

# Экономически выгодный согласованный по входу гибридный GaN-транзистор для применения в радарх S-диапазона

Р. Смит<sup>1</sup>, Л. Девлин<sup>2</sup>, Р. Сантакумар<sup>3</sup>, Р. Мартин<sup>4</sup>, Г. Кон<sup>5</sup>

УДК 621.382 | ВАК 05.27.01

В настоящее время в СВЧ усилителях мощности широко применяются нитрид-галлиевые транзисторы (технология GaN-on-SiC). Стоимость на единицу площади у GaN-транзисторов по-прежнему выше, чем у конкурирующих технологий, таких как GaAs, при этом стоимость ватта выходной СВЧ-мощности ниже. Радары с активной фазированной антенной решеткой (АФАР) могут содержать сотни усилителей, поэтому любое возможное снижение стоимости на одном усилителе при сохранении параметров заметно сказывается на общей экономии при проектировании устройства. Компании Plextek RFI и Qorvo совместно разработали «гибридный» транзистор QPD1020, в котором сочетаются преимущества GaN- и GaAs-технологий.

**В** GaN-транзисторе QPD1020 используется внутренняя входная согласующая цепь, реализованная на GaAs-кристалле. Она обеспечивает 50-Ом согласование в диапазоне 2,7–3,5 ГГц. В радиолокационных приложениях S-диапазона обычно задействуется только часть полосы частот. Поэтому выходная согласующая цепь может быть реализована на печатной плате таким образом, чтобы обеспечить максимальную выходную мощность или КПД (либо их компромисс) в нужной более узкой полосе частот.

QPD1020 может применяться в выходном каскаде РЛС с АФАР или в качестве предусилителя для более мощного выходного каскада.

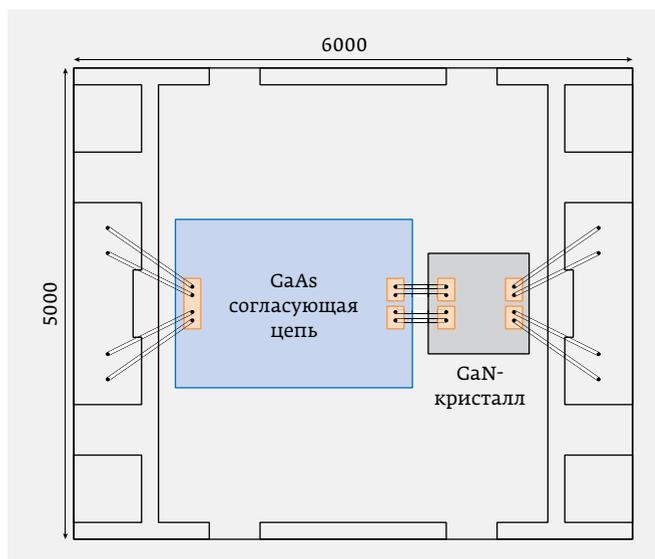
## СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ СОГЛАСОВАННЫХ ПО ВХОДУ ТРАНЗИСТОРОВ

Существует несколько подходов к реализации GaN усилителей мощности (УМ) (табл. 1).

GaN СВЧ монолитные интегральные схемы (МИС) с внутренним 50-Ом согласованием как на входе, так и на выходе отличаются наилучшими СВЧ-характеристиками, особенно на высоких рабочих частотах, и занимают наименьшее пространство на печатной плате. Однако, как правило, это самый дорогостоящий из рассмотренных

вариантов и его нельзя оптимизировать для разных частотных диапазонов. Пример конструкции полностью согласованного однокаскадного GaN усилителя мощности, работающего в X-диапазоне, описан в [1].

Усилитель мощности, реализованный на основе корпусного GaN-транзистора, часто оказывается наименее дорогим решением, хотя его размеры обычно самые большие. Примеры реализации ряда GaN УМ с использованием дискретных несогласованных транзисторов описаны в [2]. В дополнение к тому, что это решение занимает много места на печатной плате, оно требует



**Рис. 1.** Внутренняя структура транзистора QPD1020 (размеры в мкм)

<sup>1</sup> Plextek RFI, инженер-консультант.

