

Приборы на основе нитрида галлия

для преобразователей напряжения и частоты

В статье анализируется динамика рынка СПП и отмечается, что полевые GaN-транзисторы успешно вытесняют приборы на основе Si и конкурируют с приборами SiC в части наиболее технологичных применений СВЧ-связи, радиолокации, электропривода, а также в преобразователях напряжения и частоты. Приведены характеристики материалов и свойств GaN-приборов. Выполнено сравнение характеристик GaN-транзисторов и MOSFET-транзисторов, а также их сборок применительно к преобразователям напряжения и показаны преимущества первого типа приборов и сборок. Практически все ведущие фирмы мира, занятые в области производства СПП, освоили и успешно выпускают GaN-приборы и их сборки на диске диаметром 200 мм, с диапазоном напряжений до 1400–1600 В. Диапазон рабочих частот достигает 3,5 ГГц, а выходная мощность — 2000 Вт.

Роберт Шульга, к. т. н.

rnshulga@vei.ru

Анализ рынка приборов СПП

Рынок приборов СПП развивается весьма динамично, причем приборы на основе SiC вытесняют приборы на кремнии, а приборы на основе GaN вытесняют SiC. Основными критериями выбора приборов и преобразователей являются удельная мощность и КПД,

прямое сопротивление и обратное напряжение, теплопроводность, температурная и радиационная стойкость. Наибольшая динамика рынка проявляется в области дискретных приборов. Так, по данным [1], ранее наиболее устойчивая область кремниевых LDMOS-транзисторов неуклонно вытесняется GaAs- и GaN-транзисторами. На рис. 1 показана доля в мировом объеме (%) LDMOS-транзисторов, вытесняемых GaS- и GaN-транзисторами в интервале 2015–2025 гг. [1].

Более полная картина распределения рынка СПП отражена на рис. 2. Здесь представлена зависимость всего спектра приборов СПП в виде процента объема рынка СПП от прогнозируемого роста на протяжении пяти лет начиная с 2012 года. Общий объем рынка в 2012 году составляет \$12 млрд. Видно, что низковольтные приборы (ниже 200 В) занимают лидирующие позиции (примерно 40% рынка). Полевые транзисторы напряжением выше 200 В и модули на IGBT занимают примерно 20% объема рынка. Силловые модули на кремниевых полевых транзисторах и IGBT пока не уступают своей доли [2, 3].

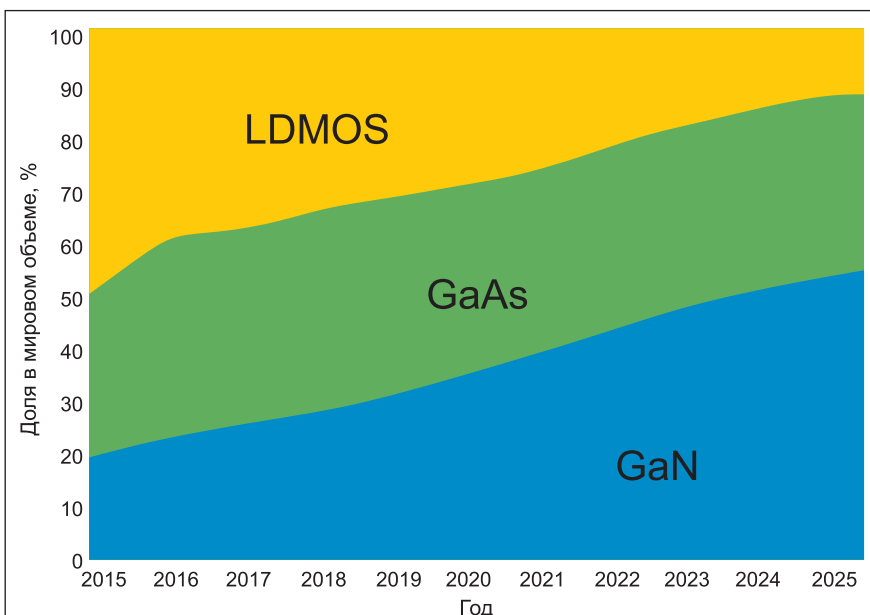


Рис. 1. Доля в мировом объеме (%) LDMOS-транзисторов, вытесняемых GaS- и GaN-транзисторами в интервале 2015–2025 гг. [1]

