

SiGe и GaN СВЧ приборы для приёмопередающих и передающих модулей

Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Корнеев С. В., Дорофеев А. А., Миннебаев В. М.

Проведены экспериментальные исследования SiGe и GaN транзисторов и МИС S-, C- и X-диапазонов частот. Показано, что при проектировании приёмопередающих модулей АФАР оптимальными являются использование комбинации активных элементов на новых полупроводниковых материалах (SiGe и GaN) и реализация функционально законченных модулей как элементной базы нового поколения («система в корпусе»), в которой аналогово-цифровые МИС на SiGe образуют интеллектуальный СВЧ модуль, а ИС на GaN образуют входные и выходные устройства ППМ, обеспечивающие уровень излучаемой мощности и малошумящий приём зондирующих сигналов.

Введение

Основными требованиями, предъявляемыми к СВЧ полупроводниковой электронике, являются увеличение уровня излучаемой СВЧ мощности и увеличение функциональных возможностей при уменьшении габаритов и снижении потребляемой мощности [1].

В L-диапазоне эта задача решена с помощью кремниевых БИКМОП интегральных схем, примером которых являются монолитные интегральные схемы (МИС) мобильных радиотелефонов и приёмников навигационных систем. При использовании кремниевой технологии реализация этого подхода уже сейчас позволяет получить рекордные уровни удельной мощности при реализации усилителей [1,2].

В S-, C- и X-диапазонах граничные частоты кремниевых БИКМОП интегральных схем недостаточны и для реализации аналогово-цифровых МИС. В этих диапазонах привлекательным выглядит использование SiGe, преимуществами которого являются высокие значения граничных частот до 100 ГГц [3] при сохранении высокой плотности упаковки активных элементов в аналогово-цифровых МИС. Однако для использования в приёмопередающих модулях (ППМ) АФАР МИС на SiGe имеет ряд существенных недостатков, основным из которых является низкий уровень выходной СВЧ мощности, который не превышает 300 мВт [4].

Устранение этих недостатков SiGe МИС возможно при использовании во входных и выходных усилителях ППМ СВЧ приборов на GaN [5,6], которые в сочетании с приборами на SiGe могут составить элементную базу нового поколения радиоэлектронных устройств.

Экспериментальное исследование GaN и SiGe транзисторов и МИС

Были исследованы образцы SiGe СВЧ усилителей, смесителей, фазовращателей и аттенюаторов, разработанные совместно ФГУП «НИИМА «Прогресс» и ФГУП «НПП «Пульсар», и GaN малошумящие и мощные МИС, разработанные ФГУП «НПП «Пульсар». Выбранный для исследования комплект МИС позволяет реализовывать СВЧ модули приёмопередатчиков АФАР и других радиоэлектронных средств.

Фазовращатели и аттенюаторы на SiGe обладают минимальным потреблением по сравнению с другими полупроводниковыми материалами (GaAs, GaN, Si), поэтому

наибольший интерес вызывают точность реализации и неравномерность в полосе частот переключаемых дискретов амплитуды и фазы сигналов. Результаты измерений неравномерности фазы $\delta\phi$ показывают, что для дискрета фазы $\Delta\phi = 22,5^\circ$ в диапазоне частот $\Delta f = 2,0-3,5$ ГГц неравномерность составляет $\delta\phi \approx \pm 3^\circ$ (рис. 1).

