



Расширение использования мощных SiC- и GaN-приборов

Ключевые слова: GaN, SiC, запрещенная зона, кремний, мощные приборы, силовая электроника.

Похоже, кремниевые технологии в ряде применений подходят к физическим пределам своего использования. В области мощных полупроводниковых приборов и некоторых других применениях все активнее используются альтернативные технологии, основанные на использовании нитрида галлия (GaN) и карбида кремния (SiC).

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ SiC-ПРИБОРОВ

Третье поколение полупроводниковых приборов на основе SiC обеспечивает сочетание роста производительности и практических преимуществ во все большем числе применений. Но с ростом темпов инновационного процесса в таких секторах, как электромобили, возобновляемые источники энергии и технологии 5G, разработчики все чаще ищут новые решения и стараются добиться большего от силовых технологий для удовлетворения потребительского и промышленного спроса.

Составные части карбида кремния, углерод и кремний, – это, соответственно, четвертый и восьмой по распространенности элементы. Несмотря на это, SiC редко формируется естественным образом – в метеоритах и отложениях некоторых горных пород находят лишь мельчайшие следы его присутствия. Однако его можно довольно легко получить синтетическим путем, и уже более века он используется в качестве абразива (карборунд). В электронике карбид кремния применялся в качестве детектора в ранних радиоприемниках, а первый светодиодный эффект был получен в 1907 г. с использованием кристалла SiC.

В силовой электронике SiC известен как полупроводник с широкой запрещенной зоной (wide bandgap, WBG), произведший революцию в производительности силовых приборов, обеспечив показатели эффективности, ранее недостижимые на высоких частотах, что, в свою очередь, обеспечило дальнейшие преимущества в области связанных пассивных компонентов, особенно магнетиков. Применение SiC обеспечивает снижение стоимости, веса и размера мощных полупроводниковых приборов и изделий силовой электроники.

SiC-FET-каскады способствуют формированию WBG-модулей

На уровне третьего поколения SiC полевые транзисторы (FET), как каскадная компоновка кремниевых МОП полевых транзисторов (Si-MOSFET) и SiC полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом (JFET), вышли на передний край технологии WBG-приборов. Они обладают лучшими показателями добротности по относительному сопротивлению площади кристалла во включенном состоянии ($R_{\text{DS(on)*A}}$) и относительному сопротивлению в выключенном состоянии ($R_{\text{DS(on)*EOSS}}$) – основным по-



МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА

Смелое заявление о том, что стоимость ЭКБ на основе SiC и GaN сопоставима или приближается к ценам Si ЭКБ, ошибочно: сегодня стоимость SiC- и GaN-приборов примерно в 2–3 раза выше в сравнении со стоимостью самых передовых Si-приборов (SJ-MOSFET и IGBT), близких к ним по характеристикам. При этом современное состояние и развитие технологии изготовления пластин под эти приборы не позволяют разделить оптимизм в снижении стоимости SiC и GaN ЭКБ, по крайней мере, в ближайшем будущем.

Рынки применения SiC и Si в целом поделены и серьезной конкуренции на них сейчас не наблюдается. В проекции «функциональность-цена» SiC-приборы могут конкурировать в области пробивных напряжений более 1000 В только с Si IGBT и в области 600-1000 В с GaN/Si-приборами. При этом SiC-приборы преимущественно нацелены на промышленные рынки (возобновляемая энергетика, электропоезда, промышленные электродвигатели и др.), где ключевыми факторами являются функциональность и надежность, а не стоимость, в то время как более дешевые Si-приборы ориентированы на потребительские рынки. В этом сегменте SiC ЭКБ главным образом применяется при создании узлов питания для электромобилей, где наблюдается конкурентная борьба с GaN-приборами.

Что касается значимых характеристик SiC-транзисторов, то более весомыми для повышения их КПД являются не показатели низкого сопротивления во включенном и выключенном состоянии, приведенные в статье, а показатели, определяющие потери на время переключения, которые, к сожалению, не упоминались.



Помимо описанных в статье приборных технологий на новых полупроводниковых соединениях, в последнее время интенсивно развивается направление по созданию СВЧ монолитных ИС на основе гетероструктур GaN на подложках высокоомного кремния. Это целый класс микросхем, не только востребованных в развитии современных средств телекоммуникаций и радиолокации, но и конкурентоспособных по цене с СВЧ микросхемами на основе арсенида галлия, при этом значительно превосходящие последних по параметрам и эксплуатационным характеристикам.

