

# GaN-ТРАНЗИСТОРЫ MICROSEMI CORPORATION ДЛЯ ВЫСОКОНАДЕЖНЫХ СВЧ-РАЗРАБОТОК

Появление новых транзисторов, изготавливаемых на основе нитрида галлия и обладающих рекордными энергетическими показателями, привело к значительному улучшению параметров современного СВЧ-оборудования.

Одним из лидеров в производстве нитрид-галлиевых транзисторов является компания Microsemi, имеющая многолетний опыт разработки силовых высокочастотных компонентов. Компания, представившая первые серийно выпускаемые GaN-изделия еще в 2011 г., предлагает достаточно широкую линейку приборов, покрывающую L-, S-, и C-диапазоны частот и нашедшую применение преимущественно в радиолокационных станциях гражданского и военного назначения.

В данной статье проводится обзор ключевых характеристик и конструктивных особенностей GaN-транзисторов Microsemi.

## ВВЕДЕНИЕ

Можно отметить две основные тенденции развития электронной компонентной СВЧ-базы — повышение интеграции схем и совершенствование технологий производства, включающее применение новых широкозонных полупроводниковых материалов — карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN) [1]. Второе направление позволяет достичь революционных результатов благодаря увеличению максимальной мощности и уменьшению массы и габаритов итогового изделия. Транзисторы нового типа уже повсеместно внедряются как в узкополосные, так и в широкополосные устрой-

ства, наибольший вклад в увеличение серийного выпуска GaN-приборов вносит постоянно растущий спрос на рынке компонентов для радиолокационных систем (РЛС) на базе активных фазированных антенных решеток (АФАР).

Ключевым элементом АФАР является располагающийся непосредственно за элементарным излучателем антенны приемопередающий модуль (ППМ), включающий мощные транзисторы, от характеристик которых зависит функциональность и возможности модуля в целом. В состав АФАР должны входить несколько десятков тысяч ППМ для многолучевого сканирования в двух плоскостях [2]. Поэтому, поми-

мо габаритов и веса, при разработке радиолокаторов большое значение имеет цена транзисторов. Стоимость GaN-транзисторов в абсолютных величинах уже практически приблизилась к стоимости традиционно используемых LDMOS-транзисторов. Дальнейшее повышение спроса, прогнозируемое специалистами, приведет к соответствующему пропорциональному уменьшению затрат.

## ПРЕИМУЩЕСТВА GaN-on-SiC ТЕХНОЛОГИИ

GaN, являющийся наиболее перспективным широкозонным материалом, имеет ширину запрещенной зоны около 3,4 эВ, подвижность и скорость насыщения электронов около 2000 см<sup>2</sup>/(В·с) и (1,5–2,1)·10<sup>7</sup> см/с соответственно, теплопроводность — более 1,5 Вт/(см·К) (табл. 1). Его использование позволяет получать HEMT-структуры (High-Electron-Mobility Transistor — транзистор с высокой подвижностью электронов), обладающие рядом преимуществ. Рассмотрим их подробнее.

Большая ширина запрещенной зоны (в три раза больше, чем у кремния) обеспечивает высочайшую стабильность

Таблица 1. Сравнение свойств полупроводниковых материалов

Параметр	Si	GaAs	SiC	GaN	InP
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,11	1,43	3,2	3,4	1,35
Подвижность электронов, см <sup>2</sup> /(В·с)	1500	8500	700	2000	5000
Подвижность дырок, см <sup>2</sup> /В·с	450	350	120	300	–
Дрейфовая скорость насыщения электронов, ×10 <sup>7</sup> см/с	1	1,3–2,1	2	1,5–2,1	1,5
Теплопроводность, Вт/(см·К)	1,5	0,46	4,9	>1,5	0,7
Относительная диэлектрическая постоянная	11,9	12,5	10	9,5	–
Критическая напряженность электрического поля, ×10 <sup>3</sup> кВ/см	300	455	2200	3300	600

свойств при изменении температуры или воздействии радиации, что чрезвычайно важно, в первую очередь, для космической и военной электроники, а также для устройств, работающих в жестких условиях эксплуатации. Теоретически GaN-транзисторы должны сохранять работоспособность при температурах до +500 °С. На практике же в настоящее время максимальная температура стабильной работы подобных транзисторов не превышает +250 °С.

Транспортные электронные характеристики (скорость насыщения, подвижность зарядов, концентрация электронов) определяют частотные свойства материала. Сочетание высокой концентрации и подвижности электронов с большой шириной запрещенной зоны позволяет GaN-транзисторам достичь существенного снижения значения сопротивления канала во включенном состоянии. По сравнению, например, с кремниевыми приборами, в силовых транзисторах на основе GaN может быть достигнуто снижение значения  $R_{DS(on)}$  более чем на порядок в диапазоне напряжений пробоя 100–300 В. Эта особенность поможет GaN-транзисторам заменить Si- и даже SiC-транзисторы в силовых системах, где требуются приборы с высокими значениями рабочих токов и напряжениями 1000 В и выше. Кроме того, очень высокая концентрация электронов в области двумерного электронного газа дает возможность реализации большой плотности тока транзистора и высокого коэффициента усиления.

