

07;15

## **Микроволновые усилители мощности на AlGaIn/GaN-транзисторах с двумерным электронным газом**

© О.Г. Вендик<sup>1</sup>, И.Б. Вендик<sup>1</sup>, П.А. Туральчук<sup>1</sup>,  
Я.М. Парнес<sup>1</sup>, М.Д. Парнес<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“

<sup>2</sup> ООО „Резонанс“, Санкт-Петербург  
E-mail: ogvendik@rambler.ru, mdparnes@mail.ru

Поступило в Редакцию 10 марта 2016 г.

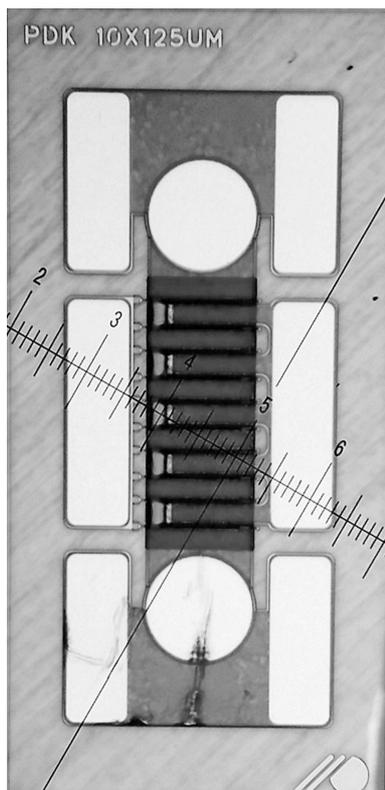
Обсуждается методика синтеза микроволновых усилителей мощности на транзисторах с гетеропереходом AlGaIn/GaN. Основное внимание уделено разработке методики синтеза трансформирующих цепей усилителя мощности с целью увеличения коэффициента полезного действия при сохранении высокого уровня выходной мощности. Используется независимое согласование на частотах гармоник и на фундаментальной частоте, что позволяет управлять значением достижимого коэффициента полезного действия в широкой полосе частот наряду с полным подавлением гармоник за пределами рабочей полосы. Разработаны и экспериментально исследованы микроволновые усилители мощности на 4 и 9 GHz.

С момента появления первых публикаций по разработке транзисторов на нитриде галлия GaN в компании APA Optics во главе с М. Ханом (M. Khan) [1] возможности приборов СВЧ-диапазона были существенно расширены благодаря использованию в составе транзисторной структуры гетероперехода AlGaIn/GaN, обладающего уникальными свойствами. В зоне гетероперехода между барьерным

AlGaN-слоем и нелегированным GaN-слоем формируется двумерный электронный газ с высокой подвижностью электронов [2]. Такой транзистор известен как транзистор с высокой подвижностью электронов (HEMT — High Electron Mobility Transistor). Высокая подвижность и высокая концентрация носителей заряда в канале AlGaN/GaN наряду с широкой запрещенной зоной определяют частотные и мощностные свойства гетеропереходных полевых транзисторов. Применение GaN-транзисторов существенно улучшает параметры СВЧ-усилителей мощности (УМ). УМ на HEMT-GaN-транзисторах используются в выходных каналах фазированных антенных решеток (ФАР), заменяя при этом гораздо более громоздкие и менее эффективные усилители мощности на клистронах или лампах бегущей волны [3]. ФАР — это наиболее масштабные и дорогостоящие устройства современных радиоэлектронных систем. Отказ от вакуумных активных элементов в составе ФАР сильно упрощает их конструкцию. В настоящее время успешно выпускаются СВЧ-УМ на основе HEMT-GaN-транзисторов, выходная мощность которых достигает 1000 W [4].

