

# УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ L-ДИАПАЗОНА НА БАЗЕ GaN-ТРАНЗИСТОРА

Дж.М.Грин<sup>1</sup>, Р.М.Х.Смит<sup>1</sup>, Л.М.Дэвлин<sup>1</sup>, Р.Сантакумар<sup>2</sup>, Р.Мартин<sup>2</sup>, Г.Кон<sup>3</sup>

УДК 621.382  
ВАК 05.27.00

В последние годы все более широкое распространение получают устройства, созданные на базе нитрид-галлиевой (GaN) технологии. Некоторые примеры усилителей мощности на основе GaN-транзисторов на SiC-подложке (GaN-on-SiC) описаны в [1]. В настоящей статье рассматривается усилитель мощности на базе GaN-транзистора QPD1013 компании Qorvo. Особое внимание уделено вопросам теплового режима, актуальным при использовании мощных GaN-транзисторов в корпусах для поверхностного монтажа.

## ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРА

В транзисторе QPD1013 компании Qorvo (рис.1) используется технологический процесс 0,5 мкм GaN-on-SiC. Транзистор выполнен в недорогом DFN (Dual Flat No Leads) корпусе размерами 6,6×7,2 мм, облегчающем монтаж компонента на печатную плату (ПП) по сравнению с традиционными металлокерамическими корпусами.

Были проведены измерения в режимах большого и малого сигналов параметров образцов транзисторов, смонтированных на материале Rogers RO4350 толщиной 20 мил (0,508 мм). Постоянное напряжение транзистора составляло 65 В, ток 240 мА.

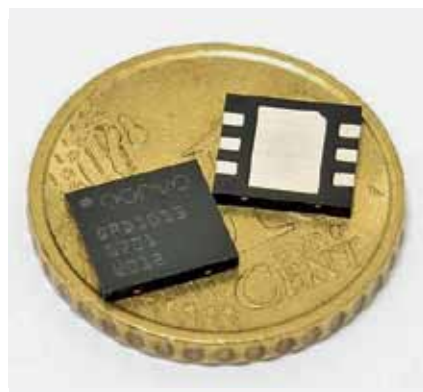
На рис.2 отражены зависимости максимального коэффициента усиления от частоты для трех разных транзисторов, которые наглядно показывают неплохую повторяемость характеристик. В то время как QPD1013 демонстрирует усиление выше 6 ГГц, из практических соображений диапазон его использования ограничивают в пределах около 3,5 ГГц.

Согласно измерениям методом согласования нагрузки (load-pull) транзистор способен обеспечить

выходную мощность 52 дБм (160 Вт) и КПД 70% при работе с импульсными сигналами со скважностью 10 и шириной импульса 100 мкс. Полученные данные использовались в качестве основы для создания схемы усилителя мощности (УМ) на базе QPD1013.

## ОСОБЕННОСТИ СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

Отправной точкой для разработки конструкции УМ было обеспечение безусловной стабильности транзистора в полосе рабочих частот, что достигнуто путем включения во входную цепь RC-контура. Были использованы мощные резисторы на базе нитрида алюминия компании IMS [2]. Усилитель должен быть безусловно

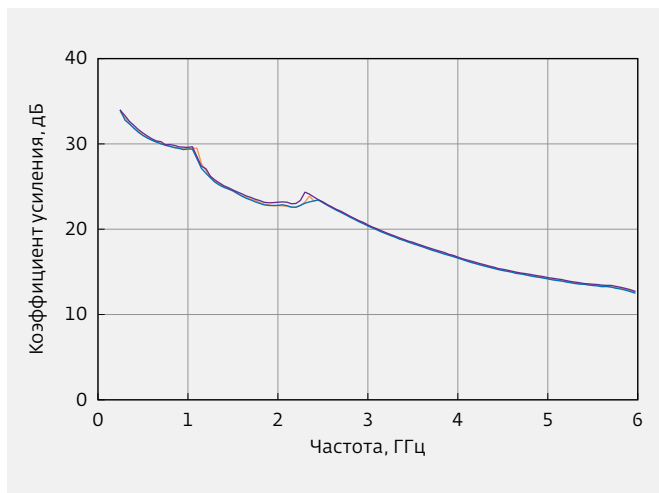


**Рис.1.**  
Внешний вид  
и размеры  
транзистора  
QPD1013

<sup>1</sup> Компания Plextek RF1.

