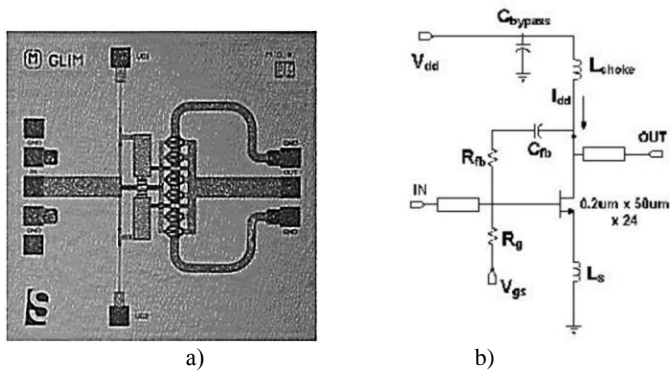


Рис. 12. Топология (а) и принципиальная схема (б) 2,5 Вт GaN/SiC НЕМТ ШПУ, опубликованного Кевином Кобаяши в 2007 г. [24].

Fig. 12. Topology (a) and circuit diagram (b) of 2.5 W GaN/SiC HEMT NBT, published by Kevin Kobayashi in 2007 [24]

каскадным транзистором с дополнительной линеаризацией и предискажениями [31], что позволило выровнять выходную мощность и повысить значение OIP3 на верхних частотах (рис. 13, б). ШПУ реализован с использованием InGaP/GaAs ГБТ технологии. Линеаризация входного каскада усилителя (транзистор Q1 с общим эмиттером) происходит за счет использования RC элементов в цепи ООС, предискажения вводятся в выходном каскаде с каскадным транзистором Q3 (рис. 13, а) путем оптимизации номиналов RLC компонентов в базе транзистора.

В 2012 г. Кевином Кобаяши был опубликован ШПУ с рекордными значениями OIP3 (более 51 дБм) на основе GaN/SiC НЕМТ [25]. Усилитель имеет каскадную схему (рис. 14). К преимуществам усилителя также относится крайне низкий коэффициент шума: согласно приведенным данным, при высоких значениях сопротивления резистора цепи обратной связи (>3 кОм) данный усилитель имеет $K_{ш} < 1$ дБ в полосе частот до 4 ГГц. При применении цепи обратной связи с резистором 500 Ом, позволяющей получить неравномерность K_y в полосе 1—4 ГГц менее 1 дБ, $K_{ш} = 1$ —1,6 дБ.

К одним из последних публикаций по ШПУ с ООС на основе транзисторной пары Дарлингтона можно отнести публикации 2013 года [26], 2016 года [27] и 2017 года [28].

В [26] рассматривается дифференциальный ШПУ на основе 0,18 мкм Si КМОП техпроцесса. В качестве симметрирующих устройств для деления и суммирования мощности используется трансформатор Гуанелла, реализованный на полосковых линиях. ШПУ состоит из двух последовательных дифференциальных усилительных каскадов: первый кас-

кад реализован на основе каскодной схемы, второй — на основе транзисторной пары Дарлингтона с каскодным транзистором (рис. 15).

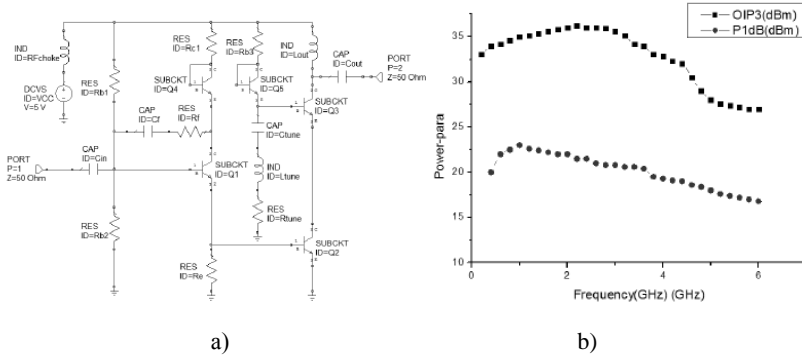


Рис. 13. Схема (а) и результаты частотная зависимость выходной Рвых и OIP3 (b) для InGaP/GaAs ГБТ ШПУ [31].

