

**Кириллов В.В, Туральчук П.А.**  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»

## **Широкополосный усилитель мощности X-диапазона на транзисторах AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>**

*В работе обсуждаются вопросы разработки микроволновых усилителей мощности на транзисторах с гетеропереходом AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>. Основное внимание уделено синтезу трансформирующих цепей, обеспечивающих реактивную нагрузку на частотах второй и третьей гармоник и комплексный импеданс на фундаментальной частоте, что позволяет оптимизировать режим работы УМ с точки зрения уменьшения рассеиваемой мощности и соответственно повышения коэффициента полезного действия. Представлены результаты экспериментального исследования усилителя мощности X-диапазона мощностью 35 Вт, а также результаты моделирования широкополосного усилителя мощностью 10 Вт.*

**Ключевые слова:** транзистор на нитриде галлия, СВЧ усилитель мощности, согласующая цепь

Развитие полупроводниковых технологий мощных СВЧ-транзисторов и монолитных интегральных схем связано с необходимостью совершенствования различных радиоэлектронных и телекоммуникационных систем сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. В связи с чем проводится переход от электровакуумных приборов к мощным полупроводниковым усилителям, которые характеризуются меньшими массогабаритными показателями. Высокая подвижность и концентрация носителей заряда в канале AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> наряду с широкой запрещенной зоной определяют частотные и мощностные свойства гетеропереходных полевых транзисторов с каналом, обладающим высокой подвижностью носителей заряда [1].

Ключевым фактором в развитии СВЧ усилителей мощности (УМ) на AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> транзисторах является повышение коэффициента полезного действия (КПД) в требуемой полосе частот устройства. Основным физическим принципом увеличения КПД является работа усилителя в ключевом режиме, при котором в каждый момент времени существует либо ноль напряжения, либо ноль тока. Таким образом, минимизируется мощность, рассеиваемая в транзисторе. Дополнительным условием для получения 100% КПД является подавление высших гармоник тока в нагрузке [2]. В реальных транзисторах необходимо учитывать дополнительные источники потерь, которые существенно ограничивают КПД УМ: наличие паразитных емкостей, в которых возникают потери при коммутации напряжения; наличие сопротивления между стоком и истоком в состоянии, когда через транзистор течет ток; конечное время переключения транзистора из открытого состояния в закрытое и наоборот [3].

Схемотехнические подходы к реализации УМ обеспечивают условия работы, при которых выполняются условия минимизации перекрытия напряжения между стоком и истоком транзистора и тока стока, а также обеспечивается подавление высших гармоник тока в нагрузке. Нагрузка на выходе транзистора на соответствующих частотах (на основной частоте и её гармониках) при взаимодействии с гармониками тока, определяет форму напряжения на транзисторе. В идеализированном усилителе нулевое перекрытие

между стоком и истоком транзистора и тока, текущего через канал, может быть реализовано только при сложении бесконечного количества гармоник [4]. В реальных схемах УМ ограничиваются первыми тремя гармониками. Режим работы усилителя организован так, чтобы импеданс нагрузки на частотах гармоник использовался в сочетании с импедансом фундаментальной частоты, формируя напряжение сток-исток и ток стока транзистора с минимальной областью перекрытия.

В основе синтеза цепей согласования УМ лежит методика использования графоаналитических методов определения оптимального импеданса транзистора на основной частоте и реактивных нагрузок соответствующих гармоник с целью обеспечения заданного режима работы УМ с максимально достижимым КПД [5].

Условие трансформации импеданса транзистора на частотах соответствующих гармоник обеспечивается чисто реактивной нагрузкой в виде шлейфов с открытым концом (рис. 1). Благодаря существованию высокого значения реактивного сопротивления второй и третьей гармоник, параметры согласующих цепей гармоник не зависят от параметров согласующих цепей на фундаментальной частоте, что упрощает процедуру синтеза цепей по ранее найденным параметрам нагрузок на круговой диаграмме. Выбор параметров согласующей цепи на фундаментальной частоте ведется с учетом компромисса между сохранением высокого значения КПД, максимальным подавлением гармоник в цепях нагрузки и сохранением значения заданной выходной мощности.

