

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ GAN-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ КОММЕРЧЕСКИХ РЫНКОВ

В статье рассматриваются преимущества использования технологий на основе нитрида галлия при создании СВЧ-приборов — от изделий радиоэлектроники до бытовой техники.

**Н**итрид галлия (GaN) — это бинарное соединение элементов III и V групп, которое представляет собой прямозонный полупроводник с широкой запрещенной зоной. GaN обеспечивает превосходную эффективность и широкую полосу рабочих частот и уже заслужил признание в качестве оптимального решения для самых различных приложений из разных областей промышленности; по прогнозам, он скоро «ворвется» во все сегменты коммерческого и потребительского рынков.

Допуская более высокую мощность и имея более высокие технические характеристики, приборы, выполненные по технологии на основе GaN, переступают барьер, ограничивающий ее использование исключительно для целей коммерческих силовых решений. Кроме того, обеспечивая лучшие технические характеристики, в том числе высокую эффективность (КПД  $\geq 70\%$ ) и более широкий рабочий диапазон частот, технология на основе GaN отличается рядом таких фундаментальных свойств, которые делают ее исключительно подходящей для использования в мощных высокочастотных каскадах, работающих в области радиочастот. GaN обеспечивает самую высокую плотность мощности и может надежно работать при более высоких температурах, чем полупроводники на основе других технологий. Все это в совокупности позволяет изготавливать устройства меньших физических размеров. В сочетании с высокой подвижностью электронов (при этом нитрид галлия похож на арсенид галлия) результатом внедрения технологии GaN в область высокочастотной техники могут стать транзисторы, которые при сравнительно небольших паразитных явлениях будут обеспечивать высокую мощность на высоких частотах.

Как известно, при проектировании высокочастотных усилителей мощности разработчики сталкиваются с двумя проблемами. Прежде всего, это, как правило, низкий импеданс линии подключения выходной нагрузки, который падает с увеличением мощности. Разработчик усилителя мощности должен согласовать цепи таким образом, чтобы иметь выходное сопротивление равным 50 Ом, но при этом достичь еще и компромисса в части выходного импеданса транзистора в полосе рабочих частот, КПД и сложности реализации такого решения. Одними из способов противостоять этой тенденции, а также повысить выходной импеданс, является использование более высоких рабочих напряжений. Например, при рабочем напряжении 12 В сопротивление нагрузки при мощности 100 Вт лежит в пределах единицы и десятых долей ома, но при напряжении питания в 48 В значение сопротивления нагрузки становится уже более реалистичным и составляет 12 Ом. Поскольку GaN-

транзисторы, ввиду своей природы, могут работать на более высоких напряжениях, чем транзисторы на основе GaAs и транзисторы технологии LDMOS, это позволяет легко достичь более высокой мощности на более высоких рабочих частотах.

Вторая проблема — сведение к минимуму различных паразитных эффектов, что оказывается весьма важным аспектом, особенно для широкополосных решений. На более низких частотах в эквивалентной схеме полевого транзистора доминируют активные резистивные элементы, но на более высоких частотах доминируют уже входная  $C_{gs}$  и выходная  $C_{ds}$  емкости. Обе эти паразитные емкости приводят к уменьшению импеданса и повышению  $Q$  (добротности), что сказывается на ограничении полосы рабочих частот усилителя. Поскольку устройства, выполненные по технологии GaN, физически меньше по размерам, то они имеют и более низкие значения емкостей  $C_{gs}$  и  $C_{ds}$ . Это, в свою очередь, обеспечивает более высокий импеданс таких транзисторов на более высоких частотах, уменьшает  $Q$ , что и позволяет реализовывать на таких полупроводниковых устройствах революционные по широкополосности решения.