Высокая критическая напряженность электрического поля (в 10 раз больше, чем у кремния) дает потенциальную возможность реализовывать более высокие напряжения «сток–исток» на уровне 100–300 В, в отличие от 7–20 В у GaAs-транзисторов эквивалентной мощности, позволяют поднять рабочие напряжения до 50–100 В. В сочетании с высокой плотностью тока это обеспечивает удельную плотность мощности промышленных GaN-транзисторов 3–10 Вт на 1 мм ширины затвора (до 30 Вт/мм в лабораторных образцах), в несколько раз превышающую удельную выходную мощность GaAs- и Si-транзисторов (1 Вт/мм и 0,3 Вт/мм соответственно). Из этого следует, что, по сравнению с традиционными решениями, усилители на основе GaN могут гарантировать больше выходной мощности при одинаковых физических размерах, либо при одинаковой выходной мощности и коэффициенте усиления иметь меньшие габариты. Высокое значение напряжения питания также приводит к увеличению на порядок импеданса

Таблица 2. Сравнительные характеристики подложек для GaN транзисторов

Параметр	Si	Al2O3	SiC	AlN
Теплопроводность, Вт/(см·К)	1,5	0,42	4,9	3,0–3,4
Величина напряжения пробоя, МВ/см	0,3	0,4	2	1,2–1,8
Диэлектрическая постоянная	11,8	8,6	10	8,5
Несоогласованность кристаллической решетки с GaN, %	~ -17	~ -16	~ +3,5	2,4
Доступные размеры подложек, дюйм	12	6	4	4
Цена (относительно Si)	Низкая	Низкая	Высокая	Средняя
Сопротивление, Ом/см	$10^4$	$>10^6$	$10^5-10^8$	$10^7$
Тангенс диэлектрических потерь	$1 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$

нагрузки стока и значительному упрощению схемотехнического согласования транзистора.

Выбор подходящей подложки является ключом к эффективному использованию всех возможностей широкозонных полупроводников. Большие значения плотности мощности на единицу площади переходов GaN-транзисторов приводят к тому, что для устранения проблем с рассеиванием тепла, а также уменьшения сложности и стоимости систем охлаждения их необходимо выращивать на подложках с высокой теплопроводностью. Кроме того, подложки для GaN должны иметь минимальное расхождение с этим материалом по параметрам решетки и хорошие изолирующие свойства, обеспечивающие малые потери на высоких частотах. Большое значение имеет доступность и технологичность обработки, при этом диаметр подложки должен иметь достаточные размеры для обеспечения экономически эффективного массового производства. В табл. 2 представлены сравнительные характеристики современных подложек.

Подложки из кремния технологичны, поэтому очень перспективны с точки зрения экономичности производства. Они доступны, дешевы, характеризуются достаточно высокой теплопроводностью (до 1,5 Вт/(см·К)), не ограничены по диаметру пластин и легко поддаются обработке, что упрощает формирование в них сквозных отверстий. Но на кремниевых подложках сложно выращивать эпитаксиальные слои GaN. Это обусловлено сильным различием коэффициента теплового расширения и параметров решетки этих двух материалов. Подложки из  $Al_2O_3$  обладают очень низкой теплопроводностью (0,42 Вт/(см·К)) и значительным рассогласованием (16%) по постоянной решетке. Поэтому они, в основном, применяются при изготовлении маломощных приборов. Подложки из нитрида алюминия (AlN), хоть и уступают по теплопроводности SiC, благодаря соответствию кристаллических структур имеют хорошие перспективы

применения, особенно при устранении недостатков, мешающих крупномасштабному производству: высокой стоимости и повышенного количества дефектов пластин. SiC является наиболее привлекательным, хотя и дорогим материалом для подложек мощных GaN-транзисторов. Возможность выращивания гетероструктур AlGaIn/GaN на SiC-подложках, имеющих высокую теплопроводность, делают эту технологию оптимальной для мощных СВЧ-устройств. Единственным минусом является относительная дороговизна производства, определяемая сложностью обработки.

С учетом всех рассмотренных достоинств, компания Microsemi сделала выбор в пользу технологии GaN-on-SiC для построения своих мощных высокочастотных транзисторов.