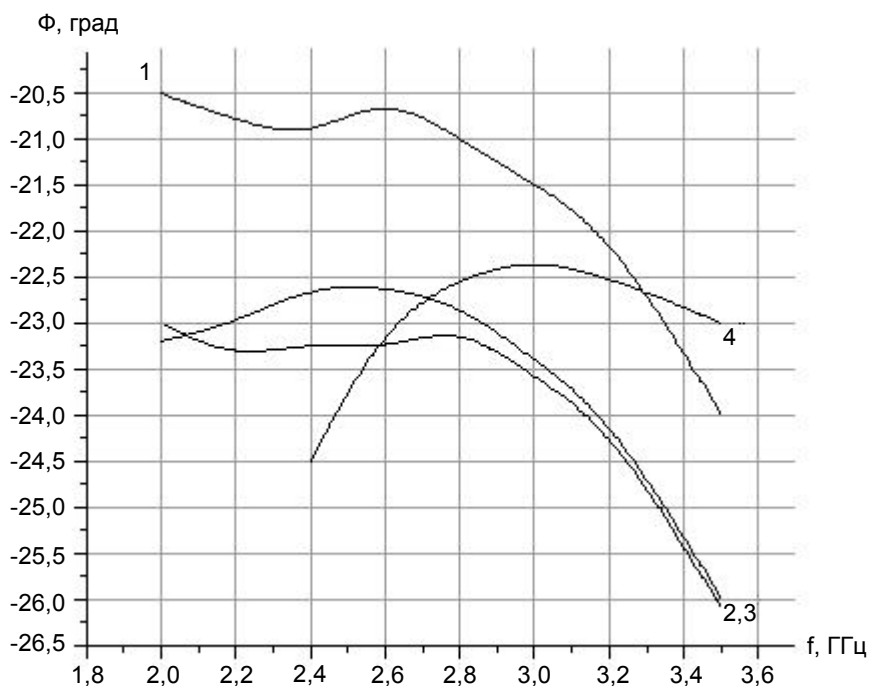


Рис. 1

Результаты измерений неравномерности фазы SiGe фазовращателя.
Кривые 1, 2, 3 и 4 относятся к разным образцам

Качество приёмных устройств во многом определяется коэффициентом шума входных каскадов. Зависимости коэффициента шума для МИС малошумящих усилителей (МШУ), изготовленных на различных полупроводниковых материалах, приведены на рис. 2.

Из полученных зависимостей видно, что минимальным коэффициентом шума обладает малошумящий GaAs транзистор. Однако при использовании в АФАР наряду с коэффициентом шума существенной является устойчивость МШУ к воздействию СВЧ мощности, просачивающейся на вход приёмника при работе передатчика.

Результаты испытаний GaN МШУ на воздействие входной мощности несинхронной помехи высокого уровня (рис. 3) показали, что граница разрушения МШУ составляет $P_{гр} = 25$ Вт ($\tau = 100$ мкс, $Q = 6$), что позволяет использовать GaN МШУ без устройства защиты.

Качество работы современных радиоэлектронных средств во многом определяется уровнем спектральной плотности фазового шума (СПФШ) твердотельных устройств формирования сигналов (ТУФС). Минимизация уровня СПФШ ТУФС зависит не только от характеристик резонатора, но и от уровня низкочастотного шума активного элемента автогенератора ТУФС [7].

Результаты измерений уровня низкочастотного шума различных типов полупроводниковых приборов показывают, что минимальным уровнем низкочастотных шумов обладают приборы на SiGe (рис. 4).