*Петр Панасенко, доктор технических наук,
заместитель генерального директора
АО «НИИМЭ» по разработке СВЧ ЭКБ*

казателям низкой проводимости и потерь при переключении.

В абсолютном выражении сопротивление SiC-FET во включенном состоянии составляет менее 7 мОм для приборов с рабочим напря-

жением 650 В и менее 10 мОм при номинальном напряжении 1200 В, при этом цены на SiC начинают приближаться к ценам на Si. При параллельном размещении SiC-приборов в модуле могут быть достигнуты еще лучшие



характеристики – недавно фирма UnitedSiC продемонстрировала модуль в корпусе SOT-227 с общим сопротивлением 1200 вольтового прибора в 2 мОм (рис. 1).

Основное применение SiC FET – это замена Si-MOSFET и биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). Существующие приложения, особенно с IGBT, могут иметь низкие частоты переключения, но новые конструкции способны использовать преимущества высокой частоты и скорости передачи данных SiC FET – как это реализуется в представленных модулях DFN8x8. Они имеют значительно уменьшенную индуктивность, что делает их идеальным для жестких и мягких (переключение с разнесением – мягкое переключение в момент смены частот) коммутационных применений, таких как LLC-преобразователи и полномостовые преобразователи со сдвигом фаз.

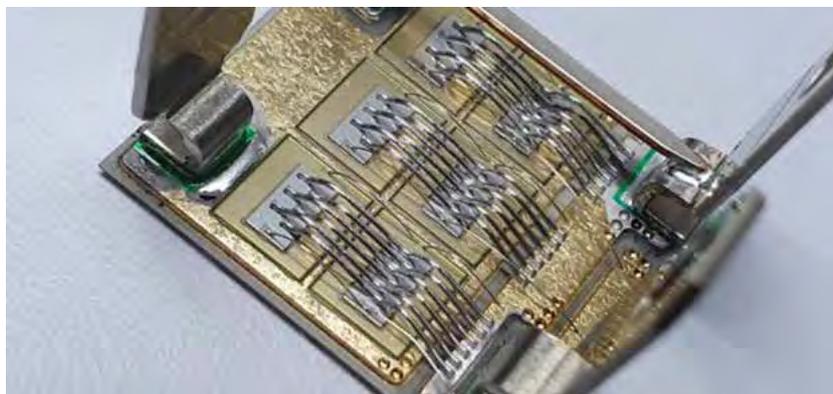
Современное применение SiC-FET

SiC-FET в качестве прямой замены IGBT и Si-MOSFET используются для модернизации электромоторов, в инверторах источников бесперебойного питания, сварочных аппаратах, мощных AC–DC и DC–DC преобразователях и т. д. В случае электромоторов и электроприводов их эффективность может быть мгновенно повышена без изменения частоты переключения. При этом уменьшаются статические и динамические потери как в канале,

так и в цепи драйвера затвора, т. е. там, где при использовании IGBT и Si-MOSFET происходит значительное рассеивание мощности.

Специалисты корпорации UnitedSiC (Монмут-Джанкшен, шт. Нью-Джерси, США) указывают, что, как правило, компоненты драйвера затвора будут регулироваться с помощью простых изменений. Можно рассмотреть и другие преимущества, такие как уменьшение размера демпфирующих устройств и даже отказ от коммутирующих диодов, которые необходимы в IGBT-приводах, но могут быть успешно заменены эффектом паразитного (внутреннего) диода (body diode effect) на корпусе SiC-FET. В таких применениях, как инверторы двигателей электромобилей, необходимо добиться повышения эффективности. Если частота при использовании SiC-FET по сравнению с IGBT-решениями увеличивается, двигатели электромобилей смогут работать более эффективно и плавно. В промышленных и автомобильных приводах повышение эффективности направлено на удовлетворение насущных потребностей – уменьшение размеров и увеличение пробега электромобиля без подзарядки.