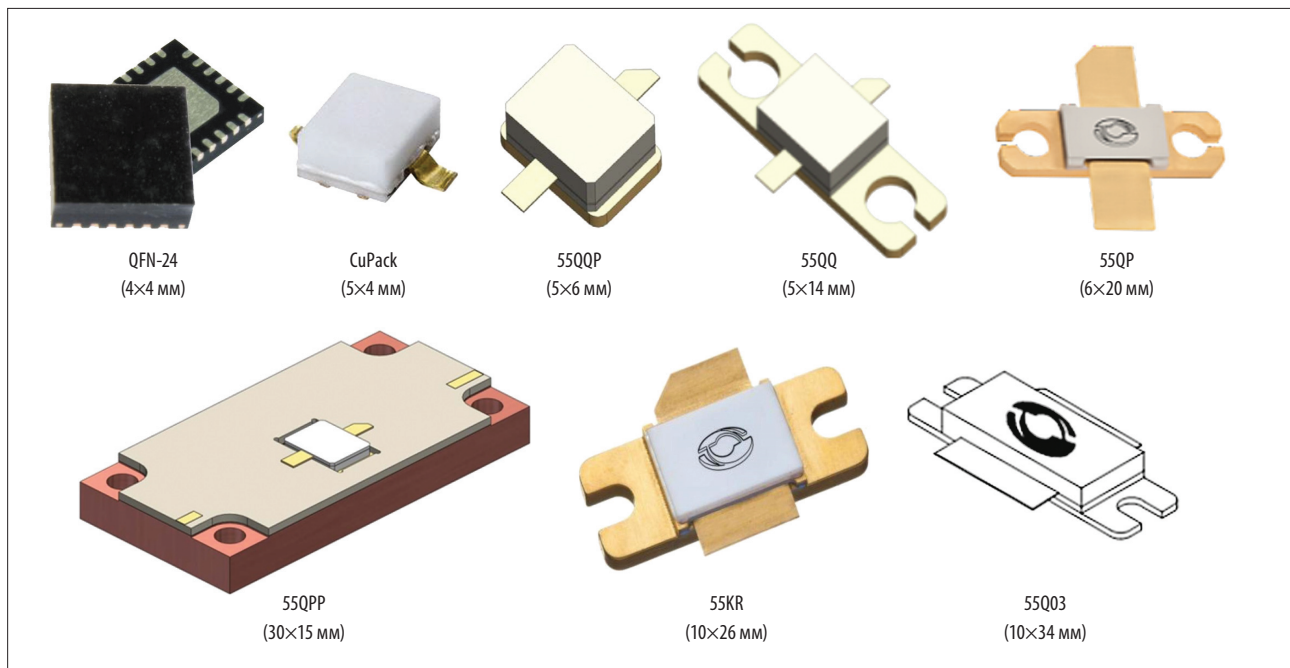
#### ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ GaN-ТРАНЗИСТОРОВ КОМПАНИИ MICROSEMI

В настоящее время Microsemi выпускает ряд высокочастотных дискретных устройств, выполненных на основе технологии GaN-on-SiC и обладающих описанными выше преимуществами широкозонных материалов [3]. Транзисторы компании существенно улучшают параметры усилителей, модуляторов и других ключевых узлов современных радиоэлектронных систем, в том числе спутниковой и мобильной связи, радиолокации, радионавигации, радиоастрономии и др. В качестве основных применений можно отметить следующие устройства наземной, судовой или авиационной электроники:

- дальнометры, диапазон рабочих частот 960–1215 МГц;
- системы опознавания «свой–чужой»;
- системы распределения общей тактической информации, диапазон частот 960–1215 МГц;
- радионавигационные системы ближнего действия, диапазон частот 960–1215 МГц;
- системы предотвращения столкновений воздушных судов, систе-

