

РАДИОЧАСТОТНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ GaN НА КРЕМНИИ ВЗЯЛИ ЛУЧШЕЕ ИЗ ДВУХ ТЕХНОЛОГИЙ

Благодаря возможности использовать технологические процессы и большие пластины, стандартные для полупроводников, технология нитрида галлия (GaN) на кремнии (Si), предназначенная для изготовления высокочастотных транзисторов, не только предусматривает значительную экономию при производстве, но и сочетает конкурентные преимущества обеих технологий. В этой статье, представленной в виде авторского перевода [1], объясняется, как современные достижения в области технологии GaN на Si могут привести к прорыву в разработке радиочастотных усилителей мощности передатчиков базовых станций систем сотовой связи пятого поколения с дальнейшей перспективой более широкого применения.¹

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня мир стремится к более высокоскоростным соединениям, в которых сочетается низкая задержка с высокой надежностью, а потребление энергии для информационных коммуникационных технологий продолжает расти, что вызывает определенное беспокойство. Соответственно, рынок не только позиционирует сеть 5G как безальтернативный вариант для многих критически важных на текущий момент приложений, но и предъявляет определенные требования к росту ее производительности и повышению энергоэффективности инфраструктуры.

Целевые показатели производительности сети 5G в свою очередь также предъявляют требования к базовым полупроводниковым компонентам, увеличивая потребность в высоконадежных интерфейсных ВЧ-решениях с более широкой полосой пропускания, более высокой рабочей частотой и меньшей занимаемой площадью, при условии улучшенной энергоэффективности за счет повышения коэффициента полезного действия (КПД). Одной из причин особого внимания к эффективности является тот факт, что для сетей 5G необходимо большее число сот, чем для LTE, и многоэлементных цифровых антенных решеток (massive MIMO, mMIMO) [2], а это приводит резкому увеличению количества мощных полупроводниковых устройств в передатчиках базовых станций. Это не только приводит к росту энергопо-

требления, но и вынуждает операторов мобильных сетей максимально использовать и без того ограниченные финансовые ресурсы на капитальные и операционные затраты. Следовательно, для установки и эксплуатации эффективной сети 5G первостепенное значение имеет как оптимизация энергопотребления оборудования, так и оптимизация его стоимости.

Если подходить с точки зрения функционально-стоимостного анализа (ФСА), то наиболее значимую роль в удовлетворении явно противоречивых потребностей в повышении производительности и снижении стоимости играют используемые в современных архитектурах нового радио 5G радиочастотные усилители мощности (УМ). В то время как в предыдущих стандартах сотовой связи в УМ для базовых станций доминировала технология LDMOS, с внедрением 5G эта ситуация меняется [3]. Претендентом на главные роли здесь становятся транзисторы на основе такого широкозонного полупроводника, как нитрид галлия (GaN), который при превосходных радиочастотных характеристиках отличается и значительно меньшим энергопотреблением.

Однако у этой сюжетной линии есть один нюанс: мы говорим не о самом нитриде галлия, а о GaN на SiC, который в основном используется для новых активных антенн радиостанций 5G. Проблема в том, что при высоких радиочастотных и тепловых характе-

ристиках GaN на SiC пока еще остается одной из самых дорогих полупроводниковых технологий для области высоких частот. Это связано с его более сложной и не традиционной для полупроводниковой промышленности обработкой на малых пластинах, что ограничивает его широкомасштабное применение и, соответственно, снижение цены. А вот GaN на Si, напротив, благодаря возможности использования стандартных для полупроводников технологических процессов, сочетает лучшие черты обеих технологий: конкурентоспособные характеристики в сочетании с большой экономией на масштабе производства. В этой статье мы объясняем, как достижения в области GaN на Si уже сейчас позиционируют эту технологию как очень сильного соперника для построения РЧ УМ передатчиков базовых станций систем сотовой связи пятого и будущего поколений.

ТРЕБОВАНИЯ К 5G

Всплеск интереса к социальным сетям, видеосвязь и различные приложения на смартфонах, требующие больших объемов данных, приводят к интенсивному использованию Интернета на мобильных устройствах. Это в свою очередь увеличивает потребность в высокопроизводительных радиосетях, обеспечивающих достаточное покрытие и качество обслуживания, и единственным вариантом здесь становится переход на технологию 5G [4]. Эта тенденция усилилась во время пандемии COVID-19,

¹ Публикация перевода осуществляется на основе эксклюзивного разрешения журнала Microwave Journal, предоставленного переводчику. Оригинал статьи [1] впервые опубликован в Microwave Journal, November 2021. Все желающие могут бесплатно подписаться на <https://www.microwavejournal.com/user/new>.

и операторы уже приступили к развертыванию 5G на частоте субдиапазона 6 ГГц, выбрав его как наиболее эффективный на текущий момент способ справиться с экспоненциально растущим потреблением данных. Однако стремление к более высокой скорости передачи данных, как уже было сказано, имеет огромное влияние на глобальные затраты за электроэнергию. Ожидается, что потребление энергии для удовлетворения потребностей информационных и коммуникационных технологий уже в самое ближайшее время вырастет до 21% от общемирового уровня [6].