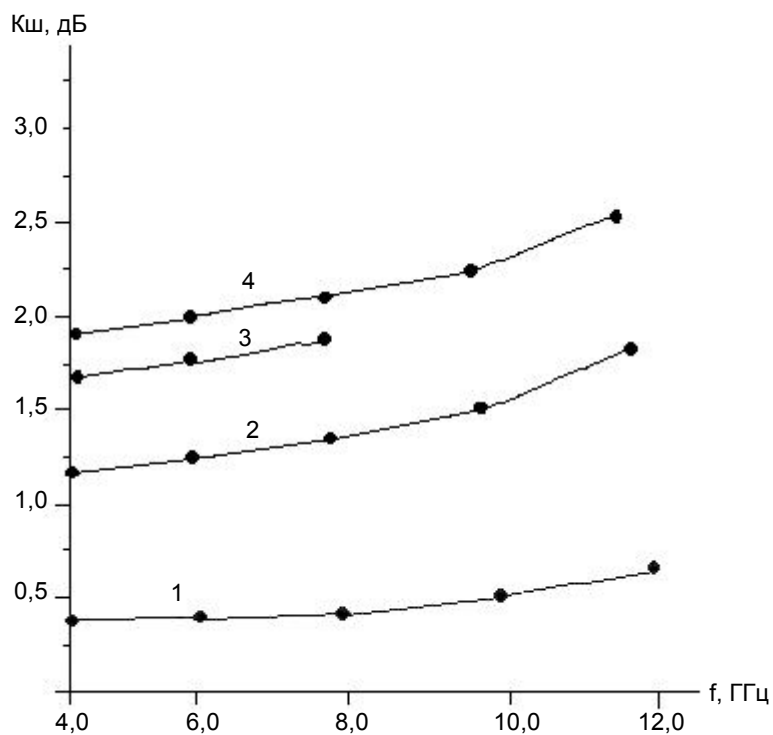


Рис. 2

Зависимости коэффициента шума МШУ на различных полупроводниковых приборах:
 кривая 1 - МШУ на малошумящем GaAs транзисторе; кривая 2 - МШУ на GaAs транзисторе средней мощности;
 кривая 3 - МШУ на SiGe транзисторе; кривая 4 - МШУ на GaN транзисторе