Зарядные устройства электромобилей, как бортовые, так и стационарные, также используют SiC-FET. Здесь режим работы на высоких частотах с малыми потерями позволяет обходиться в выходных фильтрах меньшим



Источник: UnitedSiC

Рисунок 1. Модуль SOT-227 с шестью SiC-FET: напряжение 1200 В, сопротивление 2 мОм

объемом магнитных материалов, что также позволяет снизить вес, размер и стоимость. Применение SiC-FET вместо IGBT в придорожных быстрых зарядных устройствах, работающих на уровне 100 кВт и более с выходами постоянного тока 400 или 800 В, также способствует увеличению эффективности. Дискретные устройства SiC-FET, распараллеленные по мере необходимости, часто практичнее и дешевле, чем дорогостоящие IGBT-модули. В целом экономятся финансы и энергия.

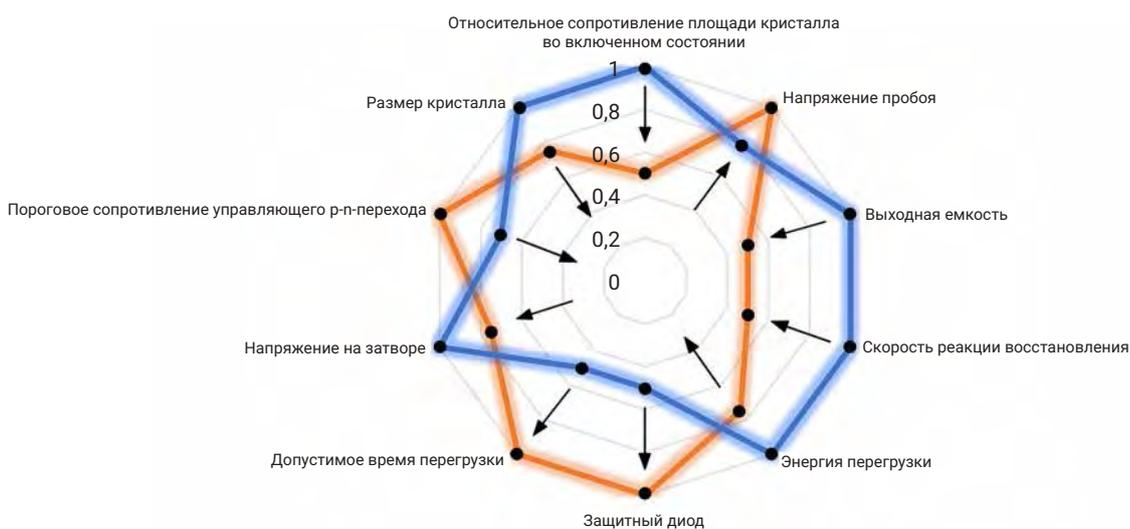
Будущее SiC-FET

Производительность SiC-FET впечатляет, однако разработчики всегда хотят большего – конечные потребители постоянно требуют дальнейших мер по снижению энергопотребления и затрат при одновременном расширении функциональности. Быстро растущие рынки применения SiC-FET – это инфраструктура сетей 5G, электро- и гибридные автомобили, средства генерации энергии из возобновляемых источников и ЦОД. Во всех случаях технология SiC-FET следующего поколения будет играть определенную роль в достижении еще более высокой производительности.

Для улучшения параметров SiC-приборов разработана маршрутная карта, определяющая

способы достижения цели и возможные компромиссы (рис. 2). Все эти улучшения теоретически достижимы, и можно ожидать их появления по мере дальнейшего развития технологии. Отметим, что улучшение параметров не всегда связано с уменьшением потерь, хоть это и важно. В плане улучшения характеристик большое значение также имеют увеличение физической прочности и устойчивости к короткому замыканию, достижение более высоких значений пробивного напряжения и снижение теплового сопротивления корпуса (для облегчения охлаждения и повышения надежности). Разработчики корпорации UnitedSiC предполагают, что существует также возможность усовершенствования конструкции корпусов и ячеек SiC-FET, что приведет к ожидаемому снижению $R_{DS(on)*A}$ и сокращению площади кристалла. Все это уменьшает емкостное сопротивление кристалла и, как следствие, динамические потери.

Также в рамках SiC-технологии расширяется применение JFET – они обладают явными преимуществами в качестве твердотельных автоматических выключателей и ограничителей тока из-за своего относительного сопротивления во включенном состоянии. Технология SiC обеспечивает экстремальную устойчивость



Источник: UnitedSiC

Рисунок 2. Основные характеристики SiC-FET и тенденции их эволюции (синий – настоящее время, оранжевый – потенциальная перспектива)



к высоким пиковым температурам перехода и обеспечивает низкое сопротивление во включенном состоянии с четко определенным током насыщения и быстрым переключением. Как автоматические выключатели SiC-JFET могут переключаться в тысячи раз быстрее, чем традиционные механические аналоги, при этом вносимые потери остаются низкими.