Решающим фактором в развитии СВЧ-УМ является повышение коэффициента полезного действия (КПД) при сохранении линейности и расширении полосы частот устройства [5]. В последнее время научные исследования сосредоточены на ключевых режимах работы СВЧ-УМ, таких как классы E и F, КПД которых достигает 70–80% [6,7]. Основным физическим принципом увеличения КПД при работе усилителя в режиме ключа заключается в том, что в транзисторе, который переключается между состояниями открыт/закрыт, в каждый момент времени существует либо ноль напряжения, либо ноль тока. Режим работы УМ в классе J с высоким КПД, впервые предложенный в работе [8], отличается линейностью работы и расширенным диапазоном частот. В режиме класса J вторая гармоника используется в сочетании с импедансом фундаментальной частоты так, чтобы сформировать так называемый эффект „уплощения“ протекающего тока.

В данной работе основное внимание уделено разработке методики синтеза трансформирующих цепей УМ с целью достижения максимального КПД. В результате были разработаны и экспериментально исследованы микроволновые УМ мощностью 4.5 W, предназначенные для работы на частотах 4 и 9 GHz в непрерывном режиме. Полевой транзистор с затвором Шоттки (ГПТШ) с 10 „пальцами“ и шириной

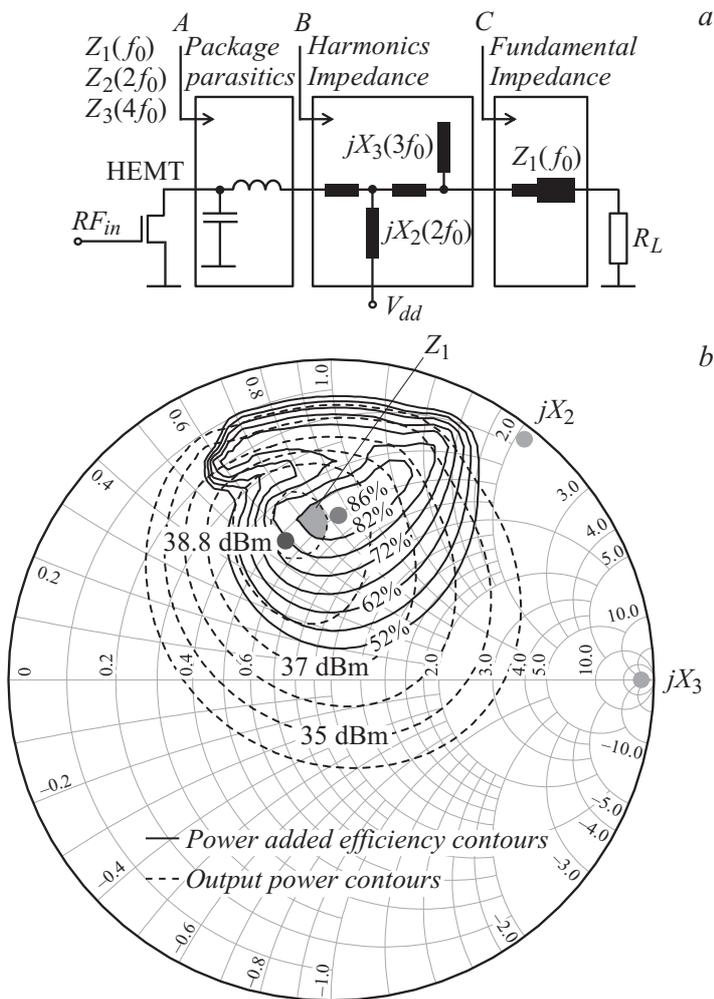


**Рис. 1.** Микрофотография AlGaN/GaN-HEMT-транзистора.

затвора  $125\ \mu\text{m}$  на основе гетероструктур AlGaN/GaN, использованный в составе УМ, приведен на рис. 1.