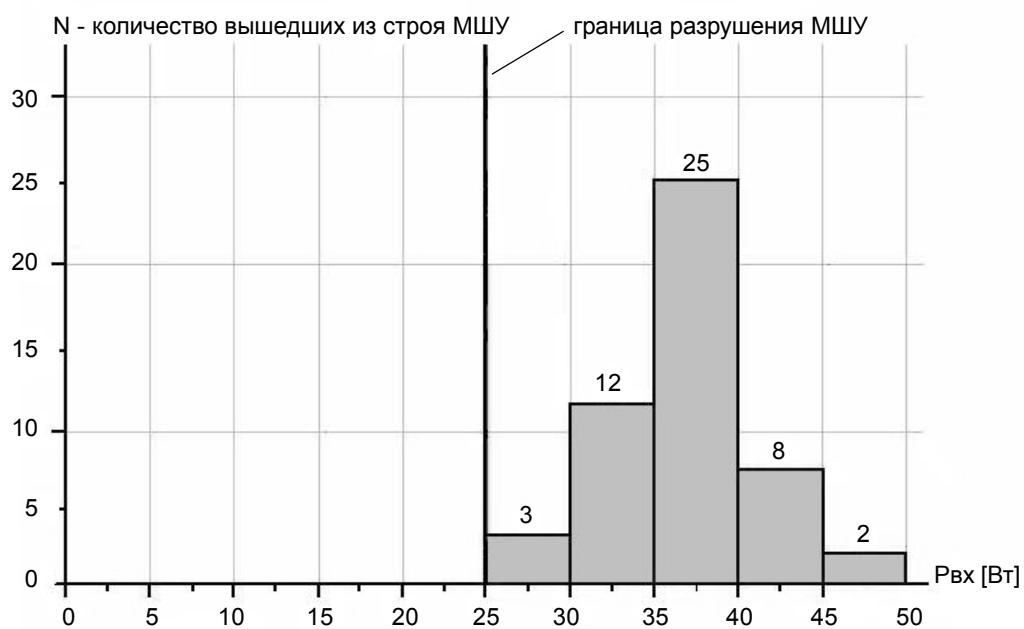


Рис. 3

Результаты испытаний GaN МШУ на воздействие импульсной СВЧ мощности

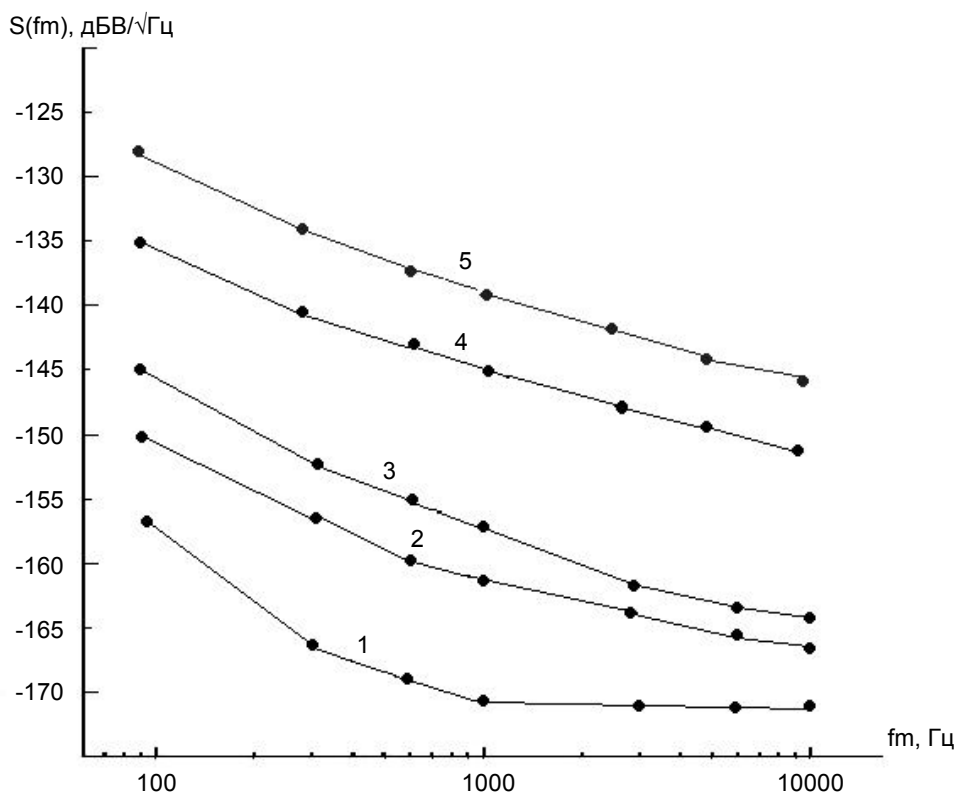


Рис. 4

Зависимости низкочастотного шума СВЧ усилителей С-диапазона на различных полупроводниковых приборах:
 кривая 1 - граница чувствительности измерителя; кривая 2 - SiGe СВЧ усилитель;
 кривая 3 - СВЧ усилитель на Si транзисторе (2Т642); кривая 4 - СВЧ усилитель на GaAs транзисторе (3П604);
 кривая 5 - СВЧ усилитель на экспериментальном GaN транзисторе

Использование в радиолокации импульсных режимов работы позволяет проявить обусловленные большим значением рабочих напряжений преимущества мощных GaN СВЧ транзисторов перед GaAs СВЧ транзисторами [8-10].

Измерения мощных СВЧ транзисторов (рис. 5) показали, что увеличение рабочего напряжения до 45 В позволяет обеспечить при длительности импульса 20 мкс уровень выходной мощности более 100 Вт в полосе частот 1 ГГц.

Проведённые экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1) точность реализации фазовых дискретов МИС SiGe фазовращателей составляет $\approx \pm 3^\circ$, что не уступает GaAs фазовращателям, превосходя их по экономичности и степени интеграции;

2) минимальный коэффициент шума ($K_{\text{ш}} \approx 0,4$ дБ) обеспечивают GaAs МШУ, однако, учитывая устойчивость к воздействию входной СВЧ мощности, для применения в АФАР оптимальными являются GaN МШУ, обеспечивающие $K_{\text{ш}} \approx 2,0$ дБ при граничной мощности разрушения $P_{\text{гр}} \approx 25$ Вт;