Характеристики GaN

GaN получают в виде желтого порошка или бесцветных кристаллов методом прямого синтеза N и Ga в атмосфере азота при давлении 100 атм и температуре +750 °С. Этот тугоплавкий и твердый материал имеет кристаллическую структуру, высокую теплоемкость и теплопроводность (выше 130 Вт/мК), растворяется в воде, температура плавления превышает +2500 °С. Характеристики GaN приведены

в [4]. Наиболее характерные показатели следующие:

- ширина запирающей зоны, эВ: 3,5–3,2–1,4–1,1 (соответственно GaN-SiC-GaS-Si);
- подвижность электронов, см²/Вс: 2000–700–8500–1350;
- теплопроводность, Вт/мК: более 1,5–4,9–0,5–1,5 (соответственно для GaN-SiC-GaS-Si).

В настоящее время GaN используется в таких областях, как светодиоды, полупроводниковые лазеры, СВЧ-транзисторы. Наибольшее распространение материал получил в виде синих и УФ-светодиодов для детекторов УФ и высокоскоростных транзисторов. ВЧ и высокоомощные приборы являются основой СВЧ-усилителей и мощных коммутаторов. Особую значимость их применение имеет в прямо-передающих модулях активных фазированных антенных решеток (АФАР). В результате сегодня GaN-приборы очень востребованы в беспилотном транспорте, робототехнике, СВЧ-связи, искусственном интеллекте и нейронных сетях.

Динамика освоения GaN-приборов и основные проблемы

В настоящий момент подавляющая часть рынка остается за кремниевыми полупроводниками. Однако за последние несколько лет резко увеличивается доля силовых элементов, построенных на основе нитрида галлия (GaN) и карбида кремния (SiC). Объем продаж GaN- и SiC-транзисторов к 2016 году составлял \$500 млн за счет новых производителей, например EPC (Efficient Power Conversion, США). Компания EPC во главе с А. Лидовым сумела за несколько лет решить все технические проблемы и создать уникальную структуру транзисторов eGaN FET, что позволило EPC стать лидером данного сегмента рынка.

Важной для применения остается зависимость удельного сопротивления от напряжения пробоя для различных СПП, приведенная на рис. 3 [5]. Для каждого из приборов такая характеристика практически линейная. Однако при одном и том же значении напряжения сопротивление GaN оказывается значительно ниже.

В результате GaN-транзисторы имеют на порядок большую удельную мощность, что должно приводить к значительному уменьшению габаритов по сравнению с элементами Si и даже SiC.