С точки зрения радиосвязи для реализации возможностей 5G также нужно решить ряд проблем. Среди них: более высокие несущие частоты до 7 ГГц (а впоследствии еще выше, до миллиметровых волн [5]), мгновенная полоса пропускания более 400 МГц, модуляция более высокого порядка, увеличенное количество каналов и конфигурация антенны mMIMO. И это лишь некоторые из стоящих задач [7]. Кроме того, необходимость свести к минимуму вес и энергопотребление никогда не была столь актуальной, поскольку для экономии затрат на энергию и на охлаждающее оборудование понадобится более высокая энергоэффективность. В этом аспекте УМ в радиостанциях 5G с mMIMO по-прежнему остаются критически важными устройствами, так как на них приходится до 50% энергии, потребляемой базовой станцией [8]. Вот почему полупроводниковые технологии для радиочастотных УМ, чтобы соответствовать требованиям 5G и проложить путь будущим поколениям (а 6G уже маячит на горизонте), должны соответствовать определенным жестким требованиям.

В этом контексте GaN благодаря своим превосходным радиочастотным характеристикам уже зарекомендовал себя как ведущая технология усилителей высокой мощности для передатчиков базовых станций 5G mMIMO. Однако текущие реализации остаются непомерно дорогими. GaN, выращенный на дорогих небольших SiC эпитаксиальных III/V пластинах на фаундри (компания, специализирующаяся на выпуске интегральных схем) с использованием дорогостоящей литографии, по сравнению с технологиями на основе Si, приводит к чрезвычайно высокой стоимости производства транзисторов. Первоначальные попытки выращивать GaN на носителях Si не вышли на рынок из-за ограниченной производительности в части радиочастотных характеристик и неприемлемо высокой стоимости.

Однако ситуация меняется. В этой статье представлена новая технология GaN на Si, которая не только работает

по 8-дюймовому процессу и отвечает всем техническим требованиям для радиочастотного применения, но и остается коммерчески привлекательным решением.

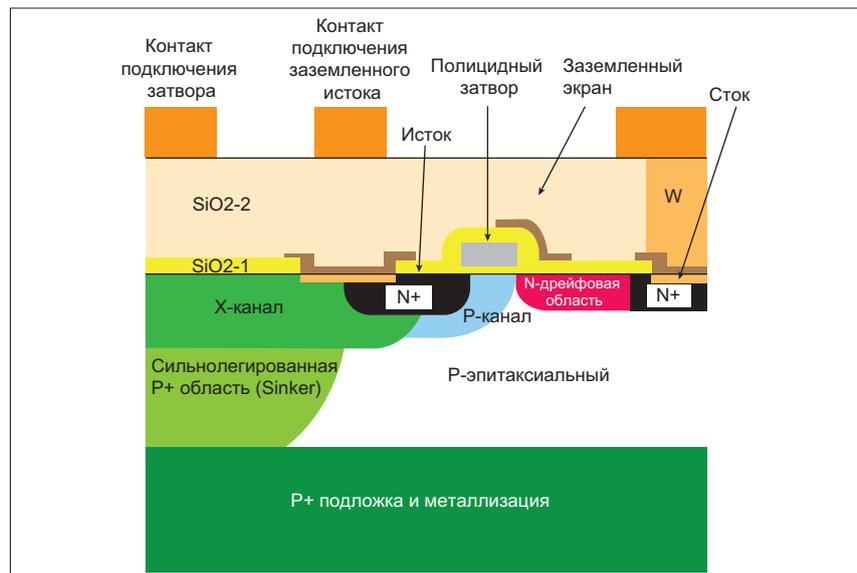
ТЕХНОЛОГИИ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ РАДИОЧАСТОТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

LDMOS (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor — металлооксидный полупроводник с латеральной (боковой) диффузией). Разработанные в конце 1960-х — начале 1970-х годов как альтернатива имеющимся мощным полевым МОП-транзисторам с увеличенным напряжением пробоя [9], LDMOS были первыми полевыми транзисторами для радиочастотных УМ (рис. 1). Характеристики, надежность и простота использования структуры с латеральной диффузией [10, 11] превосходили биполярные кремниевые транзисторы, и в 1990-х годах LDMOS стали доминирующей технологией транзисторов для высокочастотных УМ.