<sup>2</sup> Компания Qorvo.

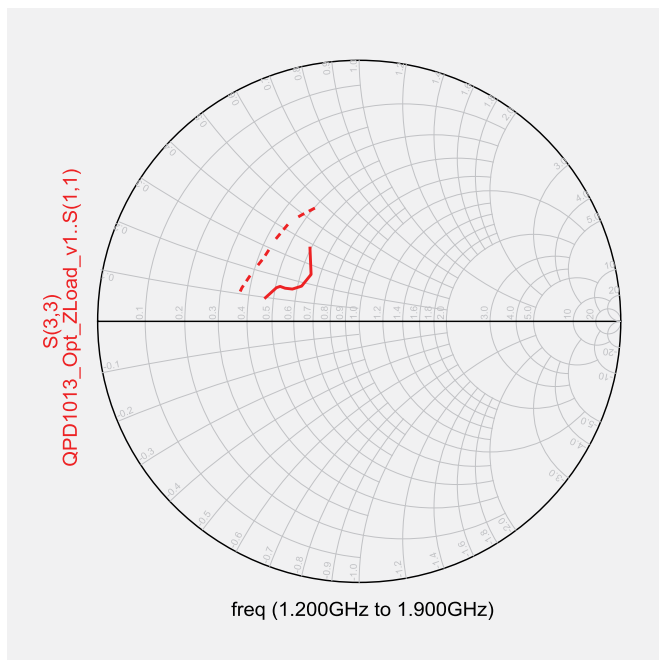
<sup>3</sup> Макро Групп, ведущий product-менеджер СВЧ-направления,  
George.Cohn@macrogroup.ru.



**Рис.2.** Зависимость коэффициента усиления от частоты для трех экземпляров QPD1013

стабильным на всех рабочих частотах и при температурах вплоть до  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Стабильность на низких частотах может быть повышена путем добавления соответствующей RC-развязки для точек подачи смещения, что можно выполнить позже в процессе разработки.

Данные, предоставленные компанией Qorvo, использовались для определения оптимальных импедансов нагрузки для выходной мощности и КПД стока в диапазоне от 1,2 до 1,8 ГГц. QPD1013 обеспечивает



**Рис.3.** Импеданс нагрузки УМ на диаграмме Смита. Пунктирной линией обозначена требуемая зависимость, сплошной – результат расчетов

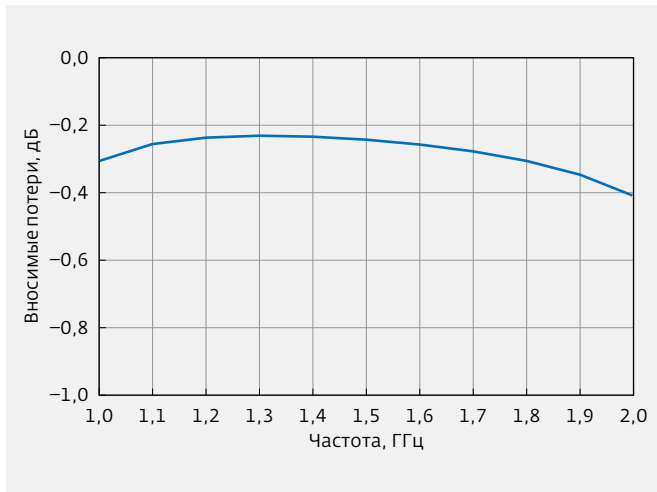


Рис.4. Вносимые потери выходной цепи усилителя

до 200 Вт выходной мощности при определенных условиях нагрузки, но требуется также учитывать КПД, чтобы сохранить приемлемую рабочую температуру транзистора. Импедансы нагрузки, обеспечивающие наибольший КПД стока, были выбраны в качестве целевых, которые должны быть достигнуты в выводной цепи. Соответствующий уровень выходной СВЧ-мощности при этом был довольно высоким,

