

# Новые возможности с транзисторами на основе GaN компании Microsemi

Константин ВЕРХУЛЕВСКИЙ  
info@icquest.ru

**В статье приведен обзор перспективных разработок компании Microsemi в области высокочастотных силовых транзисторов на основе нитрида галлия. Отдельное внимание уделено сравнению характеристик полупроводниковых материалов, применяемых при изготовлении современных транзисторов.**

## Краткий исторический экскурс

Применение нитрида галлия в качестве материала для изготовления транзисторов началось относительно недавно. Первые демонстрации эффективных транзисторных гетероструктур AlGaIn/GaN, выявляющие их основные преимущества и перспективы, относятся к началу 1990-х гг. Чуть позже появляются первые образцы компонентов, одновременно формируются и начинают выполняться военные и государственные программы развития данного направления. В то же время практически все ведущие мировые электронные компании, так или иначе связанные с производством компонентов на основе GaAs и Si, начинают собственные инвестиции в технологию GaN-приборов. Эти инвестиции приносят свои плоды, и в 2006–2007 гг. анонсируются, а затем и появляются на рынке реальные коммерческие GaN-продукты: корпусированные мощные транзисторы в диапазоне частот 2–4 ГГц с выходной мощностью 5–50 Вт (несколько позднее до 120–180 Вт). Пионерами выхода на коммерческий рынок стали компании Eudyna, Nitronex, Cree и RFMIC, чуть позднее к ним присоединятся Toshiba, RFMD, TriQuint, OKI, NXP и ряд других фирм [1].

## Преимущества использования GaN-технологии изготовления транзисторов

Учитывая современные требования, в последние годы заметно активизировались исследования широкозонных полупроводников (карбида кремния, нитрида галлия, нитрида алюминия и др.) и приборов на их основе. Уникальные свойства этих полупроводниковых материалов (большая ширина запрещенной зоны, высокие значения подвижности носителей заряда и их скоростей насыщения, большие коэффициенты теплопроводности и т. д.) обеспечивают соз-

дание на их основе приборов с рекордными значениями мощности, напряжения и тока. Интенсивные исследования в области разработок полевых транзисторов на основе GaN, активно поддерживаемые военными, позволили создать промышленные образцы приборов с рекордными значениями мощности, которые предполагается использовать в современных системах связи, оборонных и космических применениях.

Наиболее перспективным широкозонным материалом в настоящее время является нитрид галлия, имеющий ширину запрещенной зоны около 3,5 эВ, подвижность и скорость насыщения электронов около 2000 см<sup>2</sup>/В·с и 2,7×10<sup>7</sup> см/с, теплопроводность более 1,5 Вт/м·К [2]. Отметим далее физические свойства широкозонных полупроводниковых соединений в общем, и GaN в частности, позволяющие добиться реального улучшения характеристик приборов по сравнению с традиционными кремнием и арсенидом галлия (табл. 1).

**Таблица 1.** Сравнение свойств полупроводниковых материалов

Характеристики материала	Si	GaAs	SiC	GaN
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,1	1,4	3,2	3,5
Критическая напряженность электрического поля, ×10 <sup>6</sup> В/см	0,3	0,4	3	3,3
Теплопроводность, Вт/м·К	1,5	0,5	4,9	>1,5
Подвижность электронов, см <sup>2</sup> /В·с	1350	8500	700	2000
Дрейфовая скорость насыщения электронов, ×10 <sup>7</sup> см/с	1	2	2	2,7

Максимальная ширина запрещенной зоны (в три раза больше, чем при кремниевой технологии) обуславливает возможность работы транзистора при высоких уровнях температуры и радиации. Теоретически транзисторы на основе GaN с шириной запрещенной зоны 3,5 эВ должны сохранять работоспособность при температурах до +500 °С. На практике же в настоящее время максимальная температура стабильной работы транзисто-