3) минимальный уровень спектральной плотности низкочастотного шума (СПФШН ≈ 160 дБВ/√Гц на частоте отстройки от несущей $f_m = 1$ кГц) имеют SiGe СВЧ усилители, что определяет их преимущество перед приборами на других полупроводниковых материалах при проектировании ТУФС С-диапазона;

4) за счёт большей величины рабочего напряжения исток-сток ($U_{\text{си}} = +45$ В) GaN СВЧ усилители мощности обеспечивают в 4 раза больший уровень СВЧ выходной мощности по сравнению с аналогичными GaAs СВЧ усилителями.

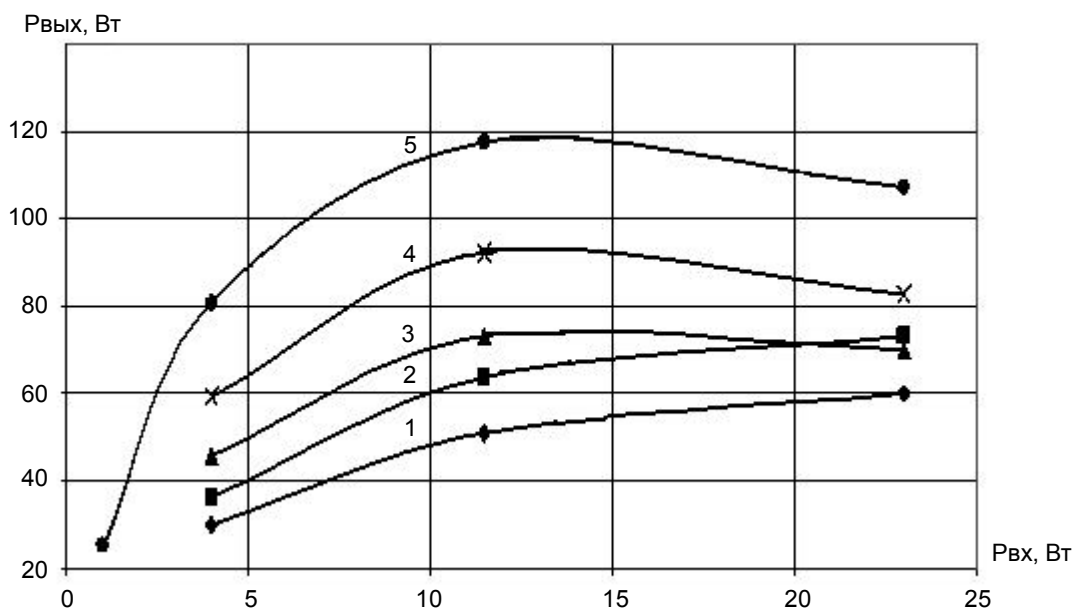


Рис. 5

Зависимости выходной мощности GaN транзистора от напряжения сток-исток $U_{си}$ в импульсном режиме работы:
 кривая 1 - непрерывный режим работы, $U_{си} = +24В$;
 кривая 2 - $\tau = 100$ мкс; $Q = 3$; $U_{си} = +24В$; кривая 3 - $\tau = 100$ мкс; $Q = 30$; $U_{си} = +24В$;
 кривая 4 - $\tau = 100$ мкс; $Q = 30$; $U_{си} = +35В$; кривая 5 - $\tau = 20$ мкс; $Q = 30$; $U_{си} = +45В$

Заключение

Проведённый анализ показал преимущество применения активных элементов на двух новых полупроводниковых материалах: GaN и SiGe.

Это связано с тем, что реализация ППМ АФАР на GaN и SiGe обеспечивает необходимый уровень излучаемой мощности 10-30 Вт при уровне предельно допустимой мощности на входе приёмных устройств не менее 3 Вт.