Fig. 13. Scheme (a) and results, the frequency dependence of the output Pout and OIP3 (b) of InGaP / GaAs GBT HBT [31]

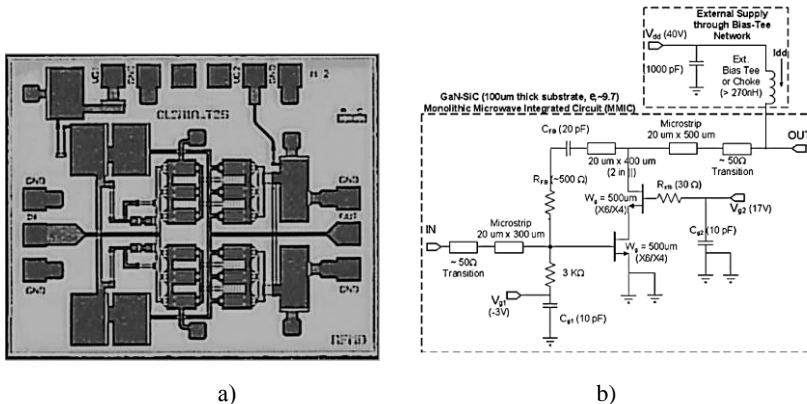


Рис. 14. Топология (а) и принципиальная схема (b) 8 Вт GaN/SiC НЕМТ ШПУ, опубликованного Кевином Кобаяши в 2012 г. [25].

Fig. 14. Topology (a) and schematic diagram (b) of an 8 W GaN/SiC HEMT HBT published by Kevin Kobayashi in 2012 [25]

Авторам [26] удалось достичь полосы рабочих частот от 15 до 33 ГГц, выходной мощности 50—100 мВт при напряжении питания 3,6 В и токе потребления 196 мА и усиления более 10 дБ. Ключевым является возможность использования схемы в стандартном технологическом процессе для разработок систем на кристалле (СНК) Ku-, K-, Ka-диапазонов частот.

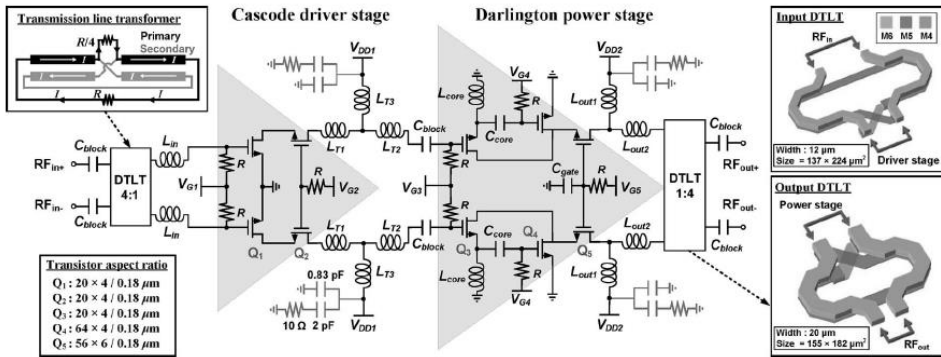


Рис. 15. Схема Si КМОП усилителя с выходным каскадом на основе транзисторной пары Дарлингтона и каскодным транзистором [26].

Fig. 15. Si circuit of a CMOS amplifier with an output stage based on a Darlington transistor pair and a cascode transistor [26]

В [27] приводятся результаты разработки китайскими учеными ШПУ до 6 ГГц на основе GaN/SiC HEMT с проектной нормой 0,5 мкм. Интерес представляет использование дополнительной ООС в выходном каскаде составного транзистора, а также катушек индуктивности по входам обоих транзисторов (рис. 16). Индуктивность $L1$ необходима для улучшения согласования по входу, индуктивность $L2$ вместе с конденсатором $C3$ образует резонанс для минимизации влияния паразитных емкостей транзисторов $M1$ и $M3$. Авторам удалось достичь уровня выходной мощности более 1 Вт на частоте 4,8 ГГц при усилении более 10 дБ.