<sup>2</sup> Plextek RFI, исполнительный директор.

<sup>3</sup> Qorvo Inc., менеджер разработок.

<sup>4</sup> Qorvo Inc., менеджер линейки продуктов авиакосмического применения.

<sup>5</sup> Макро Групп, ведущий product-менеджер СВЧ-направления, George.Cohn@macrogroup.ru.

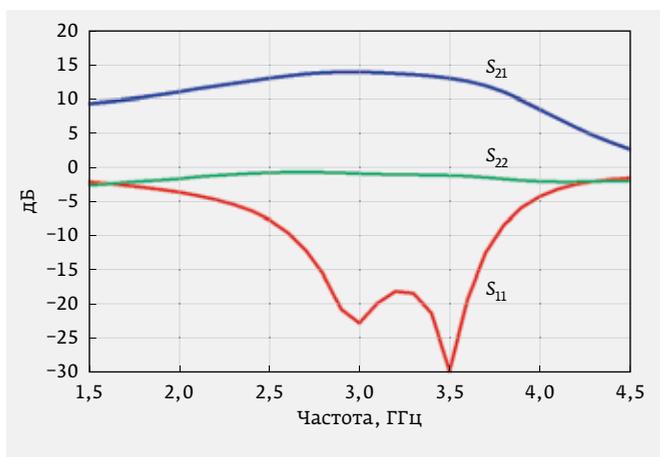


Рис. 2. Измеренные S-параметры транзистора QPD1020

наибольшего труда разработчика при проектировании усилительной системы.

Стоимость на единицу площади у GaN-on-SiC компонентов несомненно выше, чем у выполненных по технологии GaAs с относительно небольшим количеством этапов изготовления. Поэтому целесообразно использовать GaAs-технология для входной согласующей цепи и технологию GaN для самого транзистора. Такой составной транзистор с входным согласованием позволяет значительно снизить затраты, даже несмотря на более сложный процесс размещения двух кристаллов в одном корпусе, без ущерба для характеристик.

### КОНСТРУКЦИЯ ТРАНЗИСТОРА QPD1020

QPD1020 состоит из кристалла самого GaN-транзистора и GaAs-кристалла согласующей цепи, помещенных в пластиковый SMT-корпус размером 6 × 5 мм (рис. 1). Для соответствия требованиям к выходной мощности была



Рис. 3. Усилитель мощности на основе QPD1020

выбрана апробированная в промышленных масштабах GaN-технология компании Qorvo. Использование существующего пластикового SMT-корпуса помогло сократить сроки разработки. Затем компания Plextek RFI разработала кристалл GaAs и проволочные соединения, обеспечивающие 50-Ом согласование на входе транзистора в S-диапазоне.

Кристалл GaAs был спроектирован так, чтобы занял большую часть свободной длины корпуса и таким образом уменьшилась длина проволочных соединений. По этой же причине кристаллы GaAs и GaN были расположены как можно ближе один к другому. Как видно на рис. 1,

Таблица 1. Сравнение различных подходов к согласованию GaN-транзисторов

	GaN МИС (50-Ом согласование по входу и выходу)	Дискретный GaN-транзистор с внешним согласованием	«Гибридный» GaN-транзи- стор с 50-Ом согласованием по входу
Стоимость	Наивысшая	Низкая	Средняя
СВЧ-характеристики	Наилучшие	Хорошие	Очень хорошие
Возможность настройки	Нет	Настройка входа и выхода	Настройка выхода
Площадь, занимаемая на печатной плате	Наименьшая	Наибольшая	Средняя
Усилия со стороны раз- работчика при проекти- ровании УМ	Малые	Наибольшие	Средние