Применение СВЧ усилителей на GaN обеспечивает в X-диапазоне выходную мощность в импульсном режиме до 100 Вт, что в 4 раза больше, чем на GaAs транзисторах.

Объединение SiGe HBT со специализированными КМОП ИС открывает возможность создания «системы на кристалле», в которой объединены СВЧ аналоговые и цифровые устройства.

Полученные результаты позволяют определить SiGe технологию как интегрирующую преимущества кремниевой (низкая стоимость, высокий уровень интеграции) и арсенид-галлиевой (высокие граничные частоты) технологий.

При проектировании приёмопередающих модулей АФАР оптимальными являются использование комбинации активных элементов на новых полупроводниковых материалах (SiGe и GaN) и реализация функционально законченных модулей как элементной базы нового поколения («система в корпусе»), в которой аналогово-цифровые МИС на SiGe образуют интеллектуальный СВЧ модуль, а ИС на GaN образуют входные и выходные устройства ППМ, обеспечивающие уровень излучаемой мощности и маломумящий приём зондирующих сигналов.

Литература

1. А. Г. Васильев. Интегрированная элементная база СВЧ, силовой и фотоэлектроники. НПП «Пульсар» в борьбе за рынок высоких технологий. - Электроника НТБ, 2008, вып. № 3, с. 70-75.

-
2. В. Л. Аронов, А. А. Евстигнеев, А. С. Евстигнеев. Транзисторные передающие модули L- и S-диапазонов. - Электроника НТБ, 2005, вып. № 4, с. 30-32.
 3. Ионов Л. П. , Колковский Ю. В., Малышев И. В., Миннебаев В. М., Мухин И. И., Репин В. В., Суслов А. А. Разработка МИС с использованием SiGe БиКМОП технологии для построения трактов ППМ АФАР. //«Пульсар-2007». Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. Материалы V научно-технической конференции. - Владимир, 2007, часть 1, с. 102.
 4. А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский, С. В. Корнеев, А. А. Дорофеев. СВЧ приборы на SiGe и GaN - основа нового поколения СВЧ элементной базы для приёмопередающих модуля АФАР // 4-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения. - Минск, 2009, с. 91-93.
 5. А. Г. Васильев, В. Н. Данилин, А. А. Дорофеев, Ю. В. Колковский. Полупроводниковые приборы нового поколения на основе нитрида галлия //«Пульсар-2007». Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. Материалы V научно-технической конференции. - Владимир, 2007, часть 1, с. 8-11.
 6. A. Vasiliev, A. Dorofeev, Yu. Kolkovsky, V. Minnebaev. Microwave GaN Transistors: Achievement and Prospects // International Conference "Micro- and nanoelectronics". - Moscow-Zvenigorod, Russia , 2007, p.p. 31-33.
 7. Ю. В. Колковский, В. И. Федосов. Твердотельные СВЧ генераторы, стабилизированные микросхемами серии 321ФЕхх. - Электронная промышленность, 2003, № 2, с. 65-70.
 8. И. М. Аболдуев, А. Г. Васильев, А. А. Глыбин, А. М. Зайцев, Ю. В. Колковский, В. М. Миннебаев, Ю. В. Пырников. 200-ваттный импульсный усилитель мощности X-диапазона с активными элементами на основе широкозонных материалов // «Пульсар-2008». Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. Материалы VI научно-технической конференции. - Москва, 2008, с. 77-79.
 9. И. М. Аболдуев, А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский, В. М. Миннебаев. Исследование мощных СВЧ GaN полевых транзисторов в импульсном режиме // «Пульсар-2008». Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. Материалы VI научно-технической конференции. - Москва , 2008, с. 24-25.
 10. А. Г. Васильев, А. А. Дорофеев, Ю. В. Колковский, В. М. Миннебаев. СВЧ транзисторы и усилители мощности для сверхширокополосных РЭС // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем. Материалы конференции. - Омск, 2008, с. 31-32.