Синтез СВЧ-усилителей в ключевых классах (режимы работы E, F) с целью достижения максимально высокого КПД основан на анализе форм выходного тока и напряжения с целью минимизации их взаимного перекрытия [9]. Особый интерес представляет анализ работы УМ в частотной области с учетом конечного числа гармоник, обсуждаемый в работе [10]. Этот метод может быть применен к анализу и синтезу усилителей в режимах C, E, F и J. При этом выполняется оценка

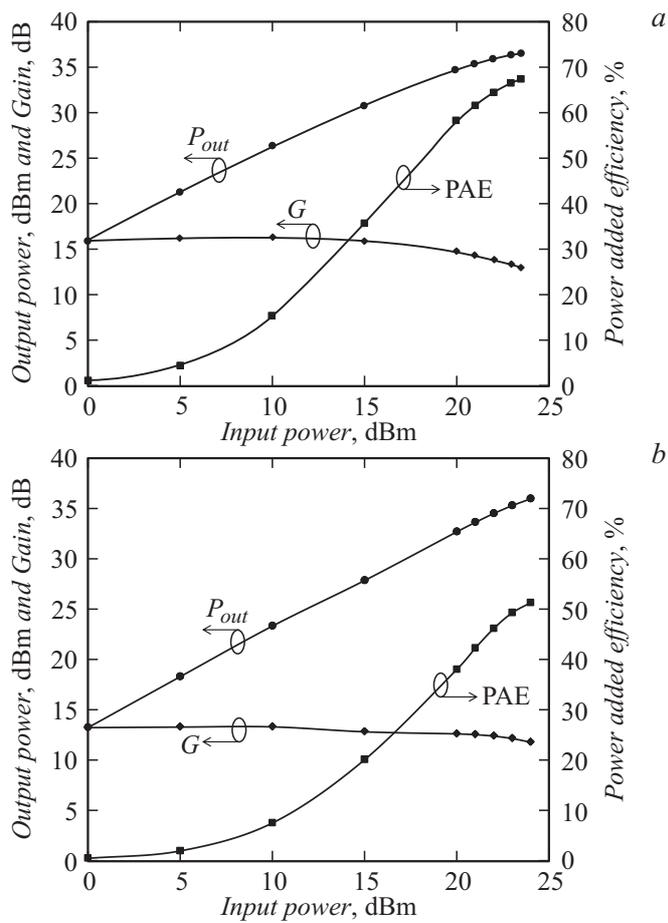
1\* Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 21



**Рис. 2.** Обобщенная схема УМ (а). Результаты анализа импеданса нагрузки УМ на основной частоте и частотах гармоник, обеспечивающей максимальный КПД (b).

характеристик УМ, нагруженного на импеданс соответствующих гармоник. Обобщенная схема УМ, представленная транзистором и выходной согласующей цепью, приведена на рис. 2, *a*. Количество гармонических составляющих, учитываемых в спектрах выходного сигнала, определяет максимально достижимый КПД. Для обеспечения заданного режима работы УМ с высоким КПД требуется анализ и расчет параметров выходной нагрузки транзистора с учетом гармонических составляющих. В то же время выходная мощность определяется комплексной нагрузкой на выходе усилителя на частоте основной гармоники. Расчет нагрузки СВЧ-УМ основан на использовании графоаналитического метода и оптимизационных процедур, заключающихся в построении контуров выходных нелинейных характеристик УМ, таких как выходная мощность и КПД (в англ. лит. load-pull technique) на традиционной диаграмме комплексных импедансов в полярных координатах. Анализ параметров СВЧ-транзистора с помощью данной методики позволяет определить оптимальную нагрузку транзистора для получения максимального КПД и выходной мощности. В случае работы транзистора в ключевом режиме, т.е. с использованием набора высших гармоник (классы E, F, J), класс работы определяется параметрами согласующих цепей на частотах используемых гармоник. Это означает, что может быть найдено условие трансформации импеданса транзистора на основной частоте и реактивной нагрузки соответствующих гармоник. Контур постоянной мощности и КПД, полученные на частоте основной гармоники, а также реактивные сопротивления на частотах второй и третьей гармоник ( $jX_2$  и  $jX_3$ ) представлены на рис. 2, *b*. Пересечение контуров постоянной мощности и КПД позволяет определить границы области оптимальных нагрузок УМ на частоте основной гармоники.