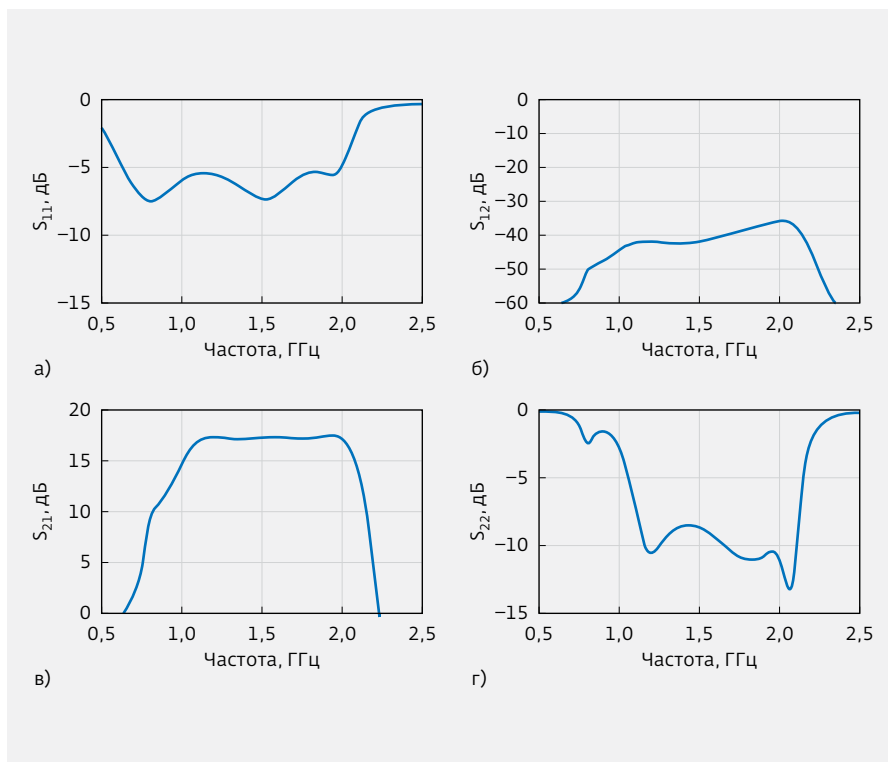


Рис.5. Характеристики УМ в режиме малого сигнала (S-параметры):

а –  $S_{11}$ , б –  $S_{12}$ , в –  $S_{21}$ , г –  $S_{22}$

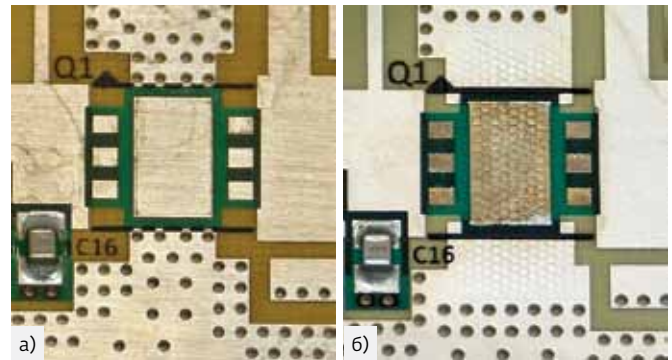


Рис.6. Медные площадки (а) и заполненные медью переходные отверстия (б) печатной платы УМ на базе QPD1013

а большой КПД обеспечивал приемлемые тепловые характеристики.

В выходной согласующей цепи использовалась полосно-пропускающая структура для обеспечения требуемых импедансов нагрузки. Высокие рабочие напряжения и уровни СВЧ-мощности – потенциальные ловушки для неосторожного разработчика. СВЧ проводящие дорожки должны быть достаточно широкими, чтобы избежать чрезмерного повышения температуры и потенциального разрушения из-за очень высокого уровня мощности. Выбранные конденсаторы должны иметь соответствующее напряжение пробоя, чтобы выдерживать колебания постоянного и переменного напряжения, и добротность, позволяющую избежать избыточного рассеивания мощности и снижения КПД.

Электромагнитное моделирование выполнялось в программе Keysight Momentum. Изображение смоделированного импеданса на диаграмме Смита, нормированной на 10 Ом, показано на рис.3. Наложение кривой нагрузки, полученной в результате моделирования, на предлагаемые производителем контуры нагрузки (не изображены) позволяет предположить, что целевые значения мощности и КПД будут достижимы.