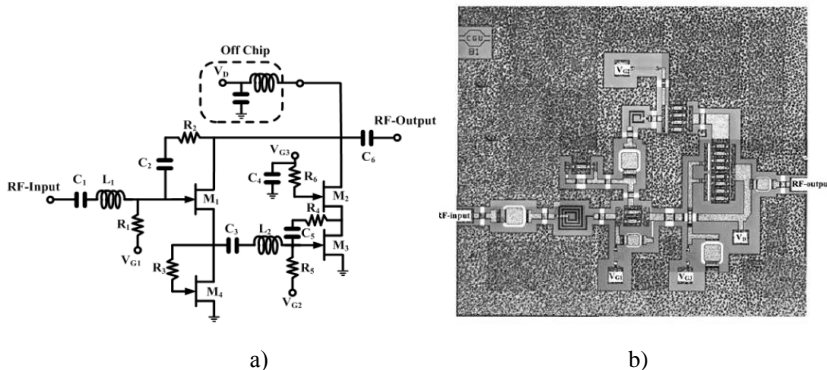


Рис. 16. Схема (a) и фотография кристалла (b) GaN HEMT HBT на основе транзисторной пары Дарлингтона [27].

Fig. 16. Scheme (a) and photo of a crystal (b) GaN HEMT HBT based on Darlington transistor pair [27]

В [28] приводятся данные о разработке усилителя для высокоскоростной системы передачи данных с использованием 0,18 мкм SiGe БиКМОП техпроцесса. В качестве входного буфера усилителя используется ШПУ на основе транзисторной пары Дарлингтона с каскодным транзистором для обеспечения широкой полосы частот (до 27 ГГц по уровню падения K_u на 3 дБ).

В целом можно наблюдать тенденцию сокращения публикаций по отдельным схемам СВЧ ШПУ на основе составного транзистора и использования данного решения при разработке сложнофункциональных схем на основе Si и SiGe технологий.

5. Советские и российские разработки, 1988 г. — н. в.

Первые в СССР СВЧ МИС ШПУ М42177 были разработаны в 1988 г. Новосибирским электровакуумным заводом на основе Si БТ. Они имели $\Delta f = 0\text{—}500$ МГц, $P_{\text{вых}} > 10$ мВт, $K_{\text{ш}} < 10$ дБ, $\Delta K_y < 6$ дБ.

Еще одним образцом СВЧ МИС ШПУ, разработанным в СССР, был А1163, выпущенный на предприятии «Государственный завод “Пульсар”» в 1993 г. на основе Si БТ. Усилитель был разработан на основе составного транзистора Дарлингтона с резистивной ООС и выпускался в металлокерамическом корпусе КТ-22, аналогичном по присоединительным размерам пластмассовым корпусам СВЧ МИС ШПУ, таких как МSA0736. Усилитель имел следующие характеристики: $\Delta f = 0\text{—}1$ ГГц, $P_{\text{вых}} > 5$ мВт, $K_{\text{ш}} < 4$ дБ, $\Delta K_y = 11\text{—}20$ дБ.

В период с 1993 по 2011 гг. российскими предприятиями: НПФ «Микран», ФГУП «НПП “Исток”», ФГУП «ННИПИ “Кварц”», ФГУП «ЦНИТ-РИ им. академика А. И. Берга», «ВНИИРА-Навигатор», ФГУП «НИИПП» был разработан достаточно широкий ряд различных широкополосных СВЧ усилителей в модульных исполнениях, основным назначением которых является усиление широкополосных сигналов в кабельных линиях различной аппаратуры связи и радиолокации. Однако классических схем ШПУ на основе составного транзистора Дарлингтона в микросхемном корпусе для поверхностного монтажа в этот период не выпускалось.

Первыми с 1993 года СВЧ МИС ШПУ для поверхностного монтажа в аппаратуру стали усилители серии 1324, разработанные в АО «НПП “Пульсар”».