Около десяти лет назад разработчики военных радиостанций средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) были первыми, кто начал использовать транзисторы, выполненные по технологии GaN. Учитывая склонность к использованию в военных целях проверенных временем решений и технологий, это было несколько неожиданно. Впрочем, все это схоже с GaAs-революцией, которая была совершена несколько десятков лет назад. Только теперь уже GaN разрушил существующие рамки в части соотношения мощности и полосы рабочих частот, причем сделал это как раз вовремя, чтобы соответствовать требованиям новых программно-управляемых широкополосных радиостанций и средств подавления сигналов радиоуправляемых взрывных устройств. Несколько транзисторов технологии LDMOS могут быть заменены одним каскадом с транзистором на основе GaN, обеспечивая при этом сопоставимое с ними усиление, мощность, а во многих случаях — предлагая еще и более высокий КПД. Так что теперь конструкторы таких систем могут расширить область охвата частот и увеличить выходную мощность, причем сделать это в пределах уже существующих корпусов и при сопоставимых общих затратах.

Военные приложения, как и коммерческие, требуют все больше и больше бит/Гц для передачи широкополосного видео от оптических и радиолокационных датчиков. Беспилотные летательные аппараты, например, могут направить поток видео высокого разрешения — непосредственно или через спутник — для нужд военной операции, проводимой с использованием

подразделений сухопутных сил. Простые типы модуляции из прошлого уже не подходят для решения этой новой задачи, поэтому военные используют модуляцию OFDM и другие ее виды, аналогичные тем, что используются в коммерческих целях для передачи информации с высокой линейностью через компьютерные сети.

Сегодня современные программно определяемые модемы могут обеспечивать и поддерживать все необходимые цифровые предсказания или другие методы линеаризации, какие только возможны. Транзисторы, выполненные по технологии GaN, имеют мягкий режим компрессии и демонстрируют меньшее, чем это ожидалось, улучшение в части интермодуляционных искажений. Они не ведут себя так, как это следует из классической OIP3-модели, которая связывает уровни интермодуляционных искажений с выходной мощностью  $P_{out}$ , однако линейность вблизи области сжатия у них лучше, чем у GaAs-транзисторов и транзисторов технологии LDMOS. Поведение графика компрессии у GaN-транзисторов непрерывно и имеет плавную скругленную форму, причем, если смотреть с математической точки зрения, он сравнительно неплохо ведет себя в верхней рабочей области, где мощность и КПД являются самыми высокими. При правильном согласовании мгновенное значение мощности может превысить установленные функциональные возможности устройства, возрастая почти вдвое в радиолокационных станциях с использованием фазированных антенных решеток.

Благодаря цифровой компенсации эта слабая сторона GaN становится его ключевой особенностью, поскольку именно такая компенсация обеспечивает для приборов данной технологии наилучшие характеристики (из доступных на сегодня) на системном уровне. Так, устройства на базе GaN с использованием цифровой компенсации обычно показывают преимущества по базовой эффективности на 5% по сравнению с технологией LDMOS. Например, доступная эффективность усилителя мощностью в 100 Вт, работающего режиме АВ на частоте 2,5 ГГц, выполненного на GaN-транзисторах, может превышать 70%, в то время как лучшие на сегодня приборы технологии LDMOS должны еще побороться за то, чтобы достигнуть КПД в 60%. При правильном подходе в применении эта разность в достигаемом КПД может оказать большое влияние на системном уровне в военных, коммерческих и промышленных областях применения.

Несмотря на убедительные преимущества технологии GaN, более высокая конечная стоимость этих приборов часто замедляла их массовое внедрение. Иногда прибор на основе GaN стоил столько же, сколько 5–10 приборов, выполненных по более старой технологии LDMOS, что тормозило и ограничивало их прорыв в область коммерческого применения. Однако приборы технологии «нитрид-галлий на кремнии» (GaN-on-Si), предлагаемые компанией MACOM, являются достаточно выгодным вариантом для коммерческих приложений и рынков. Как только MACOM добьется переноса своей технологии GaN-на-Si на пластины больших размеров, переход на GaN уже в чисто коммерческих приложениях будет ускорен. Основные направления применения этой технологии — приборы медицинского назначения, замена магнетрона в микроволновых печах, системы беспроводной связи. Во всех этих областях очевидны преимущества высокой эффективности и широкой полосы рабочих частот, присущие приборам, выполненным на базе GaN.