Таблица 3. Основные характеристики GaN-транзисторов Microsemi

Тип продукции	Наименование	Рабочая частота, ГГц	$P_{out}$ , Вт (мин.)	Напряжение питания, В	Длительность импульса, мкс	Коэф. заполнения, %	Коэф. усиления, дБ	КПД, % (тип.)	$\theta_{jc}$ , °C/Вт	Корпус
Планарные транзисторы общего назначения (DC – 3,5 ГГц)	DC35GN-15-Q4	0,3–0,5	15	50	CW	–	18,2	65	8,4	QFN 4x4
	DC35GN-15-Q4	0,96–1,215	15	50	1000	10	18,5	70	3,5	
	DC35GN-15-Q4	1,2–1,4	15	50	1000	10	18,2	70	3,5	
	DC35GN-15-Q4	2,7–3,1	15	50	1000	10	13	60	3,5	
	DC35GN-15-Q4	3,1–3,5	12	50	1000	10	10	50	3,5	
	DC35GN-15-Q4	2,45	15	50	CW	–	14	60	8,4	
	0510GN-25-CP	0,05–1,0	20	50	CW	–	16	50	1,2	CuPack
Транзисторы общего назначения (L-диапазон)	0912GN-15E/EL/EP	0,96–1,215	15	50	128	10	17,8	65	8,4	55Q0, 55Q0P, 55Q0P
	0912GN-120E/EL/EP	0,96–1,215	120	50	128	10	17	65	1,2	
	1011GN-125E/EL/EP	1,03/1,09	125	50	128	10	18,7	72	1,4	
	1011GN-250E/EL/EP	1,03/1,09	250	50	128	10	20	68	0,7	
	1014GN-100E/EL/EP	1,0–1,4	100	50	300	10	17	65	1,4	
	1214GN-15E/EL/EP	1,2–1,4	15	50	5000	30	17,8	68	8,0	
	1214GN-120E/EL/EP	1,2–1,4	120	50	300	10	18,4	65	1,4	
1416GN-120E/EL/EP	1,4–1,6	120	50	300	10	18	65	1,4		
Транзисторы авиационного назначения (L-диапазон)	MDSGN-750ELMV	1,03–1,09	750	50	ELM	6	19	70	0,24	55KR
	1011GN-100V	1,03–1,09	100	50	ELM	6	19	68	1,7	55QP
	1011GN-1000V	1,03–1,09	1000	50	32	2	19	75	0,16	55Q03
	1011GN-1200V	1,03–1,09	1200	50	32	2	20,1	75	0,14	
	1012GN-800V	1,025–1,150	800	50	20	6	19	60	0,16	55KR
	0912GN-300V	0,96–1,215	300	50	128	10	17	55	0,28	
	0912GN-650V	0,96–1,215	650	50	128	10	17	60	0,16	
Транзисторы для активных РЛС (L-диапазон)	1214GN-550V	1,2–1,4	550	50	300	10	17	60	0,21	55KR
	1214GN-600VHE	1,2–1,4	600	50	300	10	17	65	0,23	
	1214GN-650V	1,2–1,4	650	50	150	10	17	65	0,23	
	1214GN-750V	1,2–1,4	750	50	300	10	16	65	0,25	55Q03
	1315GN-700V	1,3–1,47	700	50	150	10	17	68	0,28	55KR
	1416GN-600V	1,4–1,6	600	50	300	10	17	65	0,28	
	1214GN-180LV	1,2–1,4	180	50	3000	3	17	52	0,73	
	1214GN-280LV	1,2–1,4	280	50	200	2	17	65	0,45	
1214GN-400LV	1,2–1,4	400	50	4000	3	16	65	0,30		
Транзисторы для активных РЛС (S-диапазон; 2,7–2,9 ГГц)	2729GN-150V	2,7–2,9	150	50	100	10	16,2	69	0,91	55QP
	2729GN-270V	2,7–2,9	270	50	100	10	15,6	68	0,50	
	2729GN-380V	2,7–2,9	380	50	100	10	14,2	64	0,28	
	2729GN-500V	2,7–2,9	500	50	100	10	14	64	0,18	
Транзисторы для активных РЛС (S-диапазон; 2,7–3,1 ГГц)	2731GN-120V	2,7–3,1	120	50	200	10	16,5	64	1,13	55QP
	2731GN-220V	2,7–3,1	220	50	200	10	16	65	0,33	
	2731GN-280LV	2,7–3,1	280	50	200	15	15,4	60	0,37	
	2731GN-400V	2,7–3,1	400	50	200	10	14	55	0,18	
Транзисторы для активных РЛС (S-диапазон; 3,1–3,5 ГГц)	3135GN-120V	3,1–3,5	120	50	200	10	17,8	65	1,14	55QP
	3135GN-200V	3,1–3,5	200	50	200	10	14,5	58	0,56	
	3135GN-280LV	3,1–3,5	280	50	200	20	13,8	60	0,39	
	3135GN-400V	3,1–3,5	400	50	200	10	14	50	0,30	
Транзисторы для активных РЛС и систем связи (C-диапазон)	3942GN-120V	3,9–4,2	120	50	200	10	15,2	62	0,92	55QP
	4450GN-110V	4,4–5,0	110	50	200	10	12,8	65	0,98	
	5359GN-70V	5,3–5,9	70	50	200	10	11	42	0,55	
	5359GN-120V	5,3–5,9	120	50	200	10	11	40	0,55	



▲ Рис. 1. Типовые корпуса GaN-транзисторов Microsemi

мы диспетчеризации, частоты 1030 и 1090 МГц;

- авиационные РЛС опроса самолетов с выборочным и адресным опросом;
- ответчики и опросные устройства, частоты 1030 и 1090 МГц.

Универсальные корпусные транзисторы поставляются в малогабаритных металлокерамических фланцевых или SMD-корпусах, имеющих относительно малые паразитные емкости. Их внешний вид представлен на рис. 1.