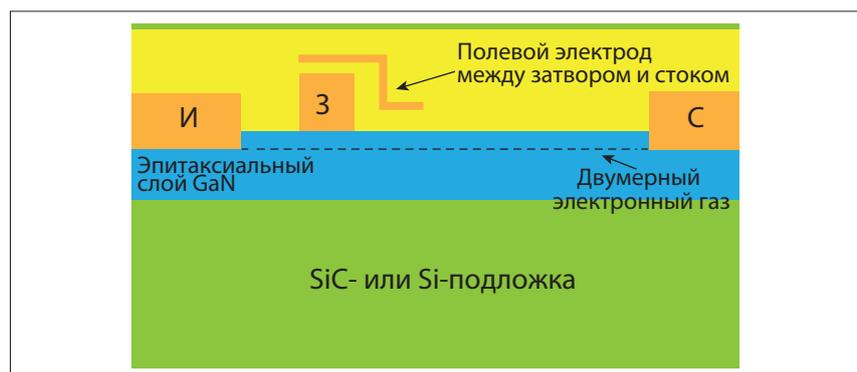
В течение последних 30 лет LDMOS была стандартной технологией для выходных мощных каскадов передатчиков в беспроводной инфраструктуре, достигая отличной производительности на ча-

стотах до 3 ГГц. Но в первую очередь технология выигрывала благодаря своему безусловному ценовому преимуществу, возможности изготовления устройств на 8-дюймовых кремниевых пластинах, и полной совместимости со стандартными технологическими линиями. По этой причине транзисторы технологии LDMOS, до появления транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия — GaN HEMT, было трудно потеснить на рынке мощных полупроводниковых приборов для УМ базовых станций сотовой связи.

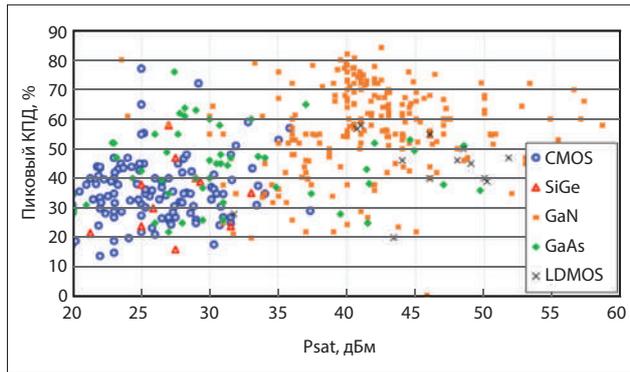
GaN на SiC. Технология GaN на SiC возникла в начале 2000-х в результате программ по управлению перспективными исследовательскими проектами Министерства обороны США — DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) [12, 13], которые последовали за успешными программами 1970-х и 1980-х годов в области арсенид-галлиевых (GaAs) монокристаллических высокочастотных схем (Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC) [14]. Высокочастотные GaN-транзисторы (рис. 2) были разработаны для удовлетворения спроса на более высокую мощность и более широкую полосу рабочих частот, а также для более



▲ Рис. 1. Функциональный разрез LDMOS-транзистора



▲ Рис. 2. Функциональный разрез GaN HEMT-транзистора



▲ **Рис. 3.** Измеренные в диапазоне частот 2–6 ГГц мощность в режиме насыщения транзистора P_{sat} и пиковые значения КПД в зависимости от технологии транзисторов УМ [16]

высокой области частот, необходимой для таких военных приложений, как компактные радиолокационные станции (РЛС) с фазированной антенной решеткой (ФАР).

По сравнению с LDMOS, нитрид-галлиевые транзисторы имеют неоспоримое преимущество — это более высокая критическая напряженность электрического поля и максимальная плотность основных зарядов в канале, что приводит к более высокой плотности мощности с более высоким импедансом и меньшим снижением эффективности (КПД) в зависимости от частоты. Атрибуты, которые делают GaN привлекательным для военных приложений, актуальны и для инфраструктуры сотовой связи [15], в частности, высокая плотность мощности — обычно в 5 раз больше, чем у LDMOS-транзистора — в сочетании с низкой паразитной емкостью позволяет нитрид-галлиевым транзисторам поддерживать более широкую полосу частотной модуляции.

Рыночная тенденция к более высокой несущей частоте тоже становится движущим фактором к переходу на транзисторы на основе GaN, которые поддерживают более высокую пиковую эффективность в зависимости от уровня мощности и частоты. Как показано на рис. 3, эффективность усилителей на основе GaN превышает 80%, даже на частотах выше 2 ГГц. Такие преимущества становятся все более важными для сотовой связи 5G и систем будущего.