Расчетные вносимые потери выходной цепи (рис.4) связаны с потерями в диэлектрике печатной платы и в SMT-компонентах. Даже потери в доли децибел при таких



Рис.7. Фотография УМ на базе QPD1013

уровнях выходной мощности будут соответствовать нескольким ваттам рассеиваемой мощности, что значительно снижает общий КПД УМ.

Входная согласующая цепь реализована на основе ФНЧ. Нитрид-алюминиевые резисторы компании IMS, использованные для обеспечения стабильности затворной цепи, могут рассеивать мощность в несколько ватт, что позволяет УМ выдерживать уровни входного сигнала от 10 до 20 Вт, требуемые

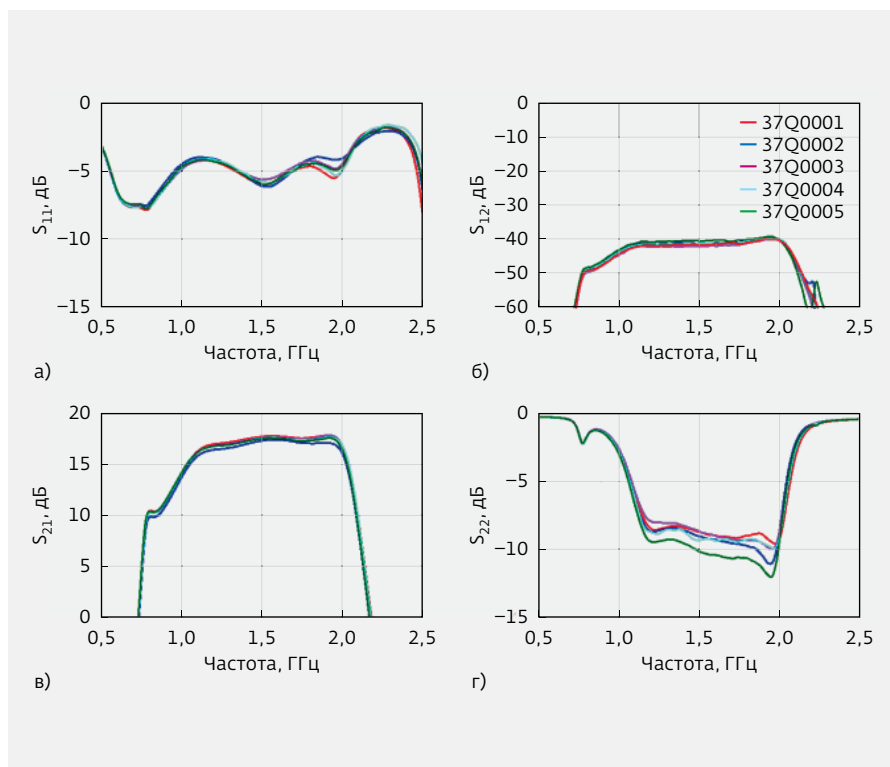


Рис.8. Измеренные S-параметры пяти УМ при температуре 25 °С: а -  $S_{11}$ , б -  $S_{12}$ , в -  $S_{21}$ , г -  $S_{22}$