В период с 2007 по 2011 гг. были разработаны и серийно выпущены СВЧ МИС ШПУ 1324УВ1, 1324УВ2, 1324УВ3 на основе Si БТ с граничной частотой более 15 ГГц. Усилители были разработаны на основе составного транзистора Дарлингтона с ООС и выпускаются в 8-выводном металлокера-

мическом корпусе для поверхностного монтажа 5140.8-АНЗ, размером 5×5 мм². Усилители отличаются уровнем выходной мощности: до 120 мВт (1324УВ1, 1324УВ2 и 1324УВ6) и до 10 мВт (1324УВ3), а также коэффициентом усиления: 20 дБ (1324УВ2 и 1324УВ3) и 15 дБ (1324УВ1) [2, 29] (рис. 17). Для соответствия по габаритно-присоединительным размерам зарубежным аналогам была выпущена модификация ШПУ 1324УВ6У1 в пластмассовом корпусе КТ-47, являющегося аналогом широко распространенного корпуса SOT-89 размером $4,5 \times 4,1$ мм².

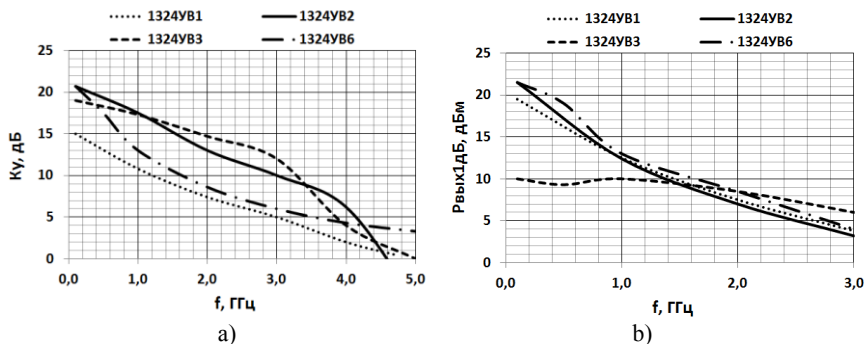


Рис. 17. Зависимости коэффициента усиления (а) и выходной мощности при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ (б) от частоты Si BT СВЧ МИС ШПУ 1324УВ1-3 и 1324УВ6 [2].

Fig. 17. Dependences of the gain (a) and the output power during compression of the gain by 1 dB (b) on the frequency Si of BT UHF MIS NBT 1324UV1-3 and 1324UV6 [2]

В период 2012—2014 гг. в АО «НПП «Пульсар»» были разработаны и выпущены СВЧ МИС ШПУ с расширенным частотным диапазоном (до 6 ГГц) на основе InGaP/GaAs ГBT (1324УВ7, 1324УВ8, 1324УВ9) в металлокерамических (5140.8-АНЗ) и пластмассовых (КТ-47) корпусах [29]. При разработке была значительно усовершенствована методика оптимизации схемы ШПУ для достижения равномерных динамических характеристик в полосе рабочих частот [30]. Была реализована частотная зависимость цепи ООС за счет применения индуктивности $L1$ для коррекции АЧХ, а также в корректирующая полосковая индуктивность $L2$ в цепи эмиттера транзистора Т1 для коррекции входного импеданса по критерию оптимального шумового коэффициента отражения от входа (рис. 18). Для температурной коррекции тока потребления ШПУ 1324УВ9 используются транзисторы Т3 и Т4 в диодном включении (рис. 18, б), что позволяет минимизировать разброс тока в диапазоне температур $-60^\circ\text{C} \dots +125^\circ\text{C}$ до 5%. Усилители отличаются выходной мощностью: 1324УВ7 до 25 мВт, 1324УВ8 до 60 мВт, 1324УВ9 до 120 мВт (рис. 19, б).