Для каждого отдельного применения выпускаются транзисторы на различную мощность — от самой минимальной (десятки ватт) до максимальной (более тысячи ватт). Мощные транзисторы выгоднее применять там, где необходимы минимальные размеры и вес, заменяя одним транзисторным каскадом несколько маломощных каскадов. Для упрощения выбора подходящего элемента все предлагаемые изделия объединены в отдельные группы в зависимости от назначения (табл. 3).

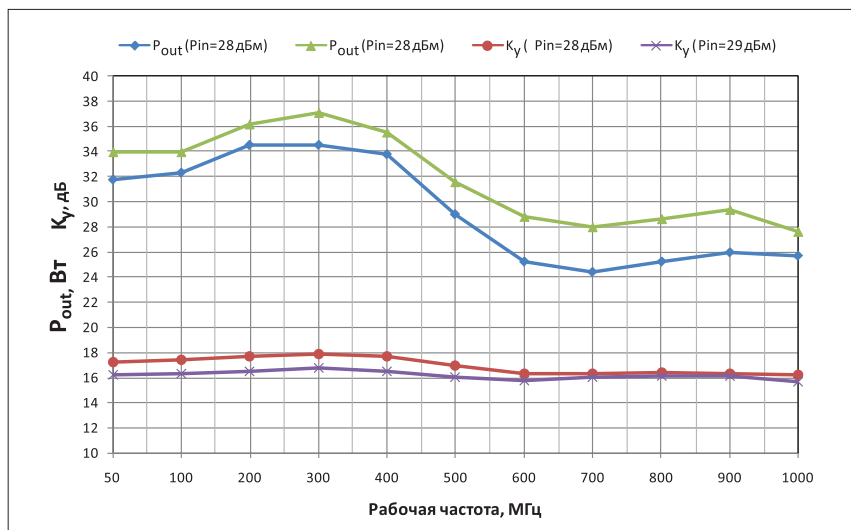
Универсальные HEMT-транзисторы DC35GN-15-Q4 с несколькими диапазонами рабочих частот (вплоть до 3,5 ГГц) предназначены для работы в широкополосных схемах класса АВ с общим истоком, функционирующих в импульсном и непрерывном (CW) режимах [4]. Выходная мощность составляет не менее 12–15 Вт (на частоте 1,4 ГГц), коэффициент усиления от 10 до 18,5 дБ, а пробивное напряжение «сток–исток» 125 В. Данные компоненты активно используются в импульсных радарах, бортовой авиационной радиоэлектронике, а также в нелицензируемом оборудо-

вании ISM-диапазонов. Транзисторы DC35GN-15-Q4 доступны в бюджетных корпусах стандартного форм-фактора QFN с размерами 4×4 мм и шагом выводов 0,5 мм. Они изготавливаются на медном основании, обладают высокой удельной теплопроводностью и имеют диапазон температур хранения –55...+125 °С. Для оценки рабочих характеристик предлагаются демонстрационные платы с необходимой пассивной обвязкой, рассчитанной на соответствующие частотные диапазоны.

