

GaN-ТРАНЗИСТОРЫ МАСОМ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ

Область полупроводниковой технологии, используемая для инфраструктуры беспроводной связи, претерпевает значительные изменения, и, в частности, это касается рынка усилителей мощности. Многие годы здесь доминировали транзисторы, выполненные по смещено-диффузной металл-оксид-полупроводниковой технологии на основе кремния (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor, LDMOS), с которыми сейчас в области усилителей мощности конкурируют приборы на основе нитрида галлия (GaN). Последствия этой конкурентной борьбы могут оказаться весьма существенными — как в части повышения технических характеристик беспроводных базовых станции, так и в отношении затрат на их эксплуатацию.

Явные преимущества, которые обеспечивает технология на основе нитрида галлия, — повышение эффективности использования подводимой энергии, широкая полоса рабочих частот, более высокая плотность мощности, меньший форм-фактор. Все это позиционирует данную технологию как естественного преемника LDMOS-технологии для базовых станций (БС) следующего поколения, в частности, для сотовых станций, работающих в диапазоне частот выше 1,8 ГГц. Когда-то GaN-транзисторы казались чем-то запредельно дорогим по сравнению с LDMOS-транзисторами, однако сегодня GaN-транзисторы четвертого поколения компании MASCOM, выполненные по технологии нитрида галлия на кремнии (MASCOM GaN), демонстрируют сближение уровня затрат для обеих технологий — новой и старой.

Чтобы проанализировать все преимущества и компромиссы, начиная от технических характеристик и заканчивая оценкой общих затрат, рассмотрим во всех подробностях относительные достоинства технологий LDMOS, нитрида галлия на карбиде кремния (GaN-на-SiC) и GaN-технологии от компании MASCOM. Обладая многолетним опытом и знаниями в области приложений беспроводной инфраструктуры, MASCOM располагает уникальными возможностями, позволяющими оценить пригодность данных подходов для применения в коммерческих БС.

Мощные транзисторы семейства MAGb компании MASCOM, созданные на основе нитрида галлия (GaN), имеют КПД более 70%, линейный коэффициент усиления 19 дБ на частоте 2,6 ГГц и возможность достижения КПД более 80%, если устройства используются с соответствующим оптимальным согласованием по нагрузке. Такой КПД по мощности свойственен только лучшим приборам технологии GaN-на-SiC и превышает на 10% большую эффективность по сравнению имеющимися на рынке предложениями транзисторов технологии LDMOS.

При правильном применении транзисторов семейства MAGb, выполненных на основе GaN, их преимущество в части эффективности, которое приводит к уменьшению размеров радиатора, блока питания и общих габаритов устройства, может существенно сократить общие эксплуатационные расходы на оборудование у поставщиков услуг беспроводной связи. Кроме того, происходит значительная экономия по оплате коммунальных услуг и снижение капитальных затрат. При переходе на новые БС, выполненные на транзисторах технологии GaN, годовая экономия только по коммунальным услугам может превысить \$100 млн при средней стоимости потребляемой энергии в \$0,1 за 1 кВт·ч.

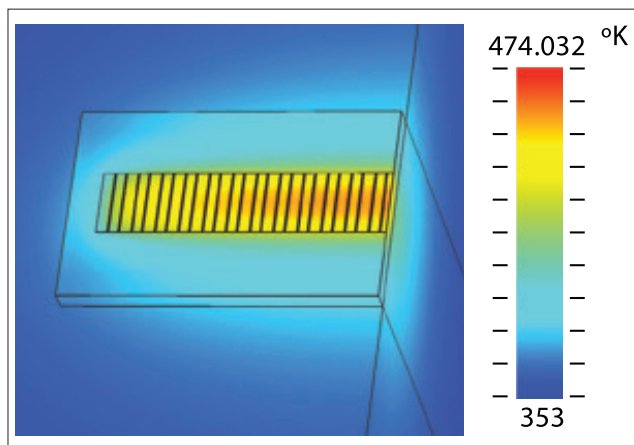
СЕМЕЙСТВО ТРАНЗИСТОРОВ MAGb

Миф № 1

Технология GaN-на-Si применительно к мощным транзисторам дает весьма незначительное преимущество в части КПД по отношению к транзисторам, выполненным по технологии LDMOS, и не может соответствовать по эффективности транзисторам технологии GaN-на-SiC.

Миф № 2

Тепловые характеристики GaN-на-SiC обеспечивают более высокую эксплуатационную надежность усилителям мощности, выполненным на транзисторах по этой технологии.