ров, изготовленных на подложках из карбида кремния, составляет более +200 °С. Фирма Nitronex, приложившая огромные усилия по коммерциализации GaN-транзисторов на более дешевых, но менее теплопроводных кремниевых подложках (по сравнению с SiC), провела серию тестов этих устройств на надежность. Испытания 45 приборов компании (ширина затвора W<sub>з</sub> = 16 мм, V<sub>си раб.</sub> = 28 В) в течение 1500 ч при температуре +200 °С показали, что они могут работать с обычным воздушным охлаждением. По мере совершенствования качества эпитаксиальных структур и технологии производства рабочая температура GaN-транзисторов должна быть увеличена до +350...+400 °С [3].

Рекордная удельная плотность мощности — одно из самых выдающихся достижений в области создания ВЧ GaN-компонентов нового поколения. Максимальная критическая напряженность электрического поля (в 10 раз большая, чем у кремния) позволяет реализовать пробивные напряжения в 100–300 В и поднять рабочее напряжение стока до 50–100 В, что в сочетании с высокой плотностью тока обеспечивает удельную выходную мощность промышленных GaN-транзисторов 3–10 Вт на 1 мм ширины затвора (до 30 Вт/мм в лабораторных образцах). Эти показатели на порядок превышают удельную выходную мощность GaAs-транзисторов. Высокое напряжение питания стока приводит к увеличению на порядок импеданса нагрузки стока и значительному облегчению согласования транзистора с нагрузкой.

За счет существенно большей теплопроводности как эпитаксиальных пленок, так и подложки-носителя, а также за счет втрое большей ширины запрещенной зоны в транзисторах на основе нитрида галлия достигаются большие значения мощности от одного компонента, при этом уменьшаются размеры конечных изделий и устраняется необходимость применения систем охлаждения.

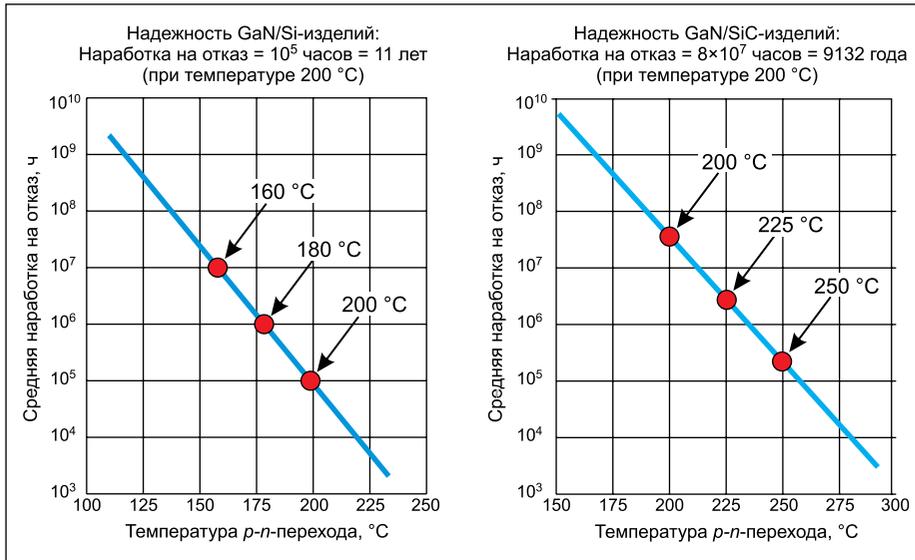


Рис. 1. Надежность изделий на основе GaN/Si и GaN/SiC

Сочетание высокой концентрации электронов проводимости, высокой подвижности электронов и большей ширины запрещенной зоны дает возможность GaN-транзисторам достичь существенного снижения значения сопротивления канала во включенном состоянии. По сравнению с кремниевыми приборами в силовых транзисторах на основе GaN может быть достигнуто снижение более чем на порядок значения  $R_{DS(on)}$  в диапазоне напряжений пробоя 100–300 В. Это позволит 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. Применение GaN-транзисторов позволит уменьшить потребление энергии в системах запуска электродвигателей, защиты электросетей от перегрузок и неожиданных отключений. Кроме того, очень высокая концентрация электронов в области двумерного электронного газа в сочетании с приемлемой подвижностью электронов позволяет реализовать большую плотность тока транзистора и высокий коэффициент усиления.