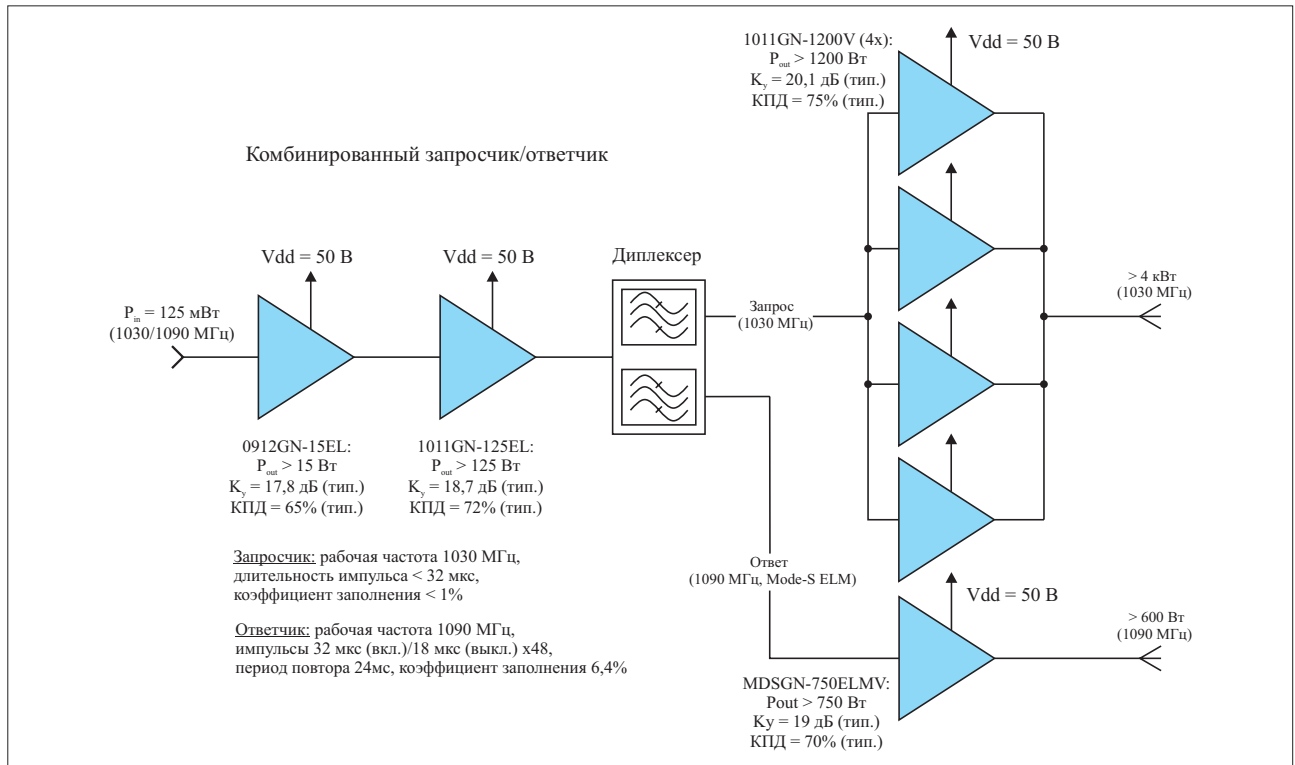
0510GN-25-CP — транзистор общего назначения, его главные отличительные особенности — минимальные габариты и широкий диапазон рабочих частот (от 50 МГц до 1 ГГц). Он производится в металлокерамическом корпусе для поверхностного монтажа CuPack с внеш-

ними габаритами 5×4 мм (без учета выводов). Обладающий высокой пиковой выходной мощностью, достигающей в импульсном режиме 31 Вт (на частоте 1 ГГц), и хорошим коэффициентом усиления, данный компонент оптимально подходит для различных промышленных и военных применений [5]. На рис. 2 приведены типовые частотные характеристики 0510GN-25-CP для двух значений входных сигналов.

Самой обширной группой GaN-транзисторов Microsemi являются транзисторы L-диапазона (1–2 ГГц). Все 24 модели, отличающиеся превосходной производительностью и активно используемые в СВЧ-электронике, подразделяются на три отдельные подгруппы: помимо устройств общего назначения номенклатура изделий включает в себя



▲ Рис. 2. Зависимость выходной мощности и коэффициента усиления от рабочей частоты для транзистора 0510GN-25-CP



▲ **Рис. 3.** Пример использования транзисторов 1011GN-1200V

транзисторы для бортовой авиационной или судовой аппаратуры, а также для РЛС наземного базирования. При производстве транзисторов данного частотного диапазона Microsemi использует металлокерамические корпуса с позолоченными выводами, хорошо подходящие для устройств повышенной мощности. Применение керамики позволяет герметизировать корпус и защитить кристалл от агрессивных условий окружающей среды, а также обеспечить надежное функционирование при максимальных нагрузках и пиковых мощностях.

Каждый транзистор общего назначения имеет три модификации, отличающиеся вариантами корпусного исполнения. На конкретный тип указывает суффикс в наименовании: букве E соответствует корпус 55QQ с фланцами для болтовых креплений, буквам EL — 55QQR с контактами под пайку, а EP — 55QPP. Последний вариант представляет собой так называемую палету (готовый усилительный модуль, согласованной по входу и выходу на 50 Ом) с внешними габаритами 3,0×1,5×0,4 см. Использование палет, легко интегрируемых в состав проектируемой системы, позволяет получить законченное решение, существенно снижающее нагрузку на разработчика ВЧ-части, и сосредоточиться на схемотехнических задачах более высокого уровня. Малоомные транзисторы (15 Вт), рекомендуемые для предварительных каскадов усилителей мощно-

сти, представлены двумя компонентами: 0912GN-15 и 1214GN-15. Более мощные транзисторы (120–250 Вт) позиционируются для выходных каскадов приемопередатчиков. Они могут работать с длительностью модулирующего импульса до 5000 мкс при коэффициенте заполнения 30%, имеют достаточно маленькое температурное сопротивление «кристалл–корпус» (от 0,7 °C/Вт) и типовой КПД стока 65–72%.