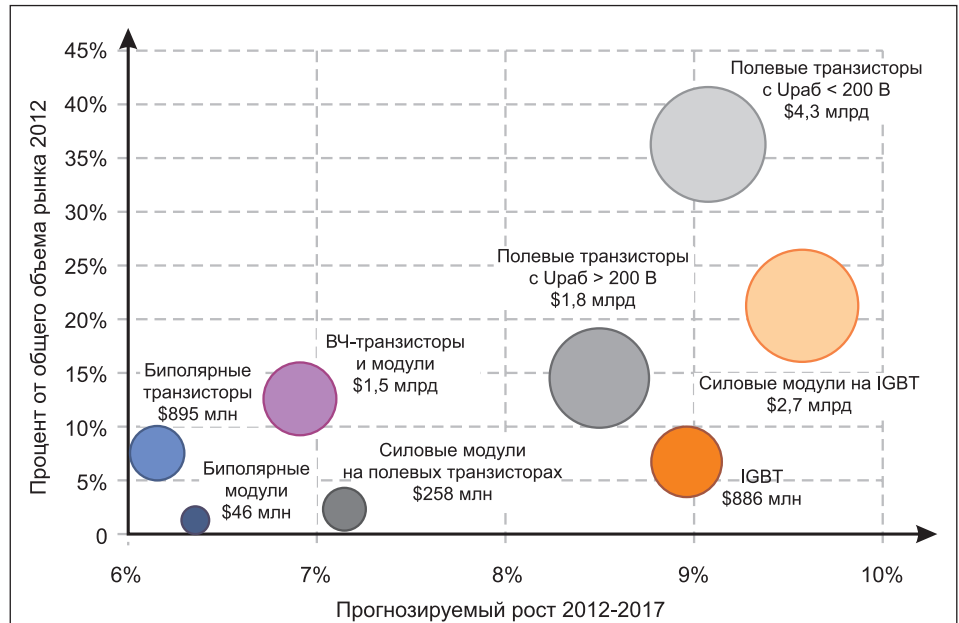


Рис. 2. Структура рынка СПП (%) от общего объема за 5 лет, начиная с 2012 года

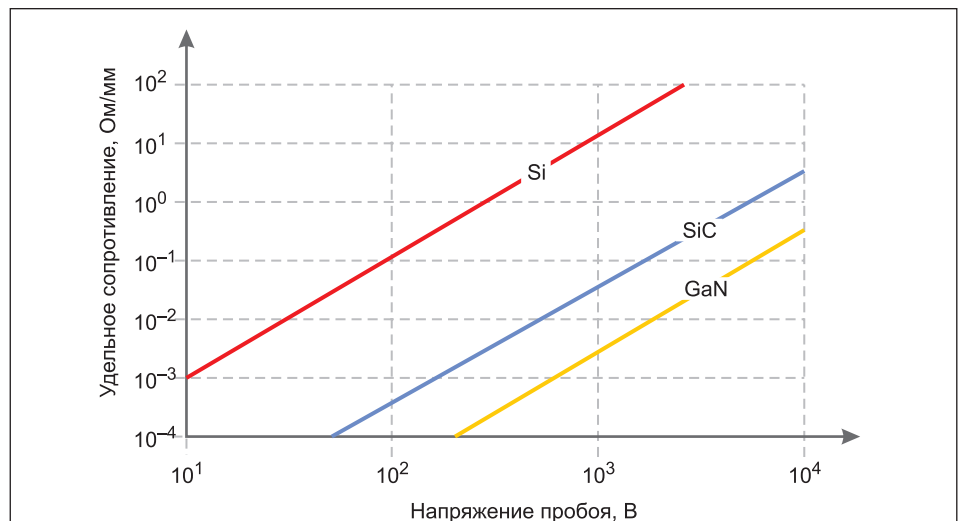


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления от напряжения пробоя для различных полупроводников [5]

Анализ технических проблем реализации GaN-приборов

Одна из проблем — нормально открытая проводимость традиционной ячейки GaN-транзистора, приведенная на рис. 4а [5].

На кремниевой подложке выращивается защитный слой AlN. На нем формируется гетероструктура GaN/AlGaIn. Далее создаются защитный диэлектрический слой и электроды.