Приведенные параметры приборов на GaN хотя и значительны, но не предельны. Это обусловлено как недостатками материалов подложки, так и несовершенством выращиваемых на них эпитаксиальных структур. Подложки для GaN должны иметь минимальное расхождение с нитридом галлия по параметрам решетки, достаточную теплопроводность для снятия тепловых ограничений и хорошие изолирующие свойства, обеспечивающие малые потери на высоких частотах [4]. Кроме того, они должны быть доступны и технологичны в обработке, а диаметр подложек — достаточно большим, чтобы обеспечить экономически эффективное массовое производство. И, наконец, они должны быть достаточно дешевыми.

Сегодня наиболее полно этим требованиям отвечают подложки из  $Al_2O_3$ , SiC и Si. Однако рассогласование по постоянной решетки подложки  $Al_2O_3$  и GaN велико (14%). К тому же теплопроводность  $Al_2O_3$ -подложек очень низкая (0,33 Вт/м·К), поэтому они в основном применяются при изготовлении маломощных приборов. Подложки из кремния технологичны и, таким образом, очень перспективны с точки зрения экономичности производства. Они доступны, дешевы, характеризуются достаточно высокой теплопроводностью (1,5 Вт/м·К), не ограничены по диаметру пластин и легко поддаются утоньшению, что упрощает формирование в них сквозных отверстий. Но на кремниевых подложках достаточно сложно выращивать эпитаксиальные слои GaN. Это обусловлено сильным различием коэффициента теплового расширения и параметров решетки этих двух материалов. Подложки из монокристаллического SiC отвечают большинству перечисленных требований. Единственным минусом является относительная дороговизна производства и сложность в обработке. Но для решений, в которых определяющее значение имеет долговременная надежность и высокое качество, несомненно, это лучший выбор (рис. 1).

Для начала серийного производства полупроводниковых приборов на основе GaN ведущим компаниям в области твердотельной СВЧ-электроники необходимо было решить ряд проблемных моментов. Среди важнейших требований — воспроизводимость с высоким коэффициентом выхода годных изделий, долговременная стабильность параметров в заданных эксплуатационных условиях, а также относительно невысокая себестоимость. Эти параметры GaN-приборов зависят от многих факторов: структуры и уровней легирования эпитаксиальных слоев, топологии транзистора, состава слоев ме-

таллизации, типа подложки и ее теплопроводности, параметров корпуса и т. д. Появление за последние пару лет разнообразной серийной продукции говорит о том, что большинство преград так или иначе преодолено, и перед полупроводниковыми приборами на основе нитрида галлия открываются широкие производственные перспективы. Предполагаемый коммерческий успех связан с такими преимуществами GaN, как:

- простота и дешевизна схмотехнической реализации;
- простота получения широких полос усиления, перекрытие одним мощным транзистором нескольких частотных диапазонов;
- снижение энергопотребления и связанных с ним издержек;
- уменьшение сложности и стоимости систем охлаждения.

### Транзисторы на основе GaN компании Microsemi

Компания Microsemi является разработчиком полупроводниковых приборов, специализирующимся в области производства высоконадежных силовых дискретных устройств, модулей и интегральных схем. Подразделение транзисторных решений разрабатывает, производит и поставляет мощные радиочастотные и микроволновые транзисторы и сборки с рабочим диапазоном частот от 10 МГц до 3,5 ГГц и выходной мощностью 10–2000 Вт. При изготовлении используются кремниевый, SiC и GaN технологические процессы. Разработки Microsemi сфокусированы в основном на мощных системах бортового, наземного и судового оборудования, в частности на радарных комплексах УВЧ-, L- и S-диапазонов (табл. 2).