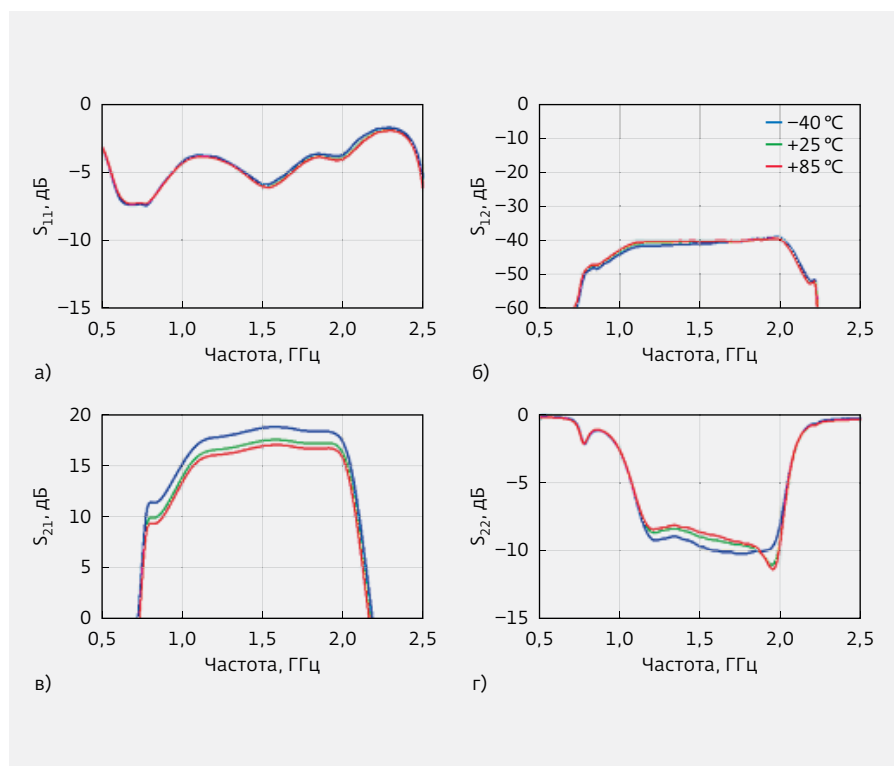


Рис.9. Измеренные S-параметры УМ для трех температур: а -  $S_{11}$ , б -  $S_{12}$ , в -  $S_{21}$ , г -  $S_{22}$

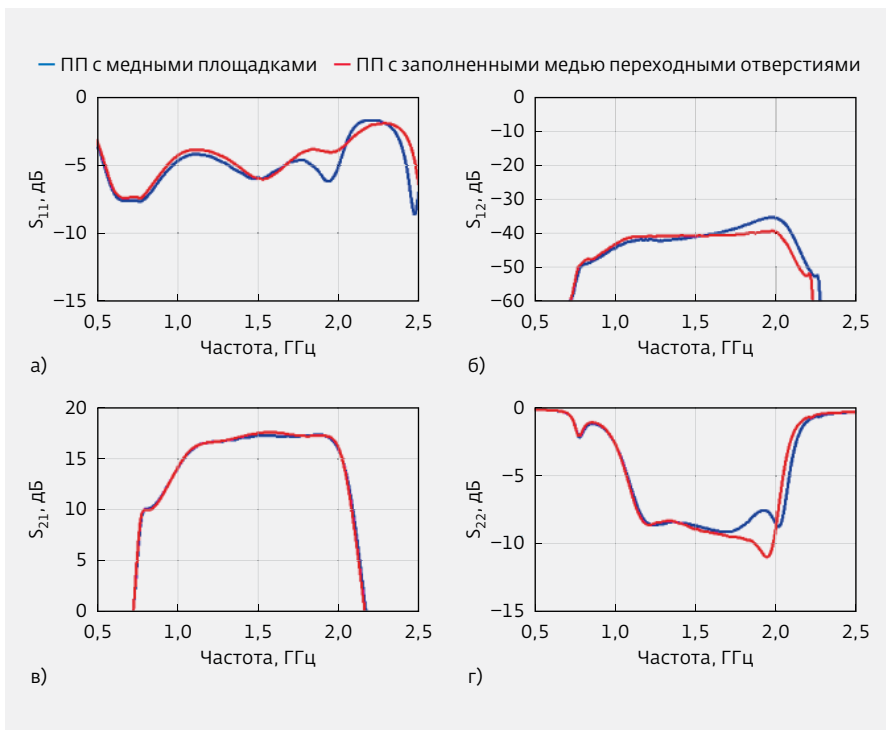
для работы УМ в точке компрессии 3 дБ.

Результаты моделирования при малом сигнале УМ показаны на рис.5. Видны широкая полоса пропускания и плоская характеристика коэффициента усиления в рабочем частотном диапазоне.