Корпусирование

Использование SiC-FET позволяет создавать новые применения с более высокими мощностью и частотой переключения, чем кремниевые приборы. Корпусные решения для SiC-FET охватывают широкий круг типоминиатюр. Например, в корпусах TO-247 SiC-FET все чаще заменяют IGBT и Si-MOSFET. То же

самое происходит и в области мощных приборов в корпусах TO220-3L. Для поверхностного монтажа SiC-приборы обычно предлагаются в популярных корпусах D2PAK-3L и D2PAK-7L, а также в низкопрофильных корпусах DFN8x8 корпорации UnitedSiC. Модули, использующие SiC-FET-кристаллы, получают все большее распространение в приложениях 6000 В и выше, а также в этажированных «суперкаскодах». Подобные модули используются в быстрых зарядных устройствах типа MV-XFC, электрической тяге электро- и гибридных автомобилей, твердотельных трансформаторах, средствах генерации электричества на основе возобновляемых источников энергии, высоковольтных средствах прямого тока (HVDC) [1].

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ GAN-ПРИБОРОВ

На протяжении более чем 40 лет, по мере внедрения инноваций в MOSFET-структуры, эффективность приборов управления режимом электропитания росла, а их цена снижалась – технология шла в ногу с ростом потребностей в электроэнергии. Но в новом тысячелетии темпы совершенствования резко замедлились – по мере приближения мощных MOSFET к теоретическому пределу улучшения возможностей. В то же время альтернативный материал, GaN, неуклонно движется к собственным пределам, которые в 6000 раз выше, чем у кремниевых MOSFET и в 300 раз выше, чем у лучших GaN-продуктов, доступных на рынке в настоящее время (рис. 3).

Корпорация EPC производит полевые GaN-транзисторы с расширенными возможностями (eGaN) уже более 10 лет. Ее приборы 5-го поколения вдвое меньше предшественников 4-го поколения, но при этом обладают вдвое большим быстродействием, а по цене сопоставимы с MOSFET. Начальный успех мощных транзисторов и ИС на основе GaN был обусловлен преимуществами быстродействия GaN по сравнению с кремнием. Действительно, транзисторы типа «GaN-на-кремнии» пере-

ключаются примерно в 10 раз быстрее, чем MOSFET и в 100 раз быстрее IGBT.

Первыми массовыми применениями, в полной мере реализовавшими высокую коммутационную способность GaN, стали такие приложения, как средства отслеживания РЧ-огляющих для 4G/LTE базовых станций и лидарные системы для автономных транспортных средств, роботов, БПЛА и систем безопасности. Благодаря коммерческому успеху этих приложений объемы производства мощных GaN-приборов значительно выросли. Теперь эти приборы находятся в точке, где их цены эквивалентны ценам более крупных MOSFET-компонентов эквивалентной номинальной мощности с меньшей скоростью переключения.

Ускорение освоения GaN мощных приборов

Достижение точки ценовой конкурентоспособности с более традиционными и массовыми MOSFET позволило проектировщикам источников питания шире использовать eGaN полевые транзисторы. Дополнительным стимулом стало то, что они обеспечивают более высокую плотность мощности и позволяют создавать более эффективные источники 48-вольтового постоянного тока. Такие источники, с точки зре-