Таблица 2. Диапазоны работы радарных комплексов и характеристики доступных транзисторов компании Microsemi

Диапазон	Рабочие частоты, МГц	Класс работы	Мощность, Вт
ВЧ	150–250	A/B	2200
УВЧ	400–450	A/B	2200
P	870–1000	C	300
L	1200–1400	C	370
L+	1480–1650	C	250
S	2700–3100	C	110
	3100–3400	C	100

Современные тенденции в развитии радарных технологий требуют от разработчиков увеличения:

- дальности работы путем повышения выходной мощности радара;
- длительности импульса, с целью увеличения информативности ответа;
- плотности мощности для уменьшения габаритов усилителя.

Одним из наиболее перспективных способов достижения требуемых характеристик является переход от изделий на базе крем-

**Таблица 3.** GaN-транзисторы Microsemi для S-диапазона

Транзистор	Диапазон рабочих частот, ГГц	Форма импульса, мкс/%	Мощность, Вт	Коэффициент усиления, дБ	Тепловое сопротивление, °C/Вт	Напряжение пробоя сток-исток, В
2729GN-150	2,7–2,9	100/10	160	14	1,1	250
2729GN-270			280		0,6	
2731GN-110	2,7–3,1	200/10	120	12	1,1	
2731GN-200			220		0,6	
3135GN-100	3,1–3,5	300/10	115	12	1,1	
3135GN-170			180		0,6	
2735GN-35	2,7–3,5	300/10	30	11	2,4	
2735GN-100			100		1,1	

ниевой и GaAs-технологий к устройствам, выпускаемым на основе материалов с широкой запрещенной зоной SiC и GaN, что и обеспечивает продукция Microsemi.

С целью увеличения долговременной надежности изделий GaN-транзисторы выполняются на SiC-подложке, преимущества которой были отмечены выше. На текущий момент предлагаемая линейка силовых ВЧ-транзисторов, использующая преимущества технологии GaN/SiC, состоит из восьми компонентов (табл. 3). Новые транзисторы обеспечивают самую высокую в промышленности импульсную мощность и коэффициент усиления и позиционируются для применения в радарных системах с частотным диапазоном 2,7–3,5 ГГц [5].

Для каждого из частотных диапазонов компанией Microsemi выпускается по два транзистора, отличающихся номинальной мощностью. Кроме того, доступны широкополосные модели, позиционируемые для использования в системах управления воздушным движением (рис. 2).

Напряжение пробоя транзисторов GaN/SiC превышает 250 В, что позволяет работать со смещением стока в 60 В, обеспечивая значительно более высокую надежность устройства по сравнению с транзисторами, произведенными по LDMOS-технологии. Большее напряжение смещения стока увеличивает пиковую выходную мощность, а более удобные в использовании значения импеданса устройства упрощают согласование во всем рабочем частотном диапазоне. Нитрид-галлиевые транзисторы Microsemi имеют коэффициент усиления до 14 дБ, ширину полосы рабочих частот до 800 МГц и максимальную температуру эксплуатации +200 °C.

Для применений, работающих в частотных диапазонах до 20 ГГц, материалы GaN/SiC с большой шириной запрещенной зоны позволяют уменьшить физические размеры систем. Например, одно устройство 2729GN-270 заменяет традиционную трехкаскадную усилительную схему на основе кремниевых транзисторов, которая включает в себя транзистор-драйвер и усилительную паллету с двумя 150-Вт транзисторами (рис. 3). Это