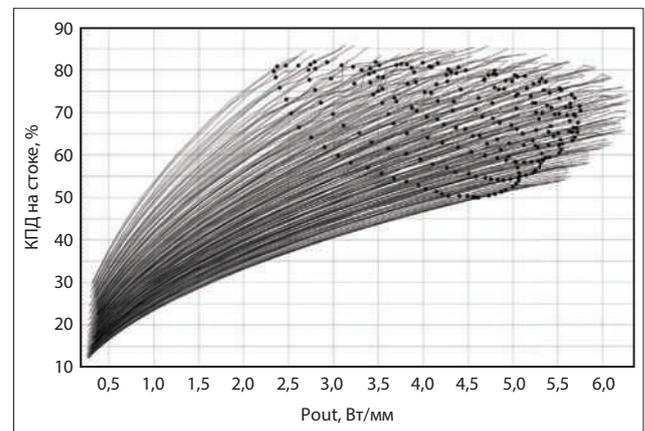
GaN на Si. Основным сдерживающим фактором, ограничивающим внедрение GaN-транзисторов в таких чувствительных к стоимости приложениях, как беспроводная инфраструктура, всегда была их высокая стоимость. Это особенно верно для приложений на частотах 2 ГГц и в более низком частотном диапазоне, где разница в производительности между LDMOS- и GaN-транзисторами не столь значительна. Чтобы решить проблему высокой стоимости GaN на SiC, с начала 2000-х годов стали выращивать GaN на подложках из кремния. Основные проблемы, касающиеся электрических характеристик и надежности, были связаны со сложностью выращивания высококачественного GaN на подложках Si из-за несоответствия их кристаллических решеток. Огромный объем исследований и разработок, проведенных за последние десять лет, особенно в области преобразования энергии, позволил значительно улучшить качество эпитаксиальных слоев и, как следствие, наладить выпуск целого ряда GaN-транзисторов на подложке из кремния, причем даже для применения в промышленном оборудовании большой мощности [16, 17].

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ GaN НА Si

Несмотря на потенциально более высокие электрические характеристики GaN на Si, следовало решить несколько проблем, чтобы продемонстрировать достойные характеристики GaN на Si, а также хорошую надежность, соответствующую технологии GaN на SiC. Благодаря большой работе, проделанной ком-

панией Infineon, для высокочастотных мощных транзисторов появилась технология GaN на Si, которая смогла реализовать свой потенциал. Так что после многих лет разработки GaN на Si готов стать преобладающим направлением в области усиления радиочастотной мощности. Наиболее важные критерии, определяющие зрелость технологии, заключаются не только в производительности, но и в тепловом сопротивлении, надежности и стоимости.

Радиочастотные характеристики (производительность). Одним из наиболее важных параметров производительности, определяющих возможность замены LDMOS-транзисторов, является эффективность (КПД). На рис. 4 показаны измерения нагрузки на частоте 2,7 ГГц для корпусированного транзистора с общей шириной затвора 5,8 мм и напряжением питания 28 В. При компрессии в 3 дБ (P_{3db}), обозначенной кружками, пиковый КПД стока составляет примерно 85%, а пиковая выходная плотность мощности превышает 5,5 Вт/мм, что соответствует производительности транзисторов, выполненных по технологии GaN на SiC. Графики показывают довольно постоянную эффективность от глубокого восстановления почти до насыщения, что делает технологию устройства GaN на Si подходящей для популярных в передатчиках базовых станций усилителей мощности Догерти [3].

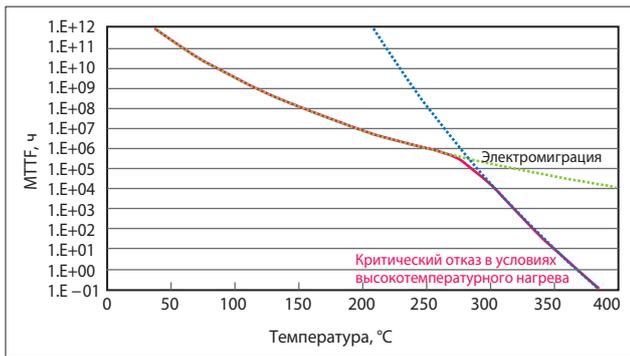


▲ **Рис. 4.** Зависимость эффективности (КПД на стоке) от нагрузки и удельной мощности для корпусированного GaN на Si-транзисторе с общей шириной затвора 5,8 мм

Тепловое сопротивление. Одно из фундаментальных различий между технологиями GaN на Si и GaN на SiC — их тепловое сопротивление, отражающее разницу в теплопроводности Si- и SiC-подложек. Транзистор GaN на SiC имеет априори лучшую теплопроводность. Однако за счет утонения пластины и соответствующей компоновки устройства такая же температура перехода, как у транзистора GaN на SiC, работающего при 48 В, может быть достигнута с помощью технологии GaN на Si — правда, при рабочем напряжении 32 В. В более широком смысле, предполагая аналогичные механизмы отказа, транзисторы GaN на Si при более низком напряжении обеспечивают такую же надежность, как и транзисторы технологии GaN на SiC.

Надежность. Надежность транзистора определяет не только отказ как таковой, но и деградацию его характеристик — данные факторы необходимо учитывать при оценке надежности устройства. Среднее время наработки на отказ (Mean Time to Failure, MTTF) определяется механизмами отказа, которые, как известно, зависят от температуры (рис. 5).

