

Отечественные GaN СВЧ-транзисторы с комплектом обеспечения проектирования от АО «ПКК Миландр» и усилительные модули на их основе

М. Полуни¹, С. Тарасов², Г. Глушков³

УДК 621.382.3 | ВАК 2.2.2

Все более широкое применение усилительных СВЧ-транзисторов на основе нитрида галлия в радиолокационных системах и телекоммуникационном оборудовании обусловлено целым рядом преимуществ этих устройств, включая широкую полосу рабочих частот, высокие удельную мощность и КПД. В АО «ПКК Миландр» разработана линейка мощных GaN СВЧ-транзисторов L-, S- и C-диапазонов частот с комплектом средств обеспечения проектирования, а также серия усилительных модулей, построенных на базе этих транзисторов.

Основные преимущества усилительных СВЧ-транзисторов на основе нитрида галлия (GaN) – высокая удельная мощность (более 10 Вт/мм в X-диапазоне и до 30 Вт/мм на лабораторных образцах) и высокие значения пробивных напряжений сток-исток, которые значительно превышают аналогичные параметры транзисторов на основе арсенида галлия. Среди других преимуществ GaN-устройств можно отметить более широкую полосу рабочих частот и высокий коэффициент полезного действия стока.

Большинство компаний изготавливают GaN-транзисторы с высокой подвижностью носителей заряда (HEMT) на подложках карбида кремния по проектным нормам 0,15 и 0,25 мкм (для приборов с рабочей частотой до 16–18 ГГц), а также 0,45 мкм (для приборов с рабочей частотой до 6–8 ГГц). В системах радиолокации из-за требований к мощности и тенденции уменьшения массогабаритных характеристик изделий СВЧ GaN-транзисторы являются безусловными лидерами. Транзисторы этого типа все чаще применяются зарубежными компаниями при разработке и производстве как узкополосных, так и широкополосных устройств. Повышение спроса на СВЧ GaN-устройства обусловлено постоянным ростом на рынках компонентов для радиолокационных систем на базе активных фазированных антенных

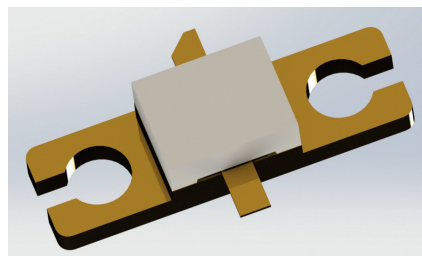


Рис. 1. Корпус усилительных приборов с выходной мощностью от 5 до 50 Вт (включительно)

решеток и телекоммуникационного оборудования для сетей связи пятого поколения.

В АО «ПКК Миландр» разработана линейка псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) на основе нитрида галлия с напряжением питания стока 50 В и выходной импульсной мощностью от 5 до 1200 Вт. Транзисторы предназначены, в первую очередь, для систем радиолокации, навигации и телекоммуникации, а также для применения в системах радиосвязи и радиопротиводействия. Начало серийного производства транзисторов категории качества «ОТК» запланировано на II квартал 2025 года.

На основе данных транзисторов разработана линейка твердотельных усилительных приборов с выходной мощностью от 5 до 600 Вт (в режиме компрессии коэффициента усиления 3 дБ) (рис. 1), а также приборы с выходной мощностью 1000 и 1200 Вт в балансных корпусах (рис. 2).

С развитием вычислительной техники в начале 2000-х годов актуальной стала задача обеспечения проектирования на уровне, обеспечивающем достижение требований технического задания в части энергетических

¹ АО «ПКК Миландр», ведущий инженер, polunin.m@milandr.ru.

² АО «ПКК Миландр», ведущий инженер, tarasov.sv@milandr.ru.

³ АО «ПКК Миландр», заместитель директора центра по проектированию, glushkov.gi@milandr.ru.

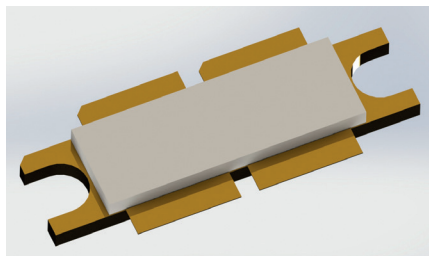


Рис. 2.
Балансный корпус приборов с выходной импульсной мощностью 1000 и 1200 Вт

параметров аналоговых радиочастотных усилительных устройств (выходная мощность, коэффициент полезного действия) с первой итерации разработки (или с минимальной подстройкой первой итерации) без применения широко распространенного ранее метода «подрезки и подпайки» микрополосковых линий и последующей серьезной корректировки макетной производственной документации.