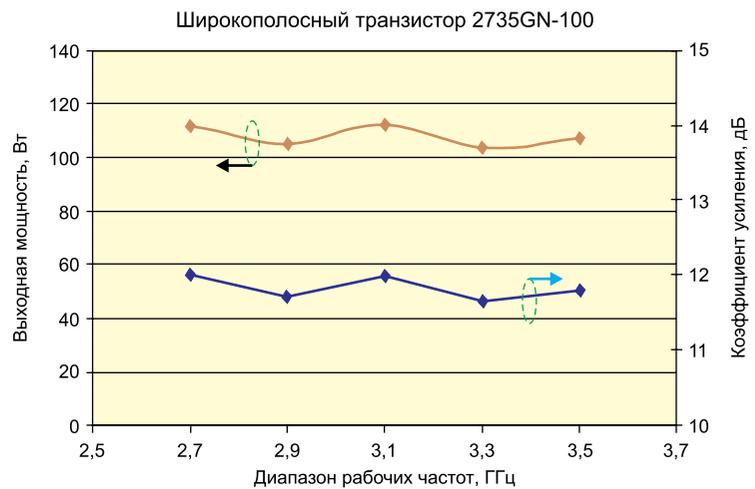


Рис. 2. Типовые характеристики широкополосного транзистора 2735GN-100

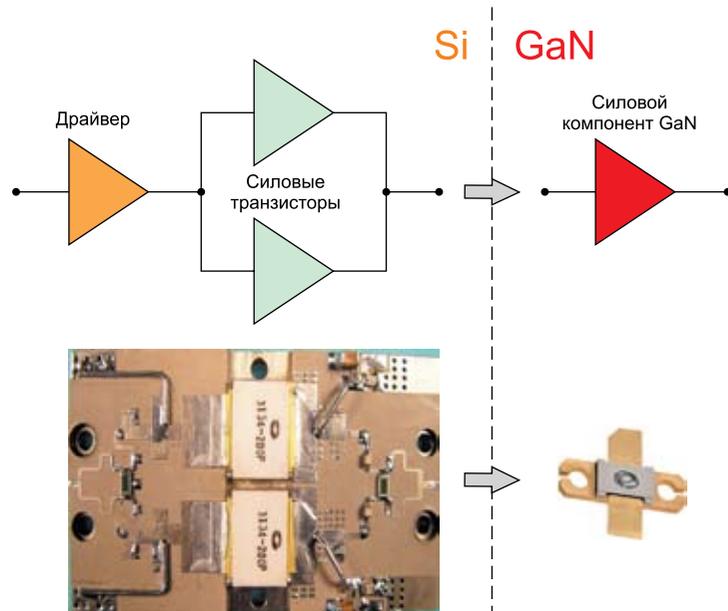


Рис. 3. Модуль S-диапазона 2,7–2,9 ГГц

существенно уменьшает размер всей системы и упрощает ее разработку, одновременно улучшая такие характеристики, как мощность, КПД и долговременная надежность.

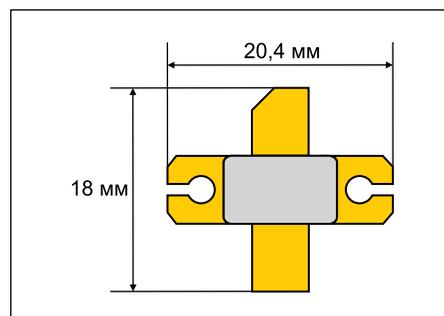


Рис. 4. Внешний вид и габариты корпуса 55-QP

Использование мощных транзисторов на основе GaN предъявляет повышенные требования не только к качеству монтажа кристаллов транзистора в корпус, но и к материалам и конструкции самого корпуса. GaN-транзисторы Microsemi изготавливаются в малогабаритных герметичных корпусах 55-QP с позолоченными выводами и подвергаются 100% тестированию на воздействие жестких условий окружающей среды [6] (рис. 4).