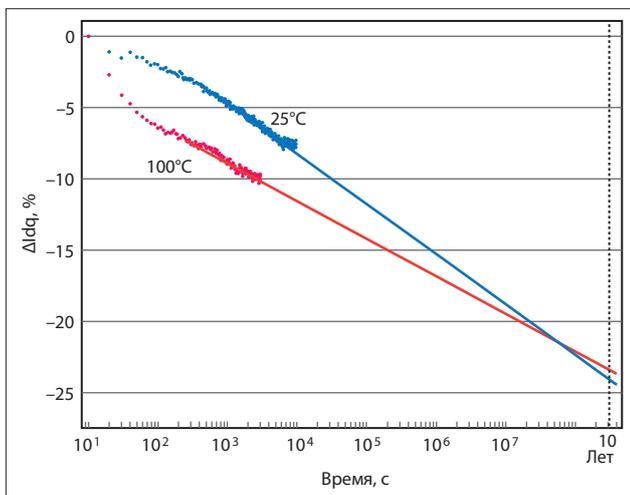
При более низких температурах MTTF транзистора GaN на Si ограничивается электромиграцией — это явление переноса вещества в полупроводнике за счет постепенного дрейфа, возникающее благодаря обмену количеством движения при столкновениях между проводящими носителями и атомной решеткой. Однако электромиграция не зависит от технологии



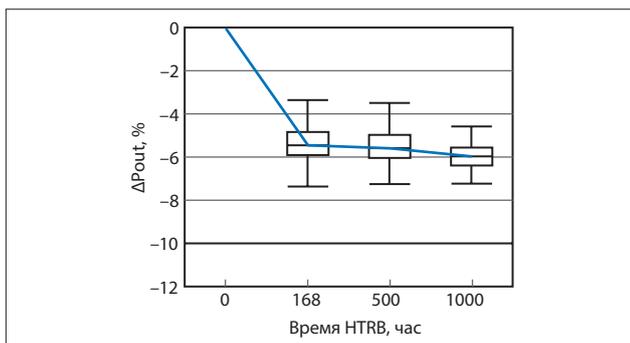
▲ Рис. 5. Зависимость МТТФ транзистора GaN на Si от температуры

кристалла GaN-транзистора, а определяется металлизацией и компоновкой устройства. Среднее время безотказной работы из-за электромиграции можно увеличить, изменив компоновку. В GaN на Si ВЧ-транзисторах компании Infineon используется та же самая медная металлизация, обычно применяемая для кремниевой технологии, которая имеет высокую устойчивость к электромиграции и обеспечивает МТТФ 10^8 ч при температуре $+150$ °C.

Оценивая деградацию технологии, на рис. 6 можно видеть изменение тока покоя стока I_{dq} при 25 и 100 °C транзистора, смещенным на 10 мА/мм при $V_{ds} = 28$ В. Если экстраполировать эти измерения, то через 10 лет в результате деградации I_{dq} будет на 25% меньше. На рис. 7 показано снижение выходной мощности в зависимости от времени для 20-мм кристалла транзистора в корпусе, подвергнутого испытанию на обратное смещение при повышенной температуре (high temperature reverse bias, HTRB) в максималь-



▲ Рис. 6. Деградация I_{dq} транзистора GaN на Si в зависимости от времени наработки, при температуре 25 и 100 °C



▲ Рис. 7. Деградация выходной мощности P_{out} транзистора GaN на Si в зависимости от времени наработки при испытаниях на обратное смещение при повышенной температуре

ных режимах. Для оценки надежности транзистор был смещен при напряжении на затворе $V_{gs} = -15$ В, напряжении сток-исток $V_{ds} = 100$ В и выдерживался при температуре 150 °C. Выходная мощность снижается почти на 8% в течение 1000 ч наработки.

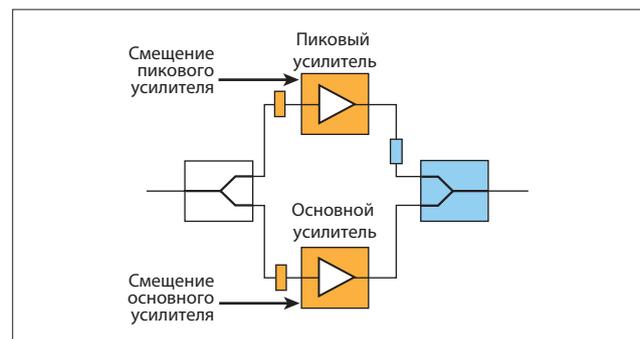
Стоимость. Стоимость площади устройства GaN на SiC определяется подложкой SiC и стоимостью обработки обычных для этой технологии небольших эпитаксиальных пластин III/V на фаундри. Для сравнения: технология Infineon GaN на Si работает на типовых для кремния 8-дюймовых пластинах, поскольку она совместима с производством других кремниевых пластин. Производство GaN на Si-пластинах осуществляется на современном 8-дюймовом оборудовании для Si, используя все преимущества кремниевой технологии: техпроцессы, производительность труда, прибыльность и привычные цепочки поставок. Поскольку интеграция, ведущая к более сложным ММИС, является давней тенденцией, то стоимость по отношению к площади становится важным отличием и здесь кремний имеет отчетливые преимущества.