▲ **Рис. 1.** В реальных условия эксплуатации в составе БС при рабочих температурах +200 °С мощные транзисторы серии MAGb показывают среднюю наработку на отказ (МТТФ) более чем 10^6 ч

В реальных условия эксплуатации в составе БС при рабочих температурах 200 °С мощные транзисторы серии MAGb показывают среднюю наработку на отказ (МТТФ) более чем 10^6 ч (рис. 1). Эти компоненты оказались столь же устойчивыми и столь же надежными, как и конкурирующие с ними устройства, выполненные по технологии GaN-на-SiC. Они соответствуют той же эксплуатационной надежности, характерной для уже морально устаревших транзисторов технологии LDMOS.

Компания MACOM смогла достичь паритета по тепловым характеристикам по отношению к технологии GaN-на-SiC благодаря использованию передовых методов проектирования транзисторов и конструкции их корпусов, а также за счет оптимизации кристалла транзистора, применения инновационного решения в части теплоотвода и способа крепления кристалла. Таким образом удалось нивелировать разницу на 15–30% в теплопроводности используемых компанией MACOM кремниевых подложек относительно подложек из карбида кремния, что обычно присутствует на уровне устройств.

Миф № 3

Для приборов на основе GaN сложно решить проблему обеспечения линейности, поскольку трудно провести линеаризацию путем использования технологии внесения адаптивных цифровых предискажений.

Использование схемы усилителя Догерти весьма популярно благодаря ее эффективности, однако могут возникнуть трудности с передачей сигнала из-за нелинейности, свойственной этому решению. Эту проблему можно решить введением адаптивного цифрового предискажения (Digital Pre-Distortion, DPD). Но оказалось, что DPD трудно реализовать при использовании в таком усилителе приборов, выполненных по технологии GaN-на-SiC. Причина — эффект захвата заряда в карбиде кремния (SiC), который, как полагают, вызван кристаллическими дефектами в его кремниевой структуре, что, в результате, оказалось серьезным вызовом и привело к меньшей линейности усилителей мощности, выполненных на транзисторах данного типа.

Для сравнения, базирующиеся на технологии GaN мощные транзисторы семейства MAGb линеаризовать просто, для этого используются схемы введения предискажений DPD, аналогичные остальным GaN-технологиям. GaN-транзисторы компании MACOM не генерируют вышеуказанных искажений, и поэтому они (применительно к усилителям мощности БС беспроводной связи) являются технически лучшим решением по отношению к используемым в них мощным транзисторам LDMOS-и GaN-на-SiC технологий.

Миф № 4

Преимущества в отношении плотности мощности GaN-транзисторов сводятся на нет из-за их непомерно высокой стоимости.

GaN-транзисторы компании MACOM обеспечивают мощность в четыре–шесть раз большую, чем транзисторы с таким же размером кристалла, но выполненные по технологии LDMOS. В то же время, затраты на производство GaN-пластин для компаний MACOM немного выше, чем для пластин по LDMOS-технологии. Это связано с тем, что особенности технологического процесса GaN требуют стадии эпитаксиального осаждения. Однако эффективная технология обработки полупроводниковых пластин, используемая компанией MACOM, позволяет на 50% сократить число этапов по сравнению с методикой изготовления пластин технологии LDMOS, что дает уже не столь ощутимую разницу в стоимости при перерасчете на одну пластину. В итоге, в общем объеме производства доля полупроводниковых пластин MACOM для приборов, произведенных по GaN-технологии, будет составлять от 1/4 до 1/6 доли выпуска приборов по LDMOS-технологии, и, таким образом, будет поддерживаться их более низкая стоимость.

Таблица. Сравнение устройств, выполненных по разным технологиям

	LDMOS	MACOM GaN	GaN-на-SiC	Преимущества
КПД усилителя мощности на частотах выше 2 ГГц	–	Улучшение более чем на 10%	Улучшение более чем на 10%	Меньшие эксплуатационные расходы
Максимальная рабочая частота, ГГц	3,6	>3,8	Расширяет область рабочих частот	
Полоса рабочих частот, МГц	100	200	Более высокая емкость БС	
Плотность мощности, Вт/мм	1–1,5	4–6	4–8	Меньшая антенна, меньшие капитальные затраты
Линейность	Допускает использование DPD (адаптивного цифрового предискажения)	Прибор с захватом заряда	Использование схем модуляции более высоких порядков	
Возможности в части удовлетворения требований по поставкам	8"	До 8"	4–6"	Достаточные объемы производства и возможность быстрого удовлетворения пикового спроса
Стоимость	Si	SiC	Ценовая структура подобная приборам LDMOS	



▲ **Рис. 2.** В пластиковом корпусе TO272S возможна компоновка, характерная для корпусов типа TO272, но без винтового крепления за «ушки». Благодаря улучшенным тепловым характеристикам, такой транзистор способен выдать до 300 Вт пиковой мощности

Высокая плотность мощности, которая обеспечивается в GaN-транзисторах компании MACOM, позволяет создавать устройства в более компактных корпусах. Разработчики конечной аппаратуры могут сохранить существующие факторы усилителей мощности, поддерживая более высокую мощность и/или большую интеграцию для размещения всей массивной архитектуры из большого числа передающих и приемных антенн.