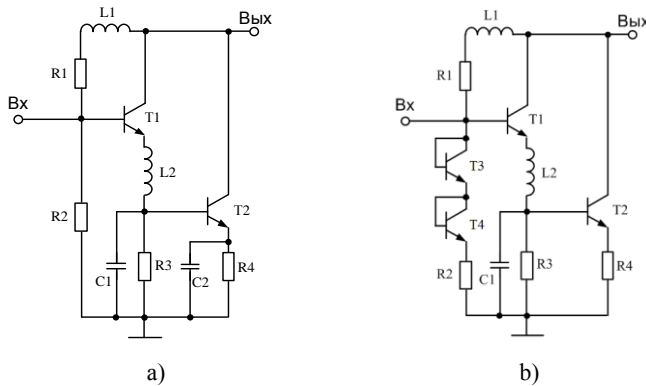


Рис. 18. Принципиальные схемы GaAs ГБТ СВЧ ШПУ 1324УВ7, 1324УВ8 (а), 1324УВ9 (б).

Fig. 18. Schematic diagrams of GaAs HBT microwave broadband amplifier 1324UV7, 1324UV8 (a), 1324UV9 (b)

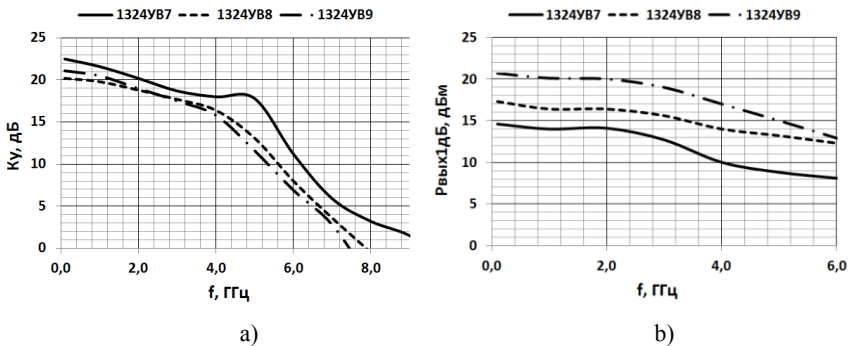


Рис. 19. Зависимости коэффициента усиления (а) и выходной мощности при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ (б) от частоты GaAs ГБТ СВЧ МИС ШПУ 1324УВ7-9.

Fig. 19. Dependences of the gain (a) and the output power during compression of the gain by 1 dB (b) on the frequency of GaAs GBT SHF MIS broadband amplifier 1324UV7-9

Дополнительно к данному комплекту InGaP/GaAs ГБТ СВЧ ШПУ для применения в системах с напряжением питания 3,3 В был выпущен усилитель 1324УВ15, аналогичный по динамическим характеристикам и принципиальной схеме усилителю 1324УВ7 и оптимизированный для использования при пониженном напряжении питания.

В период 2014—2017 гг. в АО «НПП «Пульсар»» были разработаны и выпущены СВЧ МИС ШПУ с применением GaAs рНЕМТ технологии. Усилители были разработаны на основе составного транзистора Дарлингтона с ООС в диапазоне частот до 9,5 ГГц и выходной мощностью до 320 мВт (1324УВ11, 1324УВ12, 1324УВ13), в металлокерамических (5140.8-АН3) и

пластмассовых (КТ-47) корпусах. В схемах реализована частотно-зависимая ООС на основе полосковых индуктивностей $L1$, $L2$, позволяющая получить существенную равномерность АЧХ во всем диапазоне рабочих частот (рис. 20). Усилители отличаются уровнем выходной мощности и диапазоном рабочих частот: 1324УВ13 до 15 мВт в диапазоне до 9,5 ГГц, 1324УВ12 до 100 мВт в диапазоне до 7,5 ГГц, 1324УВ11 до 320 мВт в диапазоне до 5,5 ГГц), рис. 21.