УСИЛИТЕЛЬНЫЕ МОДУЛИ НА ТРАНЗИСТОРАХ GaN НА Si

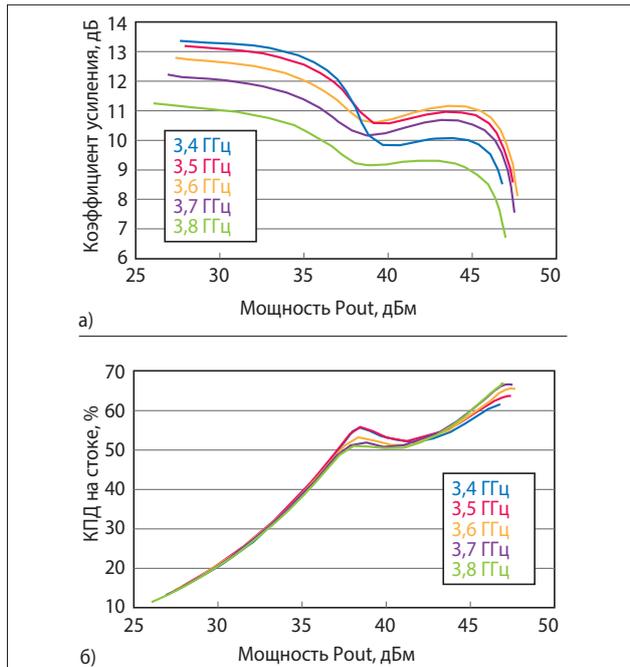
Ключевые параметры производительности для модуля усилителя мощности беспроводной инфраструктуры включают эффективность добавленной мощности (PAE, Power Added Efficiency — КПД добавленной мощности) при номинальной выходной радиочастотной мощности, динамическую пиковую выходную мощность и способность линеаризовать характеристики УМ в режиме дуплексной связи с частотным разделением каналов (frequency-division duplex, FDD) и в дуплексном режиме с временным разделением (time-division duplex, TDD).

Требования для УМ на антенный элемент в активных антенных системах заключаются в увеличении номинальной линейной выходной мощности усилителя с 3 до 8 Вт, а по возможности — до 12 Вт и выше. Однако высокие частоты и растущее число элементов в антенной решетке накладывают ограничения на размеры УМ, поэтому он должен уместиться в пределах расстояния между элементами антенны на печатной плате — таким образом удастся минимизировать стоимость системы. Технология GaN мощных радиочастотных транзисторов обеспечивает необходимый компактный форм-фактор, поскольку она позволяет выдерживать им более высокие температуры перехода.

Чтобы оценить возможности технологии GaN на Si от Infineon, на многослойной органической ламинатной подложке был разработан однокаскадный усилитель Догерти со средней модулированной линейной мощностью 39 дБм в диапазоне 3,4–3,6 ГГц (рис. 8). В схеме усилителя мощности Догерти предусмотрено два разных УМ — первый (основной усилитель, или усилитель несущей) функционирует как линейный усилитель класса АВ, а второй (пиковый) работает как усилитель класса С (с отсечкой) и своим выходным сигналом преобразует импеданс, на который нагружен первый УМ через инвертирующую импеданс четверть-волновую линию. В тестируемом варианте УМ был запитан напряжением смещения 28 В и возбуждался одночастотным вход-



▲ Рис. 8. Однокаскадный усилитель мощности Догерти, блок-схема



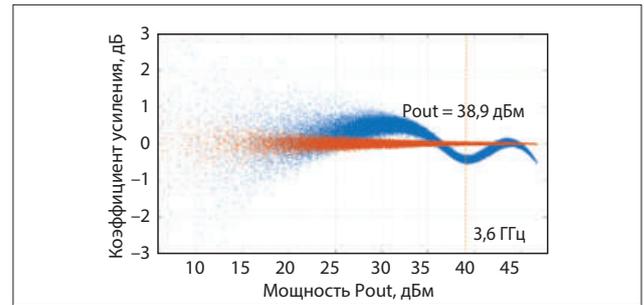
▲ **Рис. 9.** Измеренные коэффициент усиления (а) и КПД на стоке (б) в зависимости от выходной мощности однокаскадного усилителя мощности Догерти

ным сигналом. Эффективность усиления и КПД стока УМ в зависимости от выходной мощности измерялись при комнатной температуре (рис. 9). На выходной мощности 39 дБм был достигнут выигрыш в 10,5 дБ, так что, включая потери делителя 3 дБ, сумматор и другие пассивные потери, максимальная выходная мощность составила 47,5 дБм.