Слои GaN и AlGaIn имеют полярную природу, из-за которой в процессе роста на их

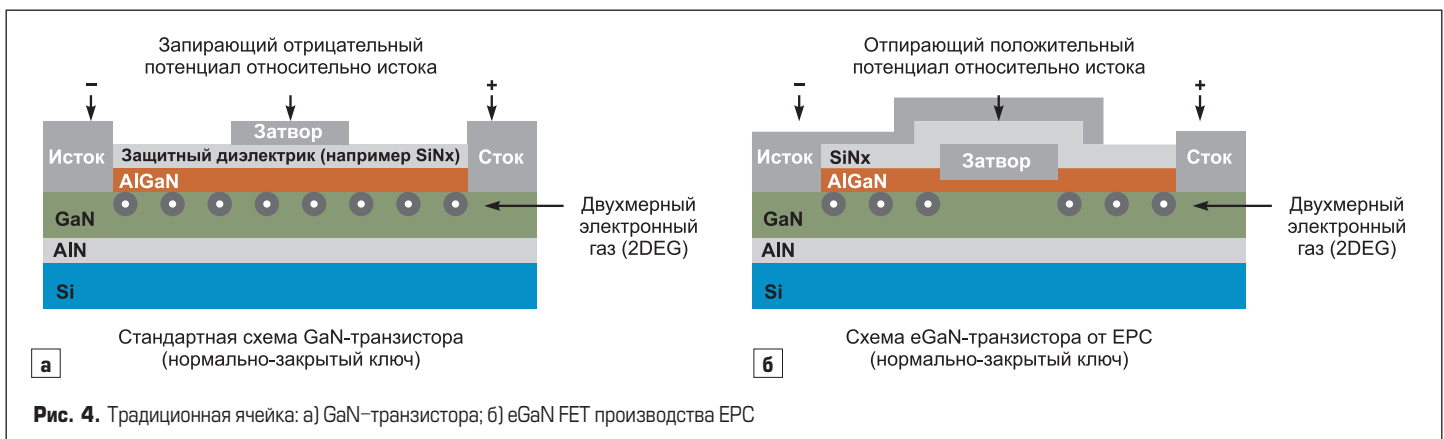


Рис. 4. Традиционная ячейка: а) GaN-транзистора; б) eGaN FET производства EPC

границе происходит спонтанная поляризация с образованием поверхностных зарядов. Кроме того, слой GaN обладает выраженными пьезоэлектрическими свойствами, так что под действием деформации и механических напряжений слой дополнительно поляризуется. Поскольку решетки GaN и AlGaN имеют разную структуру, такие напряжения неизбежно возникают на границе их раздела [6]. В результате процессы поляризации вызывают формирование заряда в виде двумерной плоскости (двухмерный электронный газ, 2DEG).

При подаче напряжения на электроды стока и истока базовой ячейки (рис. 4а) через них начнет протекать ток, даже если напряжение на затворе равно нулю. Чтобы прекратить протекание тока на затвор, необходимо подать отрицательное напряжение относительно истока, как показано на рис. 4а.

Такой нормально открытый транзистор весьма неудобен в использовании. Для того чтобы избежать выгорания схемы, необходимо до включения питания обеспечить выключение транзистора и иметь дополнительный источник отрицательного напряжения.

Для эффективного отвода тепла от слоя GaN необходимо и наличие подложки, а все стандартные материалы (Si, SiC, сапфир) имеют разные структуры кристаллических решеток для сопряжения с GaN. Чтобы снизить механические напряжения, вводят дополнительные согласующие слои. Аналогично добавляются и слои между другими разнородными материалами ячейки. В результате структура оказывается сложной [7].

В компании EPC были проведены исследования и предложена остроумная улучшенная структура ячейки транзистора, которая получила название eGaN FET (Enhancement Mode), приведенная на рис. 4б [5]. Основные изменения коснулись формирования затвора и подзатворной области. В этой ячейке под затвором формируется обедненная область AlGaN, поэтому поляризации GaN не происходит и формируется разрыв области электронного газа 2DEG.

Транзистор оказывается нормально закрытым прибором. Чтобы сформировать прово-

дящий канал между стоком и истоком, необходимо приложить к затвору положительное напряжение относительно истока. В итоге работа eGaN-транзистора абсолютно идентична работе обычного MOSFET-транзистора.

Сопоставление GaN- и MOSFET-транзисторов

Сопротивление открытого прибора R_{cu} (мОм) — одна из важнейших характеристик, определяющая его потери. Типовое значение сопротивления близко для серийных образцов обоих типов транзисторов с учетом определенных особенностей.

Транзистор GaN имеет более стабильные характеристики. Для него значение R_{cu} в диапазоне температур +25...+125 °C изменяется примерно в 1,4 раза, в то время как сопротивление транзистора MOSFET меняется более чем в 2,2 раза.

Кроме того, зависимость сопротивления R_{cu} от максимального рабочего напряжения у GaN значительно слабее, чем у MOSFET. Это связано с тем, что увеличение длины канала стока-исток не так критически сказывается на величине сопротивления. Например, сопротивление 30-В транзистора EPC2023 составляет 1,3 мОм, а 200-В транзистора EPC2034 — всего 10 мОм.