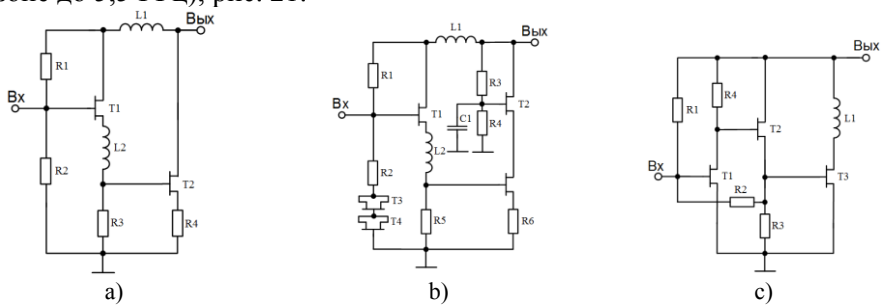


Рис. 20. Принципиальные схемы GaAs HEMT СВЧ ШПУ 1324УВ11 (а), 1324УВ12 (б), 1324УВ13 (с).

Fig. 20. Schematic diagrams of GaAs HEMT microwave HBT 1324UV11 (a), 1324UV12 (b), 1324UV13 (c)

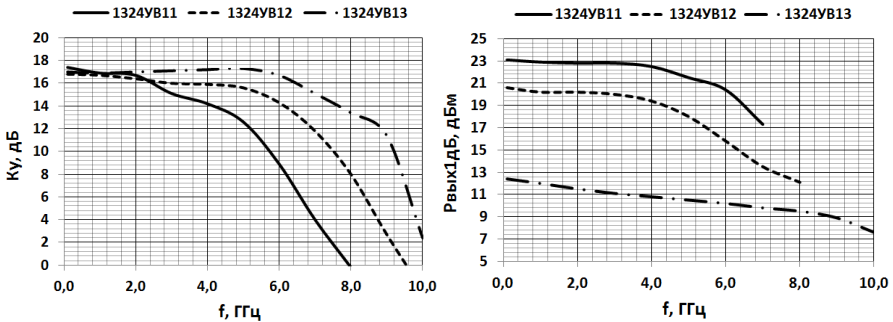


Рис. 21. Зависимости коэффициента усиления (а) и выходной мощности при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ (б) от частоты GaAs pHEMT СВЧ МИС ШПУ 1324УВ11-13.

Fig. 21. Dependences of the gain (a) and the output power during compression of the gain by 1 dB (b) on the frequency of GaAs pHEMT SHIS MIS broadband amplifier 1324UV11-13

С 2017 г. по настоящее время АО «НПП «Пульсар»» ведет разработки новых комплектов СВЧ МИС ШПУ на основе GaAs ГБТ и pHEMT технологий. Разрабатываются комплекты расширенной номенклатуры, нормированные на различные уровни коэффициента усиления (от 9 до 25 дБ),

различной линейной выходной мощности (от 8 до 130 мВт) и отличающиеся равномерными частотными характеристиками (неравномерность АЧХ не более 2,5—3,5 дБ, в диапазонах частот от 10 МГц до 8 ГГц). Также разрабатывается дифференциальный ШПУ на основе транзисторной пары Дарлингтона до 2,5 ГГц для применения в качестве драйвера аналого-цифровых преобразователей.

Разработаны и готовятся к серийному производству СВЧ МИС ШПУ с выходной мощностью до 560 мВт и рабочими частотами до 3,5 ГГц на основе GaAs ГБТ в металлокерамических корпусах для поверхностного монтажа, аналогах зарубежного корпуса QFN12 размером 3×3 мм². Ведется разработка СВЧ МИС ШПУ на основе GaAs pHEMT с повышенной стабильностью тока потребления и динамических параметров в пределах разброса напряжений питания 4,5—5,5 В. Разработаны и готовятся к серийному производству двухканальные СВЧ МИС ШПУ, предназначенные для работы в схеме с симметрирующими трансформаторами для достижения высокой линейности.

7. Заключение

При кажущейся простоте схемотехнического решения ШПУ с ООС на основе транзисторной пары Дарлингтона за прошедшие 30 лет было опубликовано значительное количество статей на тему разработок разнообразных видов микросхем данного типа при постоянно совершенствующихся полупроводниковых технологиях.