### Обеспечение теплового режима

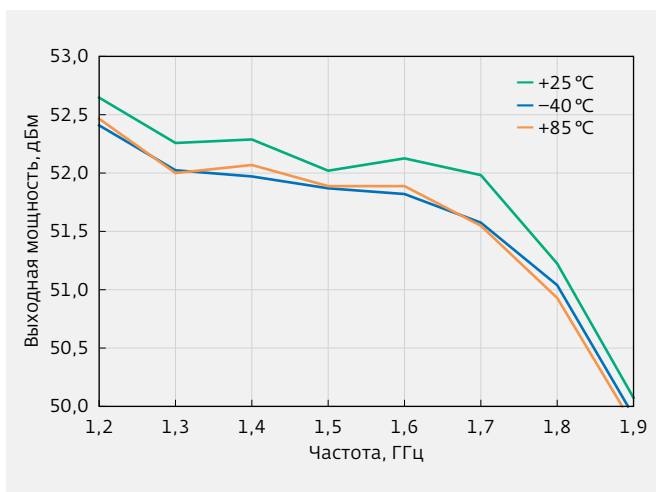
Нитрид галлия способен обеспечить более высокую плотность мощности, чем в устройствах типа LDMOS или на основе GaAs. Следовательно, рассеиваемая мощность должна быть эффективно отведена от корпуса, чтобы поддерживать низкую температуру перехода и обеспечить длительный срок службы транзистора.

Основная часть отводимого тепла проходит от кристалла транзистора через место его контакта с основанием корпуса в печатную плату. Для обеспечения хорошей



**Рис.10.** Сравнение S-параметров при использовании ПП с заполненными медью переходными отверстиями и с медными площадками: а -  $S_{11}$ , б -  $S_{12}$ , в -  $S_{21}$ , г -  $S_{22}$

передачи тепла в окружающую среду и поддержания температуры транзистора на достаточно низком уровне необходима тщательная разработка ПП. Были оценены два подхода, в одном используется массив заполненных медью переходных отверстий (показан на рис.бб), в другом – медные площадки, встроенные в печатную плату на этапе изготовления (на рис.ба).



**Рис.11.** Измеренная выходная мощность в точке компрессии 3 дБ ( $P_{3дБ}$ ) для трех температур

В обоих случаях печатная плата монтируется на алюминиевом основании.

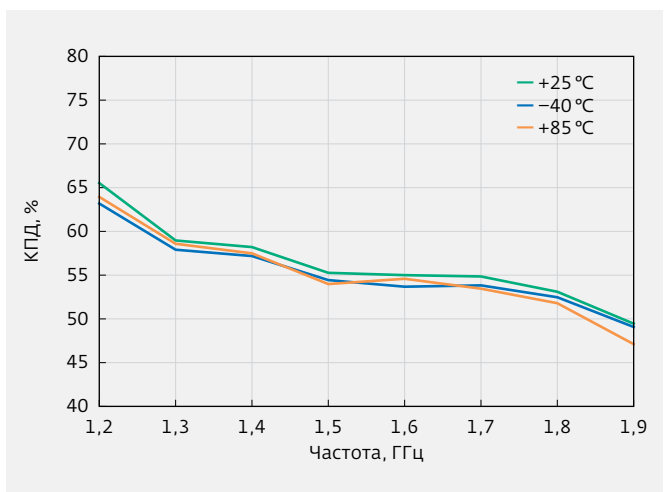
## РЕАЛИЗАЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Фотография одного из собранных усилителей мощности представлена на рис.7. Отверстие в передней части алюминиевого основания позволяет размещать термопару непосредственно под транзистором QPD1013.

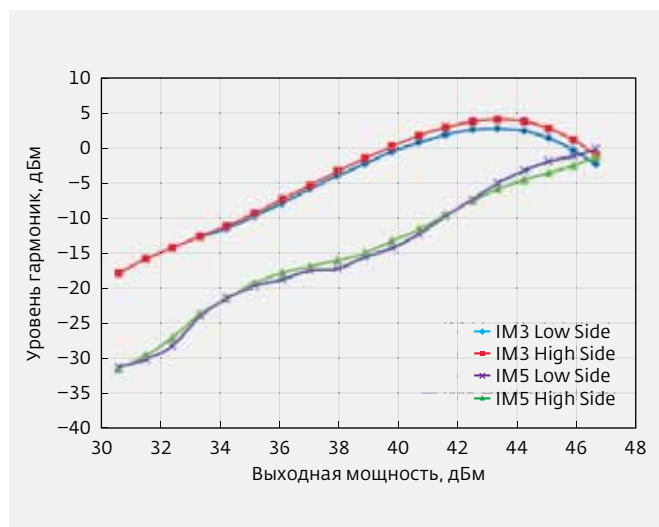
УМ были изготовлены с использованием как заполненных медью переходных отверстий, так и медных площадок на печатной плате. В обоих случаях измеренные радиочастотные характеристики были схожи; однако во втором варианте тепловые характеристики были лучше – рабочая температура транзистора оказалась ниже на 10 °С. Если не указано иное, результаты, представленные ниже, относятся к системе с заполненными медью переходными отверстиями.