### ТЕХНОЛОГИЯ БЕСПРОВОДНОГО ЗАРЯДА

Сегодня рынок беспроводного заряда находится на ранних стадиях своего развития. Пока мы видим использование этой технологии для зарядки микротелефонных гарнитур потре-

бительского класса с низким энергопотреблением, а основной рынок для беспроводной передачи электроэнергии и устройств ее сбора может похвастаться лишь опытными образцами. Когда мощность устройства измеряется в киловаттах эффективной излучаемой мощности, а физические размеры ограничены, то чем выше частота передачи мощности, тем меньше физические размеры передающей антенны. Здесь выбор GaN-технологии на частоте 2,45 ГГц при оптимальном для этой частоты размере антенны позволяет повысить эффективность на целых 10% по сравнению с использованием технологии LDMOS.

### ПЛАЗМЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

Существующий рынок для систем плазменного освещения с использованием высокочастотного возбуждения ограничен, в основном, использованием технологии LDMOS. Для создания плазменного освещения требуются не очень высокие частоты для возбуждения, обычно достаточно сотен мегагерц. Плазменный свет пока нерешительно вступает на общий рынок освещения, но он нашел свою нишу в агропромышленности, в частности в растениеводстве: поскольку фактическая цветочная температура плазменных источников освещения очень близка к температуре естественного солнечного света, данная технология отлично подходит для подсветки растений.

В настоящее время в стадии реализации находятся разработки в области плазменного освещения, направленные на увеличение частоты возбуждения до 6 ГГц и повышения эффективности, превышающей 70%. Это все достаточно сложно реализуется с использованием технологии LDMOS, но является естественным полем для технологии GaN. При более высоких плотностях мощности GaN габариты транзисторов могут быть уменьшены, что создает еще одно преимущество. Благодаря этому производители драйверов к системам плазменного внутреннего освещения, предназначенного на замену ламп накаливания, смогут успешно конкурировать на данном рынке с его нынешним лидером — системами светодиодного освещения.

### МИКРОВОЛНОВЫЕ ПЕЧИ

Попытки замены магнетрона были реализованы на прототипах с использованием LDMOS-технологии. Задачи, которые должны решить разработчики, направлены на достижение более высоких уровней эффективности. Они лежат между имеющимися возможностями и заменой магнетрона. Технология на базе GaN решает эту проблему и ликвидирует разрыв между современными LDMOS-модулями в части их КПД и желаемого целевого значения эффективности, а здесь требуется увеличение КПД не менее чем на 10%.

Технология GaN-на-Si компании MACOM предлагает уникальное преимущество эффективности технологии GaN в структуре затрат, обычной для кремниевой технологии. То есть замена магнетрона в масштабах всего рынка вполне может стать реальностью. Удачное решение технических проблем, таких как достижение КПД в 70% на частоте 2,45 ГГц, а также решение экономических вопросов позволяет вытеснить ламповую технологию, которая по-прежнему базируется на достижениях 1940-х годов и на связанных с ней усовершенствованиях в части производства, произошедших за годы ее использования. Таким образом, технология GaN-на-Si обеспечит новые преимущества, а именно — значительно более длительный срок эксплуатации таких систем, постоянство выходной мощности и управляемую зону нагрева. Базирующиеся на GaN-технологии СВЧ-печи будут иметь срок службы в десять раз больший, чем у современных моделей на базе магнетронов. ▀

<sup>1</sup> OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов. Является цифровой схемой модуляции, которая использует большое количество близко расположенных ортогональных поднесущих. — Прим. перев.