**Планы производства GaN-транзисторов Microsemi**

Компания Microsemi имеет многолетний опыт разработки силовых ВЧ-компонентов на основе кремния и карбида кремния. Проект

разработки нитрид-галлиевых транзисторов был запущен только в 2010 г. Несмотря на это, уже в 2011 г. были получены первые серийно выпускаемые приборы с характеристиками, не уступающими лидерам рынка GaN-транзисторов. Помимо серийных изделий, уже сейчас доступны образцы для работы в С- и L-диапазонах, а опыт сотрудников компании и собственные наработки в данной области позволяют надеяться, что дальнейшие планы по расширению семейства не останутся только на бумаге.

В создании транзисторов и ИС на нитриде галлия заинтересованы не только разработчики новейших систем беспроводной связи и авиационного оборудования, но и военные. В настоящее время компания Microsemi заканчивает подготовку к началу промышленного выпуска радиационно-стойких нитрид-галлиевых транзисторов для военного и космического применения. Первые радиационно-стойкие полевые GaN-транзисторы новой линейки рассчитаны на рабочие напряжения 40, 60, 100, 150 и 200 В и имеют сопротивление открытого канала исток-сток в диапазоне 4–100 мОм. Транзисторы имеют отличную стабильность характеристик при высоких температурах и температуру перехода, близкую к +300 °С.

Радиационно-стойкие полевые транзисторы Microsemi планируется поставлять в корпусах для поверхностного и выводного монтажа, а также в бескорпусном исполнении. Среди отличительных особенностей об-

ращают на себя внимание очень низкая паразитная емкость, позволяющая уменьшить потери при переключении вдвое, а также низкое сопротивление канала в открытом состоянии, что минимизирует потери проводимости и увеличивает коэффициент передачи. Предварительное тестирование воздействия радиационного излучения на работоспособность полевых GaN-транзисторов показало их хорошую устойчивость к различным видам воздействий единичных событий и суммарной поглощенной дозе излучения. Для подтверждения качества предлагаемых транзисторов компанией Microsemi в тесном сотрудничестве с Управлением тыла министерства обороны США (DLA) разрабатываются тестовые спецификации, удовлетворяющие требованиям стандарта MIL-PRF-19500.

### Заключение

Чем же могут заинтересовать разработчиков нитрид-галлиевые транзисторы с подложкой из карбида кремния? Несомненно, они существенно расширили возможности мощных высокочастотных приборов. Высокая удельная мощность по сравнению с транзисторами на кремнии, арсениде галлия, карбиде кремния или на любом другом освоенном в производстве полупроводниковом материале, и, как следствие, малые габариты разрабатываемых устройств, высокий коэффициент усиления, надежность работы в условиях повышенных температур и радиации — все это в совокупности делает пер-

спективными разработку и совершенствование GaN-технологии. Широкополосные беспроводные сети, оборудование авиационного, космического и военного применения, малогабаритные надежные твердотельные радары — эти системы, как и многие другие, могут быть реализованы и в значительной мере усовершенствованы благодаря применению транзисторов на нитриде галлия. ■

### Литература

1. Кищинский А. А. Твердотельные СВЧ-усилители мощности на нитриде галлия — состояние и перспективы развития // Материалы 19 Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. 2009.
2. Ефименков Ю. П., Ткаченко В. О., Данилин В. Н. Исследования по созданию мощного СВЧ-транзистора с барьером Шоттки, на GaN, с затвором, сформированным с помощью электронной литографии // Материалы V Международной научно-технической школы-конференции «Молодые ученые». 2008. Ч. 1.
3. Данилин В., Жукова Т. и др. Транзистор на GaN пока самый «крепкий орешек» // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2005. № 4.
4. Васильев А., Данилин В., Жукова Т. Новое поколение полупроводниковых материалов и приборов: через GaN к алмазу // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 4.
5. GaN and SiC. RF Power Transistor Selection Guide. [www.microsemi.com](http://www.microsemi.com)
6. 2729GN–150. Rev.1. Datasheet. July, 2011. [www.microsemi.com](http://www.microsemi.com)