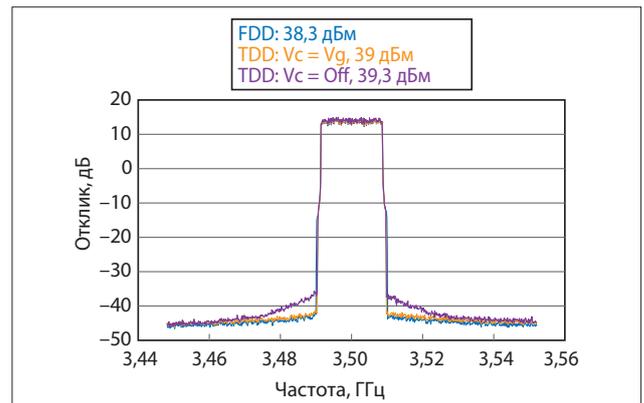
С использованием ограниченного и отфильтрованного модулированного сигнала 5G NR с отношением пиковой и средней мощности (Peak to Average Ratio, PAR) 7,5 дБ прогнозируемая номинальная рабочая мощность усилителя будет равна 39 дБм, с первым пиком КПД на стоке, ожидаемым около этой точки, что гарантирует минимальное отклонение модулированного КПД от КПД для несущей. КПД на стоке в режиме несущей составлял 52–54%. Соответственно, характеристики УМ на транзисторах технологии GaN на Si сопоставимы с характеристиками, указанными для устройств GaN на SiC [18, 19].

Динамическая пиковая мощность УМ была измерена на частоте 3,6 ГГц с помощью анализатора спектра. Измерение выполнено с модулированным сигналом при использовании цифрового предуслаживания (digital predistortion, DPD). Измеренная пиковая мощность составила 47,5 дБм. Результат представлен на рис. 10, где сравнивается модулированная зависимость AM-AM с DPD и без DPD и показано, что DPD дает отличные линейные выходные характеристики. Способность DPD линеаризовать УМ отражает низкую нелинейность устройства и низкие эффекты памяти, присущие УМ, в частности Догерти. Простота линеаризации с использованием имеющихся в продаже драйверов с DPD — важная характеристика технологии устройства и решения усилителя.

Практическое приложение для рассматриваемого УМ — это базовые станции с FDD- и TDD-модуляцией. Благодаря универсальности стандартов 3GPP 5G временная диаграмма передаваемого сигнала может быть довольно сложной и нерегулярной, с возможной передачей одного символа. Динамический отклик УМ, который проявляется в изменении выходной мощности и величины вектора ошибок вдоль символьной последовательности в переданном субкадре, определяют температурный режим, захват заряда и ширина полосы видеосигнала. Для иллюстрации на рис. 11 показан спектр мощности первого символа передаваемой последовательности, демонстрирующий произ-



▲ **Рис. 10.** Зависимость усиления от выходной мощности P_{out} усилителя Догерти с модулированным сигналом на несущей 3,6 ГГц, сравнение характеристик без линеаризации (синий) и с линеаризацией путем введения предуслаживания (красный)



▲ **Рис. 11.** Измеренный спектр УМ Догерти в режимах FDD и TDD с использованием DPD без модели эффекта памяти

водительность в режимах FDD, смешанных и TDD с использованием DPD без модели эффекта памяти. Напряжение V_c относится к напряжению ограничения или смещению затвора вне каскада. При измерениях в режиме TDD использовался следующий модулированный сигнал: 3GPP TDD 3.1a с каналом 1×20 МГц, 5G NR OFDM 256-QAM, 60 кГц SCS и 7,5 дБ PAR.

ТЕНДЕНЦИИ, ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

По мере увеличения мощности особую важность приобретает управление нагревом. При использовании mMIMO на основе активных антенных систем при управлении температурным режимом возникает несколько вопросов, решению которых необходимо уделить внимание: 1) перегрев системы, ведущий к ухудшению характеристик компонентов и снижению долгосрочной надежности; 2) более высокие эксплуатационные расходы из-за более низкой энергоэффективности и 3) пассивный отвод тепла от радиосистемы.

Хотя дискретные модульные решения обеспечивают лучшее управление теплом за счет более низкой плотности упаковки, они могут создавать узкие места в спецификациях и печатных платах, что приводит к более габаритным антенным системам. Решение этой проблемы требует значительной оптимизации конструкции со стороны системного интегратора. Контроль толщины кристалла, использование правильных методов его крепления и высококачественная пайка УМ на печатной плате являются ключевыми факторами отвода тепла. Поддержание почти постоянной выходной мощности при изменении температуры требует меньшего расчетного запаса и дает более высокий уровень PAE. Транзисторы GaN на Si от компании Infineon имеют температурный коэффициент усиления мощности $-0,02$ дБ/°C, что сравнимо с УМ на транзисторах GaN на SiC и LDMOS-технологии.