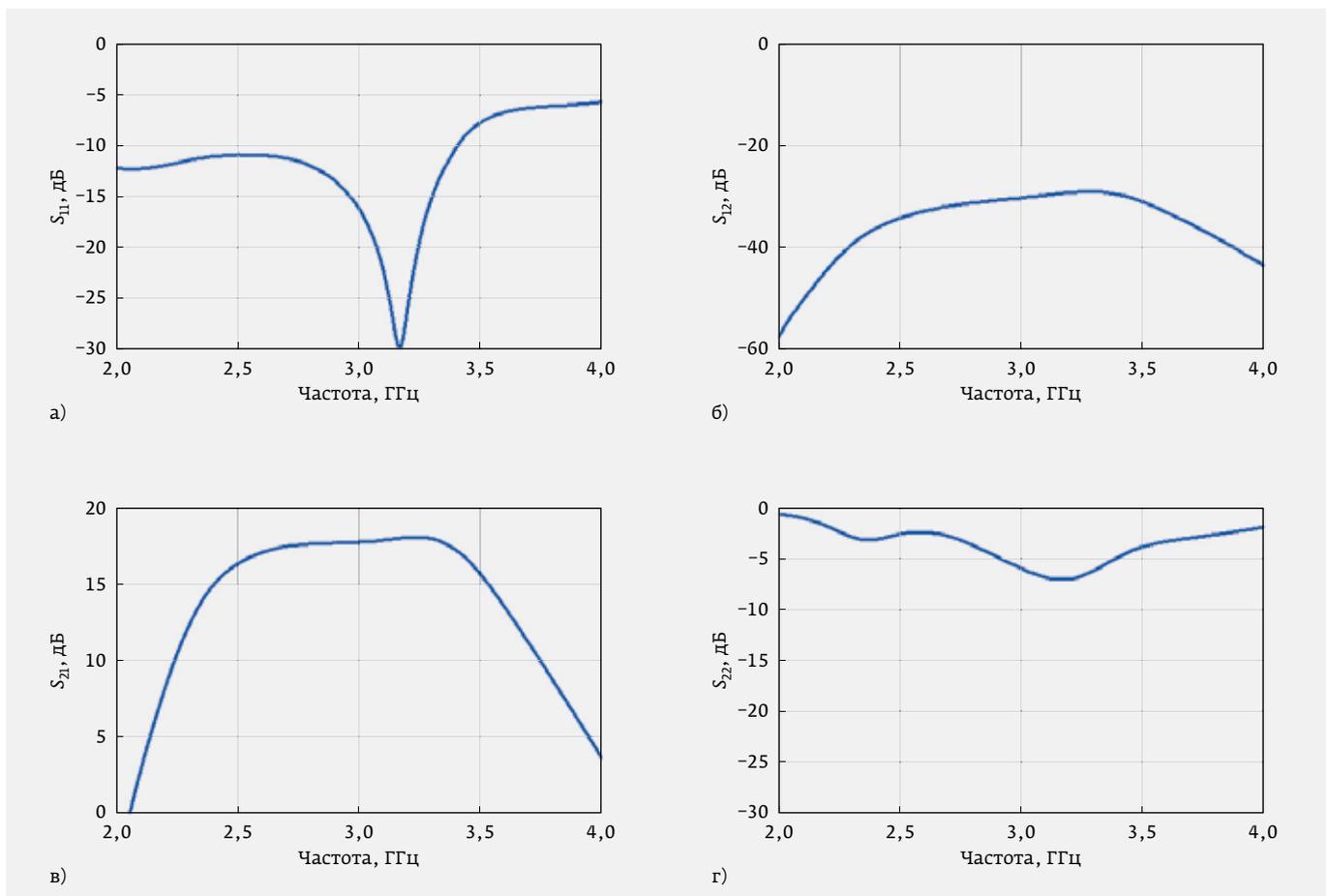
Таблица 2. Результаты измерений методом согласования нагрузки транзистора QPD1020