Основной принцип синтеза согласующих цепей усилителя, принятый в данной работе, заключается в обеспечении соответствующей нагрузки транзистора как на частоте основной гармоники (плоскость *C*), так и с использованием набора высших гармоник (плоскость *B*, рис. 2, *a*) [11]. Данная методика независимого согласования на частотах гармоник и на фундаментальной частоте позволяет управлять значением достижимого КПД в широкой полосе частот наряду с полным подавлением гармоник за пределами рабочей полосы [12]. Благодаря существованию высокого значения реактивного сопротивления второй и третьей гармоник, параметры согласующей цепи гармоник в плоскости *B* не зависят от



**Рис. 3.** Экспериментальные зависимости выходной мощности, коэффициента усиления и КПД от мощности входного сигнала УМ, разработанного для работы на 4 GHz (a) и 9 GHz (b).

параметров согласующих цепей на фундаментальной частоте в плоскости  $S$  и полностью определяются параметрами транзистора на частотах гармоник. Выбор параметров согласующей цепи на фундаментальной

частоте ведется с учетом компромисса между сохранением высокого значения КПД, максимальным подавлением гармоник в цепях нагрузки и поддержанием заданной выходной мощности.

В результате применения данной методики были разработаны однокаскадные усилители мощности СВЧ в виде интегральных схем, предназначенные для работы на частотах 4 и 9 GHz. Экспериментальное исследование УМ выполнено с использованием СВЧ-генератора Keysight E8663D и измерителя мощности Keysight U2044XA. Зависимости выходной мощности, коэффициента усиления и КПД УМ от мощности входного сигнала представлены на рис. 3. Усилитель на 4 GHz характеризуется следующими параметрами: коэффициент усиления 12 dB, КПД 68%, выходная мощность 4.5 W. УМ, предназначенный для работы на частоте 9 GHz, имеет выходную мощность 4 W и КПД не менее 45%.

Таким образом, 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.

Работа выполнена в рамках государственной работы „Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)“ проектной части государственного задания Министерства образования и науки РФ (задание № 8.2579.2014/К).

## Список литературы

- [1] *Kuznia J.N., Khan M.A., Olson D.T., Kaplan R.* // J. Appl. Phys. 1993. V. 73. N 27. P. 4700–4702.
- [2] *Данилин В.Н., Жукова Т.А., Кузнецов Ю.* и др. // Электроника. 2005. № 4. С. 20–29.
- [3] *Борисов Л., Щелкунов Г.* // Электроника. 2012. № 4. С. 102–110.
- [4] *Formicone G., Boueri F., Battaglia B.* // Proc. IEEE COMCAS. 2013. P. 4.
- [5] *Grebennicov A.* Switchmode RF and Microwave Power Amplifier. Academic Press, 2012. P. 345.

- [6] *Colantonio P., Giannini F., Limiti E.* High efficiency RF and microwave solid state power amplifier. A John Wiley and Sons, 2009. P. 495.
- [7] *Pengelly R.S., Wood S.M., Milligan J.W.* et al. // IEEE Trans. MTT. 2012. V. 60. N 6. P. 1764–1783.
- [8] *Cripps S.C.* RF Power Amplifiers for Wireless Communications. Artech House. Norwood, Mass, 2006.
- [9] *Sokal N.O.* // IEEE MTT-S. 2000. V. 2. P. 779–782.
- [10] *Raab F.H.* // IEEE Trans. MTT. 2001. V. 49. N 8. P. 1462–1468.
- [11] *Туральчук П.А., Кириллов В.В., Вендик О.Г., Парнес М.Д.* // Труды конф. „Электроника и микроэлектроника СВЧ“. Санкт-Петербург, 2016. С. 182–186.
- [12] *Tuffy N., Zhu A., Brazil T.J.* // IEEE MTT-S. 2011. P. 1–4.