Более широкая мгновенная полоса пропускания и использование полос частот выше 5 ГГц — это две дополнительные рыночные тенденции, ведущие к более интегрированным ре-

шениям УМ на основе нитрида галлия. Технология GaN на Si от Infineon имеет возможность интеграции непосредственно в МММС, что не только дает существенные преимущества для соответствия требованиям по выходной мощности, но и облегчает преодоление ограничений производительности из-за паразитных эффектов каскадных дискретных компонентов, паразитных эффектов транзисторов и соединительных проводов, что обычно приводит к снижению пропускной способности и энергоэффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье обсуждалась разработка технологии радиочастотного усилителя мощности на транзисторах технологии GaN на кремнии. Использование таких УМ для инфраструктуры сотовой связи улучшает соотношение затрат и производительности GaN. После многолетних исследований технология GaN на Si достигла зрелости и раскрыла свой потенциал, обеспечивая эффективность, сравнимую с GaN на SiC, при более низких затратах благодаря использованию обычных кремниевых пластин. И сегодня можно говорить о том, что GaN на Si соответствует требованиям систем сотовой связи 5G по эффективности, линейности и плотности мощности. Автор статьи считает, что внедрение данной технологии — это начало длинного пути, на котором дальнейшее развитие отрасли позволит использовать GaN на Si на более высоких частотах и более высоких уровнях мощности, потенциально расширяя возможности ее применения. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Nasr I. RF GaN on Silicon: The Best of Two Worlds. *www.microwavejournal.com/articles/37107-rf-gan-on-silicon-the-best-of-two-worlds*
2. Рентюк В. От структуры сигналов к ММО: пять важных моментов для понимания проблем 5G New Radio//Беспроводные технологии. 2020. № 1.
3. Дурнан Г., Анусич З., Ахмед Абдулрахман М. С., перевод и дополнения: Рентюк В. Требования к широкополосным усилителям мощности, используемым в mMIMO-приложениях//СВЧ-электроника. 2020. № 2.
4. Рентюк В. 5G и миллиметровые волны//СВЧ-электроника. 2019. № 4.
5. Jones N. How to Stop Data Centres from Gobbling Up the World's Electricity. *www.doi.org/10.1038/d41586-018-06610-y*
6. 3GPP, Release 16. *www.3gpp.org/release-16*
7. 5G Power White Paper. Huawei Technologies Co. Ltd. *https://carrier.huawei.com/~media/CNBN/Downloads/Spotlight/5g/5G-Power-White-Paper-en.pdf*
8. Tarui Y., Hayashi Y., Sekigawa T. Diffusion Selfaligned MOST; A New Approach for High Speed Device (1.Electrotechnical Lab.). *www.doi.org/10.7567/SSDM.1969.4-1*
9. Wood A., Dragon C., Burger W. High Performance Silicon LDMOS Technology for 2 GHz RF Power Amplifier Applications. *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 1996.
10. Jos H. F. F. Novel LDMOS Structure for 2 GHz High Power Basestation Application. *European Microwave Conference*, 1998.
11. Rosker M. The Wide and the Narrow: DARPA/MTO Programs for RF Applications in Wide Bandgap and Antimonide-based Semiconductors. *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium*, 2005. *www.doi.org/10.1109/CSICS.2005.1531739*
12. Wide Band Gap Semiconductors for RF Applications. *Federal Grants*. *www.federalgrants.com/Wide-Band-Gap-Semiconductors-for-RF-Applications-WBGS-RF-1240.html*
13. Cohen E. The MIMIC Program — A Retrospective//*Microwave Magazine*. June 2012. *www.doi.org/10.1109/MMM.2012.2189989*
14. Green B., Moore K., Hill D., CdeBaca M., Schultz J. GaN RF Device Technology and Applications, Present and Future. *IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM)*, 2013. *www.ieeexplore.ieee.org/document/6798154*
15. Wang H., Huang T.-Y., Mannem N.S., Lee J., Garay E., Munzer D., Liu E., Liu Y., Lin B., Eleraky M., Jalili H., Park J., Li S., Wang F., Ahmed A. S., Snyder C., Lee S., Nguyen H. T., Duffy Smith M. E. Power Amplifiers Performance Survey 2000-Present. *Georgia Tech Electronics and Micro-System Lab (GEMS)*. *www.gems.ece.gatech.edu/PA_survey.html*
16. Detzel T., Charles A., Deboy G., Haeberlen O., McDonald T. The Commercialization of GaN Power Devices: Value Proposition, Manufacturing, and Reliability. *Compound Semiconductor Week (CSW)*, 2019. *www.ieeexplore.ieee.org/document/8819303*
17. Sakata S. et al. A Fully-Integrated GaN Doherty Power Amplifier Module with a Compact Frequency-Dependent Compensation Circuit for 5G massive MIMO Base Stations. *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2020. *www.ieeexplore.ieee.org/document/9223897*
18. Moore K. et al. High Performance 150 mm RF GaN Technology with Low Memory Effects. *IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS)*, 2020. *www.ieeexplore.ieee.org/document/9392951*
19. Saad P., Hou R., Hellberg R., Berglund B. An 80 W Power Amplifier with 50% Efficiency at 8 dB Power Back-off over 2.6–3.8 GHz. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2019. *www.ieeexplore.ieee.org/document/8701113*