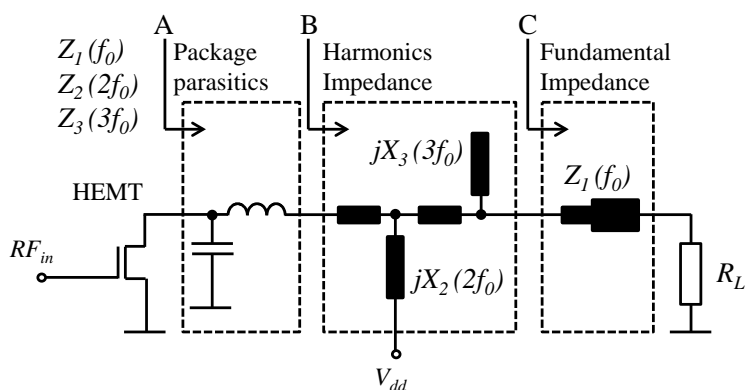


Рис. 1. Согласование УМ на частотах второй и третьей гармониках

В результате применения данной методики был разработан однокаскадный усилитель мощности СВЧ в виде микросборки, предназначенный для работы на частоте 9 GHz. Микрофотография усилителя мощности с использованием 80-пальцевого AlGaN/GaN рHEMT транзистора приведена на рис. 2. Входная трансформирующая цепь синтезирована таким образом, чтобы обеспечить согласование транзистора на фундаментальной частоте. Согласующие цепи реализованы на отдельных поликорковых подложках толщиной 0.25 мм. Экспериментальное исследование УМ выполнено с использованием СВЧ-генератора

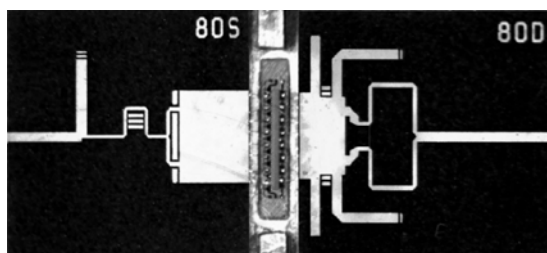


Рис.2 Микрофотография усилителя с использованием 80-пальцевого AlGaN/GaN рHEMT транзистора.

Keysight E8663D и измерителя мощности Keysight U2044XA. Зависимости выходной мощности, коэффициента усиления и КПД по добавленной мощности УМ от мощности входного сигнала в импульсном режиме представлены на рис. 3. Усилитель имеет выходную мощность 35 W и КПД по добавленной мощности не менее 50% на рабочей

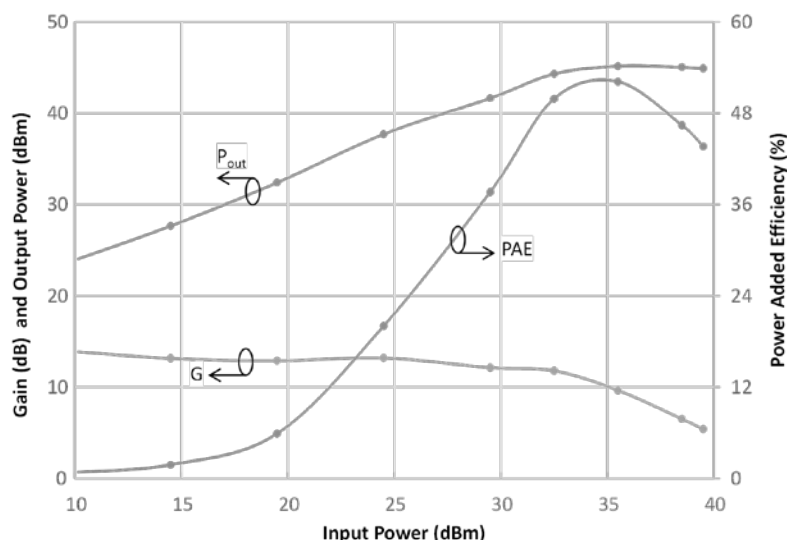


Рис. 3 Экспериментальные зависимости выходной мощности, коэффициента усиления и КПД по добавленной мощности от мощности входного сигнала УМ.

частоте. Импульсный режим работы характеризуется скважностью  $Q = 10$  и длительностью импульсов  $t = 10 \mu\text{s}$ .

Двухкаскадный широкополосный усилитель мощностью 10 Вт, предназначенный для работы в полосе частот 9-10 ГГц был также разработан на AlGaIn/GaN pHEMT-транзисторах. Входной каскад выполнен с использованием “10-пальцевого” транзистора, выходной – с использованием “40-пальцевого” транзистора. Цепи согласования УМ разработаны по интегральной технологии на подложке из GaAs. Разработка выполнена с использованием инструментов проектирования (PDK) СВЧ МИС, разработанной АО «Светлана – Рост».

Двухкаскадная структура усилителя позволяет достичь высокого коэффициента усиления в 18 дБ. При проектировании согласующих цепей использовались сосредоточенные ёмкостные элементы для компенсации паразитных параметров транзисторов в рабочей полосе частот. Цепи подачи питания выполнены на четвертьволновых отрезках линий передачи с фильтрующими конденсаторами и катушками индуктивности, с использованием внешних емкостей, в межкаскадной цепи.