Емкость C определяет быстродействие транзистора. Предложенная на рис. 4б плоская структура eGaN FET имеет минимальные значения емкостей CGD и CDS. Это позволяет коммутировать напряжения в сотни вольт с гигагерцевой частотой и уменьшать габариты преобразователей напряжения.

Пороговое напряжение затвор-исток $U_{зи пор.}$ В, составляет для GaN всего 0,7–2,5 В, что кажется достоинством прибора из-за сокращения потерь мощности на управлении, но приводит к большим входным токам. Кроме того, низкое $U_{зи пор.}$ уменьшает стойкость транзистора к изменениям dv/dt . Следует иметь в виду, что максимальное значение напряжения на затворе GaN-транзистора составляет, как правило, всего +6 В/–4 В.

Входное сопротивление затвора R_g Ом, определяет скорость перезаряда входной

емкости. Для GaN данное сопротивление достаточно мало, что приводит к высокому быстродействию и улучшению защиты dv/dt . В то же время значения входных токов увеличиваются, а значит — растет и мощность управления.

Предложенная схема GaN-транзистора не имеет обратного диода как такового, поскольку есть механизм обратной проводимости, который выполняет его функцию. При этом при обратном направлении тока не происходит накопления неосновных носителей, в отличие от MOSFET-транзистора. Следовательно, потери на запирающие обратного диода в GaN-транзисторе отсутствуют.

Таким образом, GaN-транзистор имеет отличные электрические характеристики, но все еще уступает MOSFET в плане удобства управления. Поэтому в настоящее время данный тип силового ключа имеет преимущество перед MOSFET не во всех случаях. Однако уже сейчас можно выделить перспективные приложения для GaN-транзисторов: DC/DC-преобразователи для различных приложений, усилители мощности класса D, инверторы, системы беспроводной передачи мощности, лидары, системы подстройки питания ВЧ-усилителей (Envelope Tracking), системы с повышенной температурной и радиационной стойкостью.

Вопросы радиационной стойкости GaN-транзисторов производства EPC достаточно подробно показаны в [1]. Там же отмечены проблемы совместимости структур GaN и Si, проявляющиеся в двух аспектах, которые удалось преодолеть разработчикам приборов.

Из-за того что постоянные кристаллических решеток этих материалов различаются (для Si постоянная равна 3,85, а для GaN — 3,19), возникают механические деформации примыкающих слоев. Эти деформации должны укладываться в допуск 0,1%, но в реальности достигают 14%. Кроме того, коэффициенты термического расширения материалов существенно различаются, и для GaN заметно превышает значение для Si, что приводит к короблению слоев этих материалов. Решение проблем было достигнуто как использованием