Транзисторы авиационного назначения с рабочими частотами в субгигагерцовом диапазоне отличаются повышенными значениями выходной мощности, достигающей 1200 Вт у 1011GN-1200V. Например, радиочастотный транзистор MDSGN-750ELMV разработан для создания радиолокационного оборудования предотвращения столкновений самолетов в воздухе [6]. Его целевым назначением являются вторичные радары наблюдения (обзорные РЛС с активным ответом), применяемые в соответствии с международными стандартами для опроса и идентификации самолетов непосредственно вблизи аэропортов. MDSGN-750ELMV позволяет получить коэффициент усиления 18,5 дБ при работе на частотах 1030/1090 МГц, обеспечивая не менее 750 Вт пиковой мощности при напряжении стока +50 В. Рекомендуемый режим работы — импульсный, в соответствии с протоколом передачи удлиненных сообщений (ELM). Формат сообщений следующий:

- посылка из 48 импульсов — 32 мкс (вкл.)/18 мкс (выкл.);
- период повтора посылок — 24 мс;
- коэффициент заполнения — 6,4%.

Данный транзистор доступен в герметичном корпусе 55KR, обеспечивающем максимальный уровень долгосрочной надежности и отличную механическую прочность конструкции.

Старшие представители линейки — HEMT-транзисторы 1011GN-1000V и 1011GN-1200V, функционирующие на аналогичных рабочих частотах, характеризуются максимальным КПД (75%) и низким значением температурного сопротивления: 0,16 и 0,14 °C/Вт соответственно. Они предназначены для усиления и передачи короткоимпульсных сигналов с длительностью импульсов 32 мкс и коэффициентом заполнения 2%. Конструктивно они выполнены в компактных корпусах 55Q03, пример их применения показан на рис. 3.

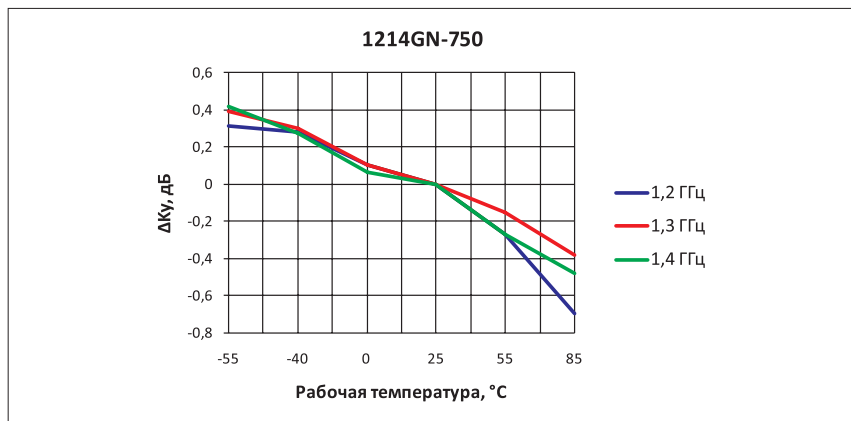
Группа транзисторов, позиционируемых для применения в активных РЛС L-диапазона, включает девять моделей с рабочими частотами 1,2–1,6 ГГц и мощностью 180–750 Вт. Транзисторы, внутренне согласованные с целью получения оптимального уровня рабочих характеристик, обеспечивают примерно одинаковое усиление (16–17 дБ) при различных значениях длительности импульса и коэффициента заполнения, при этом коэффициент усиления слабо зависит

от изменения температуры эксплуатации (рис. 4). Пробивное напряжение «сток–исток» ( $V_{DSS}$ ) составляет 150 В, напряжение «затвор–исток» ( $V_{GS}$ ) лежит в пределах от  $-8$  до 0 В.

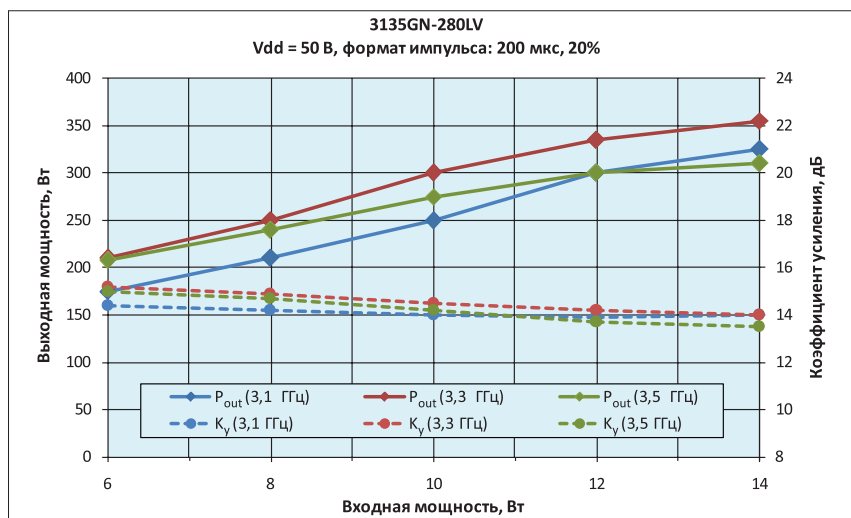
Силовые ВЧ-транзисторы Microsemi для радиолокационных применений S-диапазона подразделяются на три группы в зависимости от полос рабочих частот: 2,7–2,9; 2,7–3,1 и 3,1–3,5 ГГц. Различные модели, рассчитанные на максимальную мощность 120–400 Вт, работают с импульсами длительностью 100–200 мкс и коэффициентами заполнения 10–20%. При напряжении питания +50 В они гарантируют коэффициент усиления до 17,8 дБ и КПД стока до 69%. Зависимости усиления и выходной мощности от входной для определенных рабочих частот показаны на рис. 5 на примере транзистора 3135GN-280LV [7].