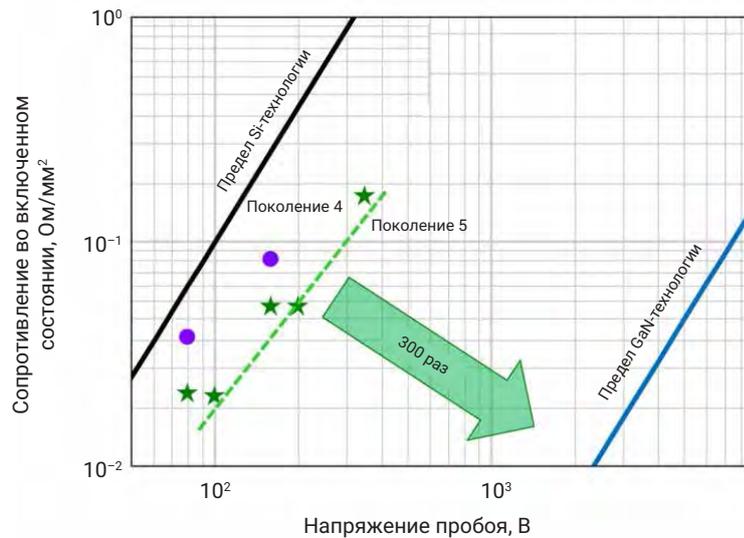


Рисунок 3. Сравнение теоретического сопротивления во включенном состоянии и пробивного напряжения кремниевых и GaN-приборов площадью 1 мм². Производительность современных GaN-приборов 4-го и 5-го поколений показана фиолетовыми точками и зелеными звездами

ния специалистов корпорации Efficient Power Conversion (EPC, Эль-Сегундо, шт. Калифорния, США), необходимы для высокопроизводительных вычислительных применений в области облачных вычислений, искусственного интеллекта, машинного обучения и игровых приложений.

Автопроизводители также начинают внедрять топологию распределения мощности 48-вольтовой распределительной шины в гибридных автомобилях среднего класса. Для этого требуются двунаправленные 48/14-вольтовые преобразователи – высокоэффективные, надежные и экономичные. В ближайшие два-три года в автомобилях появятся eGaN-FET, разработанные для некоторых подобных систем.

За пределы дискретных силовых каскадов

Помимо повышения производительности и снижения стоимости, наиболее существенная перспектива для GaN полупроводниковой технологии повлиять на рынок силовых приборов обусловлена присущей ей возможностью интеграции нескольких приборов на одной подложке. GaN-технология, по утверждениям разработчиков корпорации EPC, в отличие от стандартной технологии кремниевых ИС,

позволяет проектировщикам реализовывать монолитные мощные системы на одном кристалле более простым и экономичным способом, чем это может быть достигнуто с помощью только кремниевой технологии.

ИС типа «GaN-на-кремнии» производятся уже более пяти лет. С тех пор они прошли различные этапы интеграции, переходя от чисто дискретных приборов к монолитным полумостовым компонентам, мощным полевым транзисторам, обладающим собственным монолитно-интегрированным драйвером, и наконец, совсем недавно, – к полностью монолитным силовым каскадам, содержащим мощные FET, драйверы, схемы сдвига уровня, логику и защитные средства.

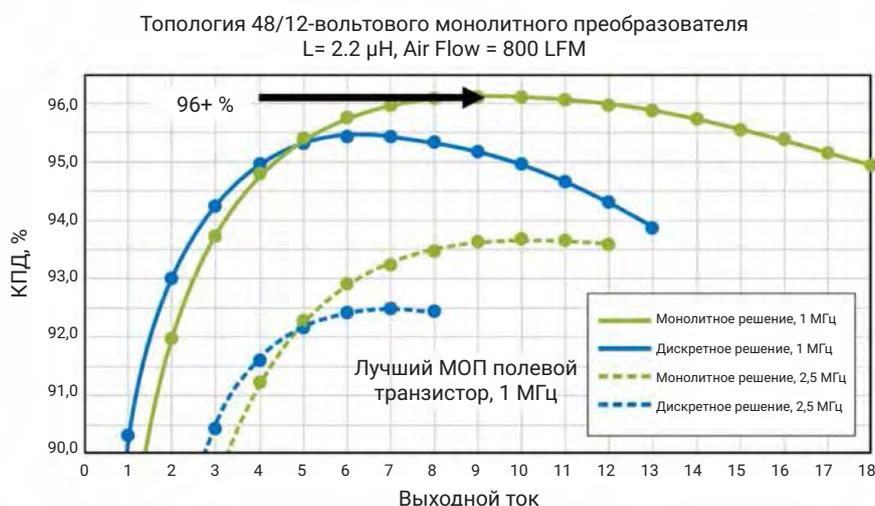
В начале 2019 г. функции драйвера и монолитного полумоста были объединены на одной подложке типа «GaN-на-кремнии» вместе со схемой сдвига уровня, схемой синхронной загрузки, средствами защиты и выходной логикой. Это был полный силовой каскад с расширенными возможностями, получивший наименование ePower Stage, работающий на мегагерцовых частотах и управляемый простой КМОП-ИС опорного заземления. При



добавлении нескольких пассивных компонентов прибор может стать полным регулятором постоянного тока. На рис. 4 показана эффективность данного монолитного силового каскада 48/14-вольтового понижающего преобразователя.