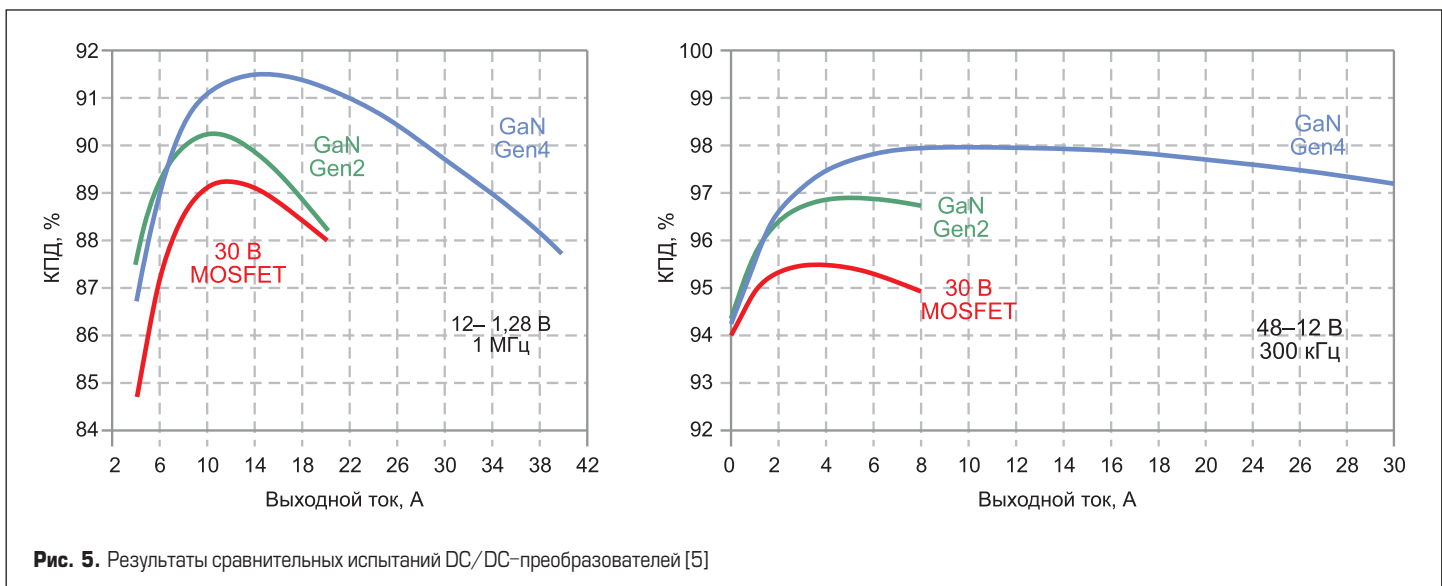


Рис. 5. Результаты сравнительных испытаний DC/DC-преобразователей [5]

буферных слоев, так и заменой подложки Si слоем ALN.

В качестве демонстрации преимуществ использования GaN-транзисторов можно привести результаты их опытных испытаний в компании EPC [7]. Были построены и исследованы DC/DC-преобразователи 12/1,2 В с рабочей частотой 1 МГц и 48 В/12 В с рабочей частотой 300 кГц, которые приведены на рис. 5. Из этих графиков видно, что при увеличении рабочих частот и выходных токов преимущество преобразователей на GaN-транзисторах перед преобразователями на MOSFET-транзисторах возрастает. Наилучшие результаты продемонстрировали GaN-транзисторы четвертого поколения: для первого преобразователя максимальный КПД составил более 91%, а для второго — более 98%. Это значительно выше показателей альтернативного DC/DC на MOSFET-транзисторах.

Следует отметить, что EPC постоянно совершенствует технологии и конструкцию своих элементов. За семь лет было создано четыре поколения силовых компонентов. В настоящее время выпускаются представители двух поколений: Gen2 и Gen4, которые имеют обратную совместимость с более ранними разработками, представленными на рис. 5.

Интегральные сборки DC/DC-преобразователя на GaN-транзисторах

Использование интегральных сборок вместо дискретных компонентов имеет ряд преимуществ, связанных как со снижением габаритов и стоимости, так и с повышением частоты. Более компактная конструкция в виде сборки отличается минимальными значениями паразитных индуктивностей и емкостей, что дает дополнительные преимущества на более высоких частотах. На рис. 6 показано преимущество сборок DC/DC-преобразователя на GaN-транзисторах на высоких частотах. Видно, что дискретный и интегральный полумост на частоте 1 МГц достигают КПД 91–92%, в то время как на частоте 4 МГц КПД снижается до 80–82%.

Линейку силовых компонентов производства компании EPC составляют три основные группы [5]:

- дискретные силовые eGaN FET;
- eGaN FET для ВЧ-приложений;
- интегральные сборки eGaN FET.

Все представленные силовые ключи имеют малое сопротивление. Рекордное R_{cu} составляет 1,3 мОм для EPC2023 — ключа 30 В. При этом зависимость сопротивления от рабочего напряжения внутри данного сегмента оказывается не такой сильной, как в MOSFET.

Максимальные среднеквадратичные токи данной группы элементов в большинстве случаев составляют десятки ампер, а импульсные токи — десятки и сотни. Несмотря на столь внушительную мощность, все транзисторы выполнены в миниатюрных корпусах, наиболее крупным из которых является LGA 6,1×2,3 мм, а наиболее компактным — LGA 0,9×0,9 мм.

Группа eGaN FET EPC800x предназначена для работы в субгигагерцевом диапазоне.