## Измерения в режиме малого сигнала

S-параметры пяти УМ в режиме малого сигнала при 25 °С (температура основания транзистора) представлены на рис.8. Особо следует отметить равномерность усиления в рабочем диапазоне и хорошее совпадение результатов моделирования и измерений.



**Рис.12.** Измеренный КПД усилителя в точке компрессии 3 дБ при различных температурах



**Рис.13.** Продукты интермодуляции при воздействии двухтонового сигнала. IM3 Low Side и IM3 High Side – уровни гармоник 3-го порядка с частотами  $2f_1-f_2$  и  $2f_2-f_1$  соответственно; IM5 Low Side и IM5 High Side – уровни гармоник 5-го порядка с частотами  $3f_1-2f_2$  и  $3f_2-2f_1$  соответственно;  $f_1$  и  $f_2$  – частоты составляющих двухтонового сигнала

Малосигнальные параметры одного УМ при различной температуре показаны на рис.9. Измеренные значения параметра  $S_{21}$  на -1 дБ выше при -40 °С и на -0,5 дБ ниже при 85 °С по сравнению с измерениями при 25 °С.

Сравнение характеристик малого сигнала УМ с использованием заполненных медью переходных отверстий и медных площадок показано на рис.10. Как видно, СВЧ-характеристики схожи, что наблюдалось и в режиме большого сигнала.

### Измерения в режиме большого сигнала

Измерялась зависимость выходной мощности от частоты при различных температурах для нескольких УМ. Поведение усилителей от единицы к единице было схожим, а характеристики вариантов с ПП с заполненными медью переходными отверстиями были близки к таковым у вариантов с ПП с медными площадками. Типичные характеристики одного УМ при трех значениях температуры показаны на рис.11, где видно, что в верхней части рабочего диапазона обеспечивается мощность минимум 100 Вт, а в нижней – 160 Вт. На рис.12 представлен типичный КПД УМ – 55%, который включает в себя потери в выходной согласующей цепи и разъемах. Хотя КПД УМ впечатляет, рассеиваемая мощность может превышать 100 Вт, что подтверждает необходимость эффективного отвода тепла.

Характеристики усилителя в зависимости от частоты

Частота, ГГц	$P_{зdB}$ , дБм	$P_{зdB}$ , Вт	Коэффициент усиления в точке компрессии 3 дБ, дБ	КПД, %
1,2	52,61	182,39	13,11	65,56
1,4	52,17	164,82	14,03	58,70
1,6	51,95	156,68	13,63	55,28
1,8	51,30	134,90	14,27	52,94

Также измерялась интермодуляционная характеристика УМ при воздействии двухтонового сигнала. На рис.13 показан уровень гармоник 3-го (IM3) и 5-го (IM5) порядка для типичного усилителя в зависимости от выходной мощности. Уровень точки пересечения интермодуляции 3-го порядка по выходу (IP3) составляет около 60 дБм при полной выходной мощности сигнала 10 Вт (40 дБм).

Сводка основных параметров усилителя приведена в таблице.

В заключение можно отметить, что технические характеристики, достигнутые в рассмотренном УМ, позволяют использовать его в радарх L-диапазона, широкополосных телекоммуникациях и других приложениях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Smith R. M.H., Dearn A. W., Glynn S. F.** The Design of High Performance L-band GaN PAs Using Commercially Available Discrete Transistors, ARMMS Conference Nov. 2016. <http://www.plextekrfi.com/wp-content/uploads/Lband-Qorvo-GaN-PA-125W-PlextekRFI.pdf>
2. IMS Resistors Product Website: <https://www.ims-resistors.com/products/>