На сегодняшний день широкополосные усилители на основе составного транзистора Дарлингтона с ООС являются универсальными усилительными элементами для многих видов радиоэлектронной аппаратуры с частотами от нуля до десятков гигагерц. Серийные образцы изделий выпускаются на основе SiGe ГБТ, InGaP/GaAs ГБТ и GaAs pHEMT технологий, отличающихся диапазоном рабочих частот, выходной мощностью, коэффициентом шума и уровнем интермодуляционных искажений. Технология GaN HEMT позволяет получить большие уровни мощности широкополосных усилителей с ООС (более 1 Вт) вплоть до X-диапазона частот, что делает усилители на ее основе бесспорным лидером в части энергетических характеристик. Однако, несмотря на обилие публикаций, серийно-выпускаемых схем ШПУ на основе GaN крайне мало. СВЧ МИС ШПУ на основе GaAs и SiGe до сих пор преобладают на мировом рынке, ввиду их более низкой стоимости, простоте применения и возможности использования в низковольтной аппаратуре.

Список литературы

1. Каленкович Н. И., Боровиков С. М., Ткачук А. М., Образцов Н. С. Радиозлектронная аппаратура и основы ее конструирования. Минск : БГУИР, 2008. 200 с.
2. Савченко Е. М., Першин А. Д., Будяков А. С., Фондеркин К. И. Результаты разработки СВЧ МИС усилителей малой и средней мощности // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА Материалы XII Научно-технической конференции. Москва. 2013. С. 78—81.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том II . М. : ДМК Пресс, 2007. 728 с.
4. Шамаков Н. Д., Иванюшкин Р. Ю. Исследование усилителя мощности бегущей волны на полевых транзисторах // Материалы международной научно-технической конференции INTERMATIC-2016. М. : МИРЭА, 2016. С.
5. S. Darlington (Bell Labs), US Pat. No. 2,663,806, “Semiconductor signal translating device,” Dec. 1953.
6. Carl Battjes (Tektronics), US Pat. No. 4,236,119, “Monolithic Wideband Amplifier,” Nov. 1980.
7. MSA-0735, 0736, Cascadable Silicon Bipolar MMIC Amplifiers, Technical Data.
8. Шахнович И. Твердотельные СВЧ приборы и технологии. Невоспетые герои беспроводной революции // ЭЛЕКТРОНИКА : Наука, Технология, Бизнес, 2005, № 4.
9. Kobayashi K. W. et. al. GaAs Heterojunction Bipolar Transistor MMIC DC to 10 GHz Direct-Coupled Feedback Amplifier // IEEE GaAs IC Symposium. San Diego. CA. С. 87—90.
10. StandfordMicrodevices, SNA-586, datasheet.
11. StandfordMicrodevices, SNA-100, datasheet.
12. Beyer J. B., Prasad S. N., Bechker R. C., Nordman J. E., and Hohenwarter G. K. MESFET distributed amplifier design guidelines // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1984. Т. MTT-32, №. 3. С. 268—275.
13. Karthikeyan Krishnamurthy et. al. Broadband GaAs MESFET and GaN HEMT Resistive Feedback Power Amplifiers // IEEE JSSC. 2000. Т. 35, № 9.
14. Kukielka J. F. and Snapp C. P. Wideband Monolithic Cascadable Feedback Amplifiers Using Silicon Bipolar Technology. IEEE press. 1985. С. 330—331.
15. Konig U., Gruhle A., Schuppen A. SiGe Devices and Circuits : Where are Advantages over III/V // GaAs IC Symposium IEEE Gallium Arsenide Integrated Circuit Symposium 17th Annual Technical Digest 1995, San Diego, CA, USA. 1995. С. 14—17.
16. Schuppen A., Dietrich H., Gerlach S., Qhnmann H., Arndt J., Seiler U., Gotzfried R., Erben U., Schumacher H. SiGe-Technology for Mobile Communication Systems // Proceedings of the 1996 BIPOLAR/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (1996). С. 130—133.
17. SGA-6589 SGA-6589Z, DC-3500 MHz, Cascadable SiGe HBT MMIC Amplifier. Datasheet.
18. Ming-Chou Chiang, Shey-Shi Lu, Chin-Chun Meng, Shih-An Yu, Shih-Cheng Yang, and Yi-Jen Chan, Analysis, Design, and Optimization of InGaP–GaAs HBT Matched-Impedance Wide-Band Amplifiers With Multiple Feedback Loops // IEEE Journal of Solid-state Circuits. 2002. Т. 37. С 694—701.
19. Kevin W. Kobayashi, High Linearity-Wideband PHEMT Darlington Amplifier with +40 dBm IP3 // Proceedings of Asian-Pacific Microwave Conference. 2006 Asia-Pacific Microwave Conference. С. 1035—1038.
20. Kobayashi K. W., US Pat. No. 6,972,630 B2, “Self-biased darlington amplifier”. Dec. 6, 2005.