Параметр	Частота, ГГц		
	2,7	3,1	3,5
Выходная мощность (значение, полученное при настройке на максимальную мощность), дБм	45,2	44,9	45,0
КПД суммирования мощности (PAE) (значение, полученное при настройке на максимальную мощность), %	55,0	53,7	56,7
Выходная мощность (значение, полученное при настройке на максимальный КПД), дБм	43,6	43,6	43,9
КПД суммирования мощности (значение, полученное при настройке на максимальный КПД), %	66,5	64,0	65,0

можно уменьшить размер компонента за счет использования заказного корпуса. Хотя сокращение длины согласующего кристалла и целесообразно, но для выбранного корпуса это привело бы к увеличению длины проволочных соединений, что ухудшило бы СВЧ-характеристики.

Входная согласующая цепь содержит фильтр нижних частот, состоящий из серии линий передачи и шунтирующих конденсаторов. Встроенные шунтирующие резисторы

также включены в согласующую цепь для улучшения стабильности в рабочей полосе частот. Они уменьшают общий коэффициент усиления, следовательно должны применяться с осторожностью. Для обеспечения безусловной стабильности вплоть до очень низких температур может потребоваться некоторая дополнительная умеренная стабилизация вне кристалла.

Рис. 4. Измеренные S-параметры усилителя мощности на основе QPD1020: а -  $S_{11}$ , б -  $S_{12}$ , в -  $S_{21}$ , г -  $S_{22}$

## ИЗМЕРЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА QPD1020

Для серии образцов гибридного транзистора были измерены  $S$ -параметры (рис. 2). Согласование по входу обеспечивает коэффициент отражения  $S_{11}$  менее  $-15$  дБ и коэффициент передачи  $S_{21}$  около 13 дБ в диапазоне 2,8–3,6 ГГц. Данные измерения были произведены в отсутствие выходной цепи согласования, а выход транзистора был нагружен на 50 Ом. Это означает, что коэффициент усиления усилителей, разработанных с использованием QPD1020, будет выше, чем показанный  $S_{21}$ .

Были также проведены измерения методом согласования нагрузки (load-pull). Их результаты приведены в табл. 2.

## РЕАЛИЗАЦИЯ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

Результаты измерений, представленные выше, были использованы для разработки варианта конструкции (reference design) усилителя мощности, рассчитанного на работу в диапазоне 2,7–3,1 ГГц (рис. 3).

Выходная цепь согласования данного УМ представляет собой двухполосный фильтр нижних частот с дополнительным шунтирующим конденсатором для настройки второй гармоники. Для снижения паразитной индуктивности и минимизации потерь использовались конденсаторы небольшого размера с малыми потерями. Важно, чтобы конденсаторы в выходной согласующей цепи выдерживали высокие напряжения, характерные для GaN-транзистора.

Благодаря наличию внутренней цепи согласования по входу, на печатной плате требуется мало внешних согласующих элементов. Блокировка по постоянному току, пара стабилизирующих резисторов и серия развязывающих затвор конденсаторов – все, что нужно в данном случае.

Печатная плата, изготовленная из ламината Rogers 4350В толщиной 20 мил (0,51 мм), соединена с алюминиевым носителем. Размер отладочной платы 40,1×63,0 мм (1,58"×2,48"). Заполненные медью переходные отверстия обеспечивают эффективный отвод тепла к металлическому основанию. Температуру под корпусом можно измерить через отверстие, просверленное в боковой грани основания.

## ИЗМЕРЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

Измеренные  $S$ -параметры УМ приведены на рис. 4. В режиме малого сигнала УМ обеспечивает усиление 17,5 дБ на частоте 2,7 ГГц и 17,9 дБ – на частоте 3,1 ГГц. Обратные потери на входе составляют менее  $-10$  дБ во всем диапазоне, достигая  $-30$  дБ на 3,15 ГГц. Конструкция была оптимизирована для достижения высокого КПД суммирования мощности (PAE). Усиление малого сигнала достигает более 15 дБ между 2,4 и 3,5 ГГц, что свидетельствует