Более того, ключевым фактором при выборе твердотельного усилительного прибора для разработчика усилительного устройства является, как правило, наличие нелинейной модели транзистора, позволяющей создавать готовое устройство без длительного и трудоемкого этапа регулировки и настройки или с минимальной настройкой. До сих пор отечественные производители полупроводниковых усилительных устройств не предоставляли нелинейные модели на разрабатываемые и производимые транзисторы.

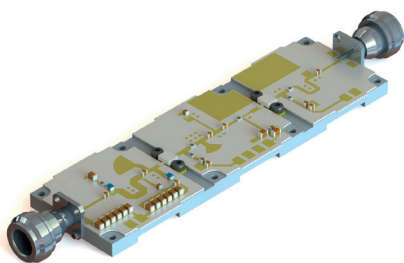


Рис. 3.
Усилительный модуль L-диапазона (1,2–1,6 ГГц) с номинальной выходной мощностью 50 Вт

Для того чтобы ни в чем не уступать всемирно известным компаниям, занимающимся производством СВЧ GaN-изделий, АО «ПКС Миландр» начало разработку нелинейных моделей транзисторов для их последующего предоставления заинтересованным организациям. Модель СВЧ GaN-транзистора состоит из линейных структурных элементов, таких как корпус и внутренние согласующие цепи (входные и выходные), и нелинейного элемента – транзисторного кристалла.

Для определения таких параметров, как эквивалентная нелинейная входная, выходная и проходная емкость кристалла СВЧ-транзистора, необходимо снять ряд вольт-амперных характеристик при различных напряжениях

сток-исток и затвор-исток и различных температурах, а также определить линейную часть с помощью измерения S-параметров кристалла и требуемые нелинейные коэффициенты.

Точный подход для экстракции паразитных параметров корпуса устройства состоит в моделировании электромагнитных полей методом конечных элементов. На основе полученных данных создается эквивалентная схема корпуса или строится система уравнений, описывающих преобразование сигнала в частотной области элементами корпуса транзистора.

Финальная верификация и корректировка нелинейной модели проводится с помощью оборудования для тестирования методом load&pull. Также для разработчиков усилительных СВЧ-устройств могут быть экспериментально определены семейства нагрузочных импедансов

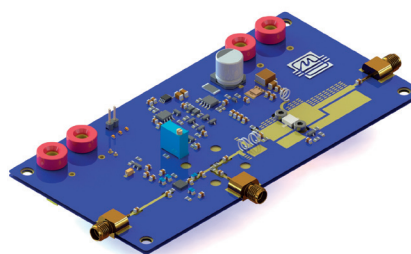


Рис. 4.
Усилительный модуль диапазонов Band 40, Band 41 (2,3–2,7 ГГц) с номинальной выходной мощностью 50 Вт

с оптимальными точками (по выходной мощности, КПД или коэффициенту усиления) и малосигнальные S-параметры исследуемого устройства.

Для проверки корректности нелинейных моделей разработанных транзисторов в АО «ПКС Миландр» были смоделированы и изготовлены усилительный модуль L-диапазона (1,2–1,6 ГГц) с номинальной выходной мощностью 50 Вт (в импульсном и непрерывном режимах работы) (рис. 3), усилительный модуль диапазонов Band 40, Band 41 (2,3–2,7 ГГц) с номинальной выходной мощностью 50 Вт (в импульсном и непрерывном режимах работы) (рис. 4), а также усилительный модуль L-диапазона (1,2–1,4 ГГц) с номинальной выходной импульсной мощностью 1200 Вт (рис. 5).

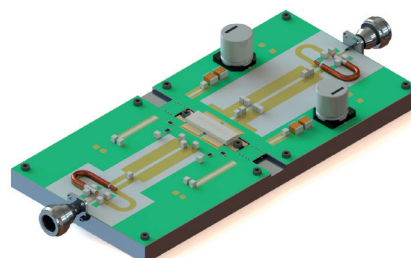


Рис. 5.
Усилительный модуль L-диапазона (1,2–1,4 ГГц) с номинальной импульсной выходной мощностью 1200 Вт