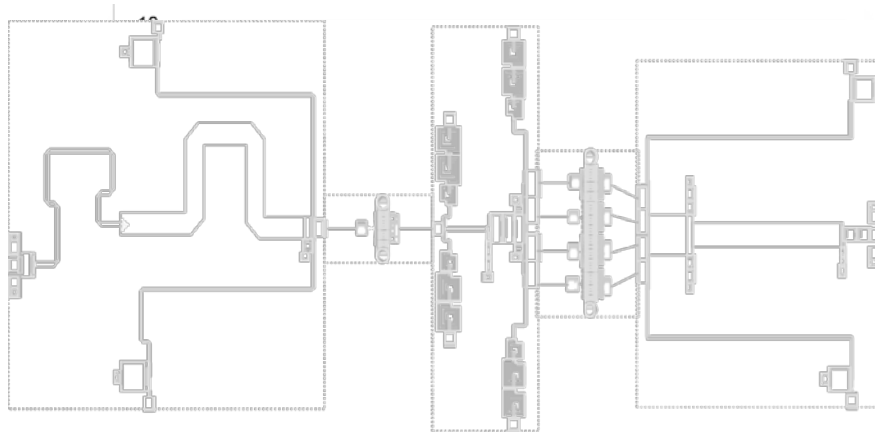


Рис. 4. Топология двухкаскадного широкополосного УМ 10 Вт

Рис. 6. Результаты моделирования частотной зависимости коэффициента отражения по входу усилителя

Топология УМ представлена на рис. 4. Результаты моделирования частотных зависимостей выходной мощности, коэффициента усиления и КПД УМ входного сигнала представлены на рис. 5. Усилитель, в частотном диапазоне 9-10 ГГц, имеет выходную мощность более 10 Вт с неравномерностью в полосе менее 0.6 дБ, и КПД не менее 32% в рабочей полосе частот. Габаритный размер усилителя мощности составили 7x4 мм.

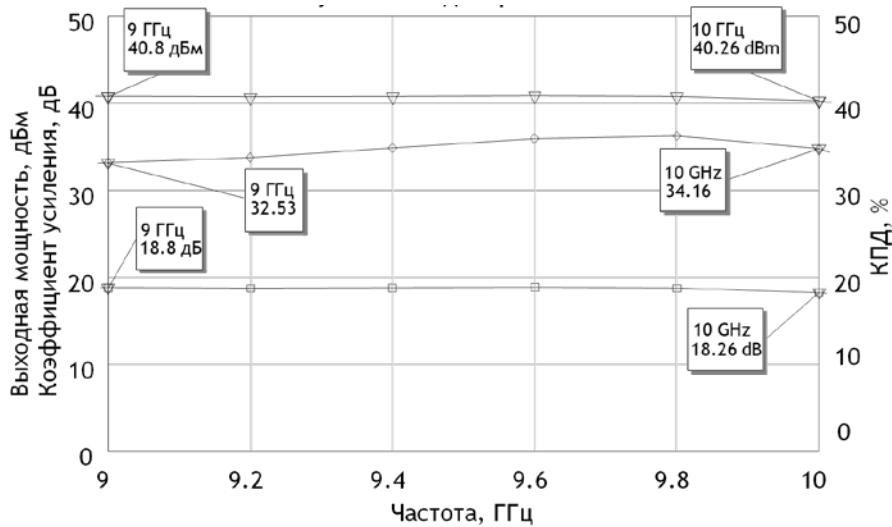


Рис. 5. Результаты моделирования частотных зависимостей КПД и выходной мощности широкополосного двухкаскадного УМ.

В результате применения методики синтеза согласующих цепей были разработаны усилители мощности СВЧ в виде интегральных схем, предназначенные для работы в X-диапазоне. Выяснено, что максимально достижимый КПД может быть получен с помощью расчета параметров усилителя мощности, нагруженного на импеданс соответствующих гармоник. Синтез трансформирующих цепей, обеспечивающих реактивную нагрузку на

частотах второй и третьей гармоник и комплексный импеданс на фундаментальной гармонике, позволяет оптимизировать работу УМ с точки зрения уменьшения рассеиваемой мощности и соответственно повышения КПД.

Библиографический список

1. Борисов Л., Щелкунов Г. // «Электроника» 2012. N 4. С. 102 – 10.
2. Grebennicov A., Switchmode RF and Microwave Power Amplifier. Academic Press. 2012. 345 p.
3. Raab F.H. // IEEE Trans. MTT. 2001. V. 49. N 8. P. 1462–1468.
4. Cripps S.C. RF Power Amplifiers for Wireless Communications. Artech House. Norwood, Mass, 2006.
6. Вендик О.Г., Вендик И.Б., Туральчук П.А., Парнес Я.М., Парнес М.Д // ПЖТФ. 2016. Т.42. N.21. С.1-8.