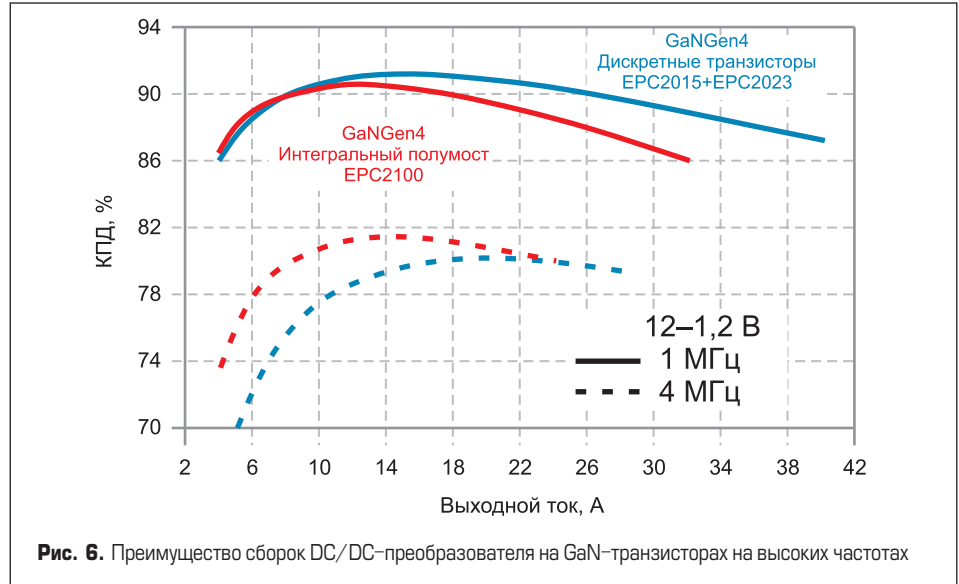


Рис. 6. Преимущество сборки DC/DC-преобразователя на GaN-транзисторах на высоких частотах

Именно в ВЧ-приложениях GaN-транзисторы с самого начала завоевали господствующее положение. Эти транзисторы предназначены для ключевых схем с жесткими режимами переключения силовых ключей и рабочими частотами от десятков до сотен МГц.

В настоящее время доступны EPC800x с рабочими напряжениями 40–100 В. Корпусное исполнение для всех представителей группы одинаково — LGA 2,1×0,85 мм.

Основными приложениями для EPC800x стали системы подстройки питания ВЧ-усилителей (Envelope Tracking) и системы беспроводной передачи мощности. На рис. 7 приведена внутренняя схема eGaN FET-сборок [5].

Группа интегральных сборок eGaN FET содержит шесть компонентов с рабочими напряжениями 30–100 В, причем все сборки представляют собой полумостовые схемы вида рис. 7.

Интегральные сборки eGaN FET могут иметь симметричную и несимметричную структуру. В симметричной конфигурации размеры кристаллов транзисторов обоих плеч равны. Соответственно, сопротивления верхнего и нижнего ключа одинаковы. Такая схема подходит для усилителей класса D, приводов электродвигателей, в которых оба транзистора имеют равный нагрузочный диапазон.

В асимметричной конфигурации размер кристалла верхнего транзистора примерно в четыре раза меньше, чем нижнего, а их сопротивления тоже различны. Такая асимметрия выгодна, например, для DC/DC-преобразователей, работающих при малых длительностях импульсов, при больших разностях между входным и выходным напряжениями. В данных случаях нижний ключ оказывается нагруженным значительно больше, чем верхний ключ.

Освоение высоковольтных GaN-транзисторов повышенной мощности

Как отмечается в [1], все ведущие мировые производители СПП, в число которых входят EpiGaN, IMEC, AIXTRON и другие, начинают выпуск GaN-транзисторов и сборок на их основе на диаметрах диска 200 мм.

В 2018 году компания ALLOS Semiconductor выпустила GaN-транзисторы напряжением 1400–1600 В на диске 200 мм с толщиной слоя GaN на подложке Si 30 мкм, то есть на уровне напряжений, превышающих 600 и 1200 В.