21. Douglas M. Johnson, Henry Z. Liwinski, US Pat. No. 6,842,075 B2. Jan. 11, 2005.
22. Kobayashi K. W., US Pat. No. 6,933,787 B1, “Linearized darlington amplifier”. Aug. 23, 2005.
23. Kevin W. Kobayashi, et. al. 1-Watt Conventional and Cascoded GaN-SiC Darlington MMIC Amplifiers to 18 GHz // IEEE RFIC Symp. Honolulu. Hawaii. 2007. С. 585—588.
24. Kobayashi, K. et al. “A 2 Watt, Sub-dB Noise Figure GaN MMIC LNA-PA Amplifier with Multi-octave Bandwidth from 0.2—8 GHz.” 2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, 2007. С 619—622.
25. Kobayashi K. W. An 8-W 250-MHz to 3-GHz Decade-Bandwidth Low-Noise GaN MMIC Feedback Amplifier With > +51-dBm OIP3 // IEEE Journal of Solid State Circuits. 2012. Т. 47, № 10. С. 2316—2326.
26. Chin-Wei Kuo, Hwann-Kaeo Chiou, An 18 to 33 GHz Fully-Integrated Darlington Power Amplifier With Guanella-Type Transmission-Line Transformers in 0.18 μ m CMOS Technology // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2013. Т. 23, № 12. С. 668—670.
27. Chou, Min-Li et al. A broadband Darlington power amplifier using 0.5 μ m GaN-on-SiC HEMT process. 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference. 2016. С. 1947—1948.
28. Lin, Yu-An et al. A 27-GHz 45-dB SFDR track-and-hold amplifier using modified darlington amplifier and cascoded SEF in 0.18- μ m SiGe process // 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. 2017. С. 137—140.
29. Савченко Е. М., Будяков А. С., Першин А. Д., Дроздов Д. Г., Кузьмин А. Ю., Сиомко В. О. Новые разработки отечественных СВЧ МИС широкополосных усилителей // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА. Материалы научно-технической конференции. М. : 2015. С. 183—187.
30. Савченко Е. М., Кузьмин А. Ю. Широкополосные сверхвысокочастотные усилители на основе биполярных и гетеробиполярных транзисторов // Материалы международной научно-технической конференции INTERMATIC-2018. М. : МИРЭА. 2018.
31. Shanwen Hu, Zhong Wang, Huai Gao, Li G. P. A Novel Darlington Cascode Broadband Drive Power Amplifier in 2 μ m InGaP/GaAs HBT Technology, WAMICON 2012 IEEE Wireless & Microwave Technology Conference, USA. 2012. С. 1—6.

Информация об авторах

Савченко Евгений Матвеевич, к. т. н., заместитель заведующего базовой кафедрой, доцент кафедры РТУ МИРЭА, г. Москва, Российская Федерация.

Першин Александр Дмитриевич, ведущий инженер научного отделения № 8, АО «НПП «Пульсар», г. Москва, Российская Федерация.

Кузьмин Алексей Юрьевич, заместитель начальника конструкторско-технологической группы АО «ГЗ «Пульсар», г. Москва, Российская Федерация.

Information about the authors

Evgenii M. Savchenko, Ph. D. in technology, leading researcher and deputy head of the department, associate professor Russian Technological University MIREA, Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0001-5843-4782.

Alexander D. Pershin, leading engineer “Pulsar” research and production enterprise, Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0001-7985-0101.

Alexey Y. Kuzmin, engineer of the “Pulsar” research and production enterprise, Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0001-8226-3346.