Следующие устройства относятся к новинкам компании. Группа мощных транзисторов, рекомендуемая для применения в активных РЛС и системах связи С-диапазона, насчитывает в настоящее время четыре компонента: 3942GN-120V, 4450GN-110V, 5359GN-70V и 5359GN-120V. Все транзисторы данной группы, способные функционировать в нескольких частотных диапазонах (3,9–4,2; 4,4–5,0 или 5,3–5,9), выполнены во французских корпусах 55QP с внешними габаритами 6×20 мм и тепловым сопротивлением от 0,55 до 0,98 °C/Вт.

Напоследок стоит отметить недостаток GaN-транзисторов, а именно некоторую сложность типовой схемы коммутации. С этим приходится сталкиваться в процессе разработки СВЧ-оборудования, но при выполнении определенных правил этот недостаток превращается в особенность применения. Так как транзисторы работают в обедненном режиме, то для их включения необходимо отрицательное смещение. Проектирование цепей смещения для транзисторов в таком режиме не является простой задачей, но компания–производитель предлагает проверенные и испытанные на практике решения. Также важно помнить о правильной последовательности подачи напряжения смещения и питания стока. Вначале генерируется импульсное напряжение затвора, затем, через определенную задержку, подается напряжение стока. Импульсный генератор, используемый для данных целей, а также необходимые входные и выходные ВЧ-цепи согласования входят в состав демонстрационных плат, доступных практически для каждого транзистора. Более подробно ознакомиться с необходимыми для нормальной работы схемотехническими приемами можно в [8].



▲ Рис. 4. Зависимость изменения коэффициента усиления от рабочей температуры для транзистора 1214GN-750V



▲ Рис. 5. Зависимости коэффициента усиления и выходной мощности от входной мощности для транзистора 3135GN-280LV

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

GaN — перспективный полупроводниковый материал, имеющий высокую критическую напряженность электрического поля, широкую запрещенную зону, отличную подвижность и скорость насыщения электронов. SiC выгодно отличается превосходной теплопроводностью. Совместное применение данных материалов позволяет получить высокоэффективные приборы с рекордными энергетическими характеристиками. Современные GaN-транзисторы с подложкой из SiC, выпускаемые компанией Microsemi, обладают большим коэффициентом усиления, более высокой плотностью мощности на единицу ширины затвора по сравнению с транзисторами на Si, GaAs или на любом другом, освоенном в производстве, материале, и, как следствие, значительно уменьшенными габаритами. Надежные в условиях повышенных температур и наличия радиации, они широко используются в усилительных каскадах оборудования авиационного, космического и военного назначения, беспроводных сетях, радиолокационных комплексах и во многих других приложениях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Кузьмин. Тенденции развития СВЧ-электроники для широкополосных применений. // Вестник электроники. 2015. № 1.
2. Р. Ю. Малахов, Е. М. Добычина. Мощные транзисторы для передатчиков бортовых радиолокационных систем. // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 186.
3. RF/Microwave GaN power transistors. Selection Guide. November, 2016. microsemi.com.
4. DC35GN-15-Q4. Datasheet, rev. 5.0. May, 2015. www.microsemi.com/document-portal/doc\_download/136023-dc35gn-15-q4
5. 0510GN-25-CP. Datasheet, rev. 2.0. June, 2015. www.microsemi.com/document-portal/doc\_download/136025-0510gn-25-cp
6. MDSGN-750ELMV. Datasheet, rev. 1.0. July, 2013. www.microsemi.com/document-portal/doc\_download/132805-mdsgn-750elmv-datasheet
7. 3135GN-280LV. Datasheet, rev. 1.0. November, 2014. www.microsemi.com/document-portal/doc\_download/135076-3135gn-280lv
8. С. Кузьмин. Работа мощных GaN транзисторов Microsemi в импульсном режиме. // Вестник электроники. 2013. № 4.