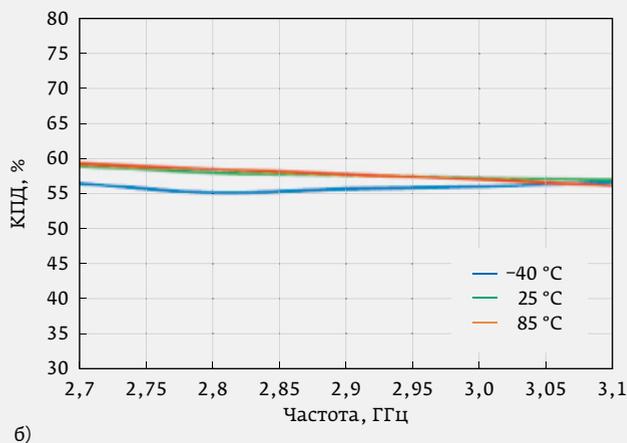
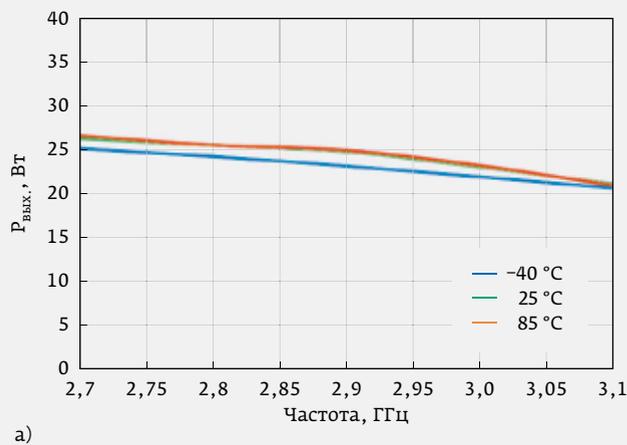


Рис. 5. Зависимости выходной мощности (а) и КПД (б) в точке с уровнем компрессии 3 дБ УМ на основе QPD1020

о широкополосности внутренней цепи согласования. При тестировании пяти усилителей в диапазоне температур от  $-40$  до  $85^{\circ}\text{C}$  наблюдалась превосходная повторяемость между различными экземплярами.

Измеренные зависимости выходной мощности от частоты и температуры в режиме большого сигнала представлены на рис. 5. Выходная мощность в точке с уровнем компрессии 3 дБ составляет минимум 21 Вт, а КПД – 57% (при температуре  $25^{\circ}\text{C}$ ) – с учетом всех потерь в цепи согласования и разъеме.

Таким образом, транзистор QPD1020 обладает характеристиками, которые позволяют успешно использовать его в радиолокационных приложениях S-диапазона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Glynn S. and Devlin L.** An X-band GaN PA MMIC for Phased Array Radar Applications. – ARMMS Conference, 2016.
2. **Smith R., Dearn A. and Glynn S.** The Design of High Performance L-band GaN PAs Using Commercially Available Discrete Transistors. – ARMMS Conference, Nov 2016.

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



### ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ. КРАТКИЙ КУРС «БЕЛОЙ МАГИИ»

**А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов**  
под общей редакцией А. И. Белоуса

Впервые в отечественной научно-технической литературе в объеме одной книги детально и последовательно рассмотрен комплекс теоретических и практических аспектов проектирования и организации производства различного рода радиоэлектронных устройств, приборов и систем, общим и основным отличительным признаком которых является высокая скорость обработки и передачи данных.

В монографии рассмотрены основные теоретические и практические аспекты проектирования быстродействующих электронных устройств «по полной цепочке» — от верхнего системного уровня иерархии до уровня базовых элементов и плат.

Книга ориентирована на широкий круг читателей: студентов, аспирантов, преподавателей технических университетов, инженеров, специализирующихся в области разработки и организации производств различного рода радиоэлектронных устройств, приборов и систем.

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2017. – 872 с.  
ISBN 978-5-94836-500-8

Цена 1960 руб.

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)