Мощные транзисторы семейства MAGb — наглядный пример того, какие преимущества дает высокая плотность мощности. В продукты данной серии включены одиночный транзистор, обеспечивающий до 400 Вт пиковой мощности, двоянный транзистор и конфигурация усилителя Догерти в одном общем корпусе, поддерживающие до 700 Вт пиковой мощности в симметричном и несимметричном варианте включения. Физический размер этих устройств соизмерим с меньшими по мощности LDMOS-устройствами и сравним с тем, что предлагается для аналогичных решений по технологией GaN-на-SiC (табл. 1).

Пластиковый корпус TO272S позволяет использовать компоновку, характерную для корпусов типа TO272, но без винтового крепления за «ушки» (рис. 2). Благодаря улучшенным тепловым характеристикам, такой транзистор способен выдать до 300 Вт пиковой мощности.

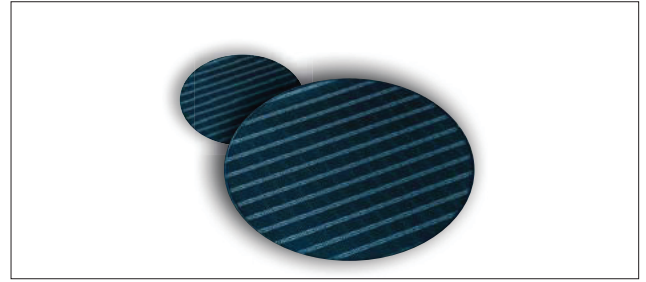
GAN-РЕШЕНИЯ ОТ MACOM

Миф № 5

Транзисторы, выполненные по технологии GaN, слишком дороги, чтобы их применять в базовых станциях.

Сегодня компания MACOM делает все возможное, чтобы обеспечить выпускаемым GaN-устройствам соотношение стоимости на 1 Вт мощности, сопоставимое с тем, что имеют приборы, выполненные по LDMOS-технологии. Компания предлагает свои компоненты по значительно более низкой цене, чем полупроводниковые пластины GaN-на-SiC.

По прошествии определенного времени технология GaN-на-SiC будет иметь прямую выгоду из структуры затрат на производство кремниевых пластин, которые сейчас стоят в сотню раз меньше, чем пластины, выполненные по технологии GaN на SiC. Это происходит потому, что монокристаллы SiC, по сравнению с монокристалла-



▲ **Рис. 3.** Сравнение 4" пластины с 8"

ми кремния, растут медленнее в 200–300 раз. Свой вклад вносит и амортизация оборудования для их выпуска, и суммарное потребление энергии, используемой производственными предприятиями. Расходы на технологию GaN-на-SiC будут постоянно возрастать и, следовательно, станут тормозить ее массовое использование в коммерческих БС беспроводной связи.

В отличие от технологии GaN-на-SiC, годовая потребность в кремниевых заготовках для всего объема выпуска ВЧ- и СВЧ-приборов на основе GaN компании MACOM может быть покрыта недельной загрузкой лишь одного предприятия, изготавливающего 8" кремниевые монокристаллы (рис. 3). В настоящее время MACOM и ее предприятия-партнеры производят продукцию на 6" кремниевых пластинах, а переход на использование 8" пластин намечен на 2017 г. Это не только окажет влияние на структуру затрат, но и позволит поставлять устройства, выполненные на основе GaN, в качестве основных на рынке коммерческих БС беспроводной связи.

Миф № 6

Приборы, выполненные по технологии GaN, не могут удовлетворить требования индустрии БС, поскольку объемы выпуска данных транзисторов недостаточны.

Высокие затраты, неизбежные при производстве SiC, сказываются на объемах выпуска полупроводниковых приборов этого типа: они востребованы ограниченным числом потребителей высокочастотных устройств, а небольшие партии таких изделий не смогут удовлетворить потребности приложений в коммерческих масштабах, особенно на пике спроса. Кроме того, сам по себе SiC является относительно новым материалом с, соответственно, короткой историей применения. И здесь именно кремний получает преимущества, исходя из своей более чем 60-летней истории промышленного использования и развития. Так что технология GaN-на-SiC имеет хорошие перспективы, а возможности отрасли способны поддерживать массовое производство приборов на основе этой технологии, учитывая всплески спроса. Вот почему в бесперебойных поставках данных транзисторов можно быть полностью уверенными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принимая во внимание все изложенные выше факты, можно утверждать, что именно транзисторы компании MACOM, выполненные по технологии GaN, обеспечивают оптимальный баланс между их техническими характеристиками, эффективностью затрат и коммерческой масштабируемостью в части объемов поставок, что делает их четкой технологической платформой для выбора транзисторов следующего поколения мощных БС.