Компания Navitas Semiconductor и фирма TSMC выпускают микросхемы и дискретные приборы марки AlGaN, которые в сравнении с приборами на Si обеспечивают повышение быстродействия в 100 раз, пятикратное повышение удельной мощности, повышение КПД на 40%, а снижение стоимости на 20%.

Фирмы STM и MACOM в 2018 году заменяют выпуск LDMOS-транзисторов на кремнии на GaN-приборы с целью освоить рынок осветительных приборов и обеспечить плазменное зажигание автомобилей, СВЧ-печей и других устройств. Было освоено производство мощных GaN-приборов, ИС, светодиодов. GaN-приборы с диаметром диска 200 мм уже успешно конкурируют с приборами на SiC.

С другой стороны, как отмечается в [9], GaN-приборы успешно конкурируют с GaAs-приборами, обеспечивая повышение удельной плотности мощности в 5 раз и снижение размера корпусов на 80%. В результате GaN-приборы мощностью более 100 Вт начинают осваивать миллиметровый диапазон и используются в сетях связи, радарх, лидарах.

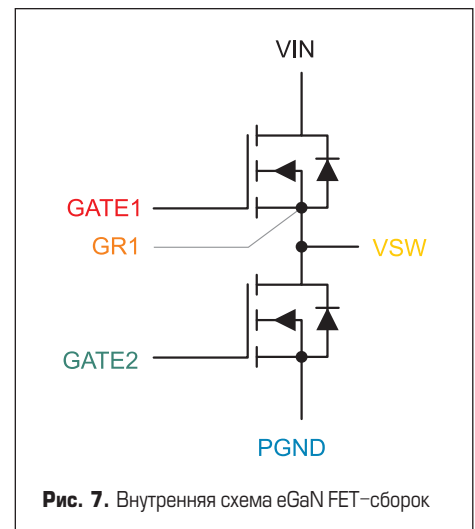


Рис. 7. Внутренняя схема eGaN FET-сборки

Одна из ведущих фирм, Microsemi, начав выпуск GaN-приборов еще в 2010 году, сейчас выпускает радиационно стойкие GaN-приборы напряжением 40–200 В [10]. Их прямое сопротивление варьируется в пределах 4–100 мОм, что обеспечивает значительное повышение КПД. Благодаря компактности и низкому значению паразитных емкостей коммутационные потери снижены в два раза по сравнению с приборами на Si. Температурная стойкость повышена до +300 °С. Диапазон рабочих частот составляет 10 МГц — 3,5 ГГц, а выходная мощность приборов находится в диапазоне 10–2000 Вт, что обеспечивает широкое применение в радарх и СВЧ-связи. Обратное напряжение приборов достигает 300 В, а удельная мощность — 10 Вт/мм ширины затвора, что на порядок выше относительно GaAs-приборов.

Литература

1. Боднар Д. Нитрид галлия — премьер среди новых материалов полупроводниковой микроэлектроники // Компоненты и технологии. 2018. № 4.
2. www.epc-co.com/epc/Markets.aspx
3. Шульга Р. Н. Рынок силовой электроники (динамика и тенденции развития) // Энергия единой сети. 2021. № 5, 6.
4. Шульга Р. Н. Приборы на основе карбида кремния — основа преобразователей для электроэнергетики // Силовая электроника. 2021. № 6.
5. Мощные нитрид-галлиевые транзисторы от EPC — конец эры кремния? www.compel.ru/
6. Lidow A., PhD., Strydom J., PhD. WP001 Gallium Nitride (GaN) Technology Overview. EPC, 2012.
7. Федоров Ю. Широкозонные гетероструктуры (Al, Ga, In) N и приборы на их основе для миллиметрового диапазона длин волн // Электроника НТБ. 2011. № 2.
8. Lidow A., PhD., Reusch D., PhD. AN017 Fourth Generation eGaN FETs Widen the Performance Gap with the Aging MOSFET. EPC, 2014.
9. Комбс Э. Информация по применению серии AN-007. www.microwave-e.ru/
10. Нитрид-галлиевые транзисторы. www.inquest.ru/