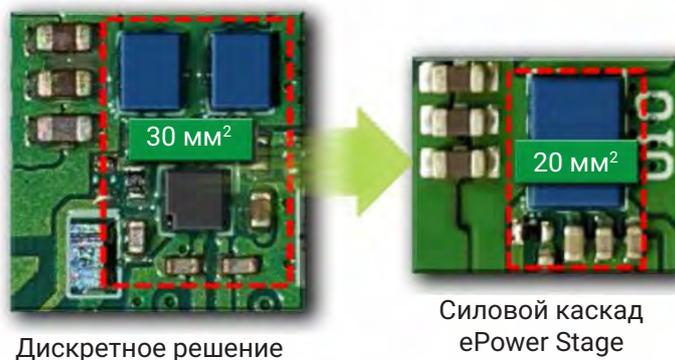
Силовой каскад ePower Stage заменяет по меньшей мере три компонента: драйвер затвора и два FET, что облегчает проектирование и производство. Эта монолитная GaN,

по сравнению с дискретной реализацией, экономит не менее 33% занимаемой на печатной плате площади (рис. 5). Прибор позволяет проектировщикам с легкостью воспользоваться преимуществом значительного повышения производительности, ставшим возможным благодаря GaN технологии. Интегрированные монолитные компоненты, такие как силовой каскад ePower Stage, легче проектировать, компоновать и собирать на печатной плате –



Источник: EPC

Рисунок 4. Сопоставление КПД и выходного тока 48/12-вольтового монолитного преобразователя с использованием встраиваемой ИС силового каскада EPC2152 по сравнению с аналогичной схемой, использующей дискретные GaN-транзисторы с задающей ИС на полумостах



Источник: EPC

Рисунок 5. Сопоставление дискретного силового каскада для 48/12-вольтового монолитного преобразователя и монолитного встраиваемого силового каскада

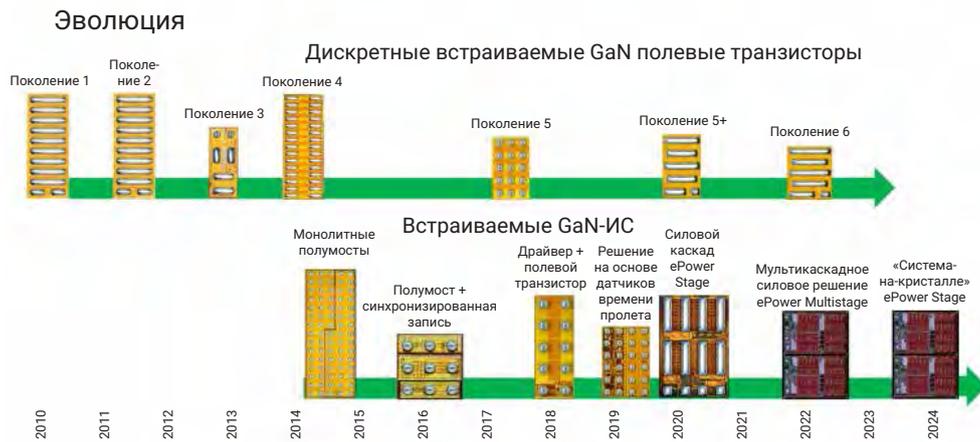


Рисунок 6. Динамика и прогноз развития технологии встраиваемых GaN-приборов от дискретных до полностью интегрированных решений

при одновременной экономии занимаемой площади и повышении эффективности.

Эволюция GaN мощных компонентов продолжается

Ранее рассмотренная монолитная ИС силового каскада выполняет все те же основные функции, что и многокристальный модуль DrMOS на основе кремниевых MOSFET, но при более высоких напряжениях и больших скоростях переключения, при этом отличается меньшими стоимостью и габаритами. Но это только начальные возможности интеграции приборов типа «GaN-на-кремнии». Силовые каскады первого поколения содержат только конденсаторы, резисторы и горизонтальные n -канальные FET. Скоро к ним можно будет добавить дополнительные датчики тока и температуры, а также такие схемные блоки, как контрольные (эталонные) схемы, компараторы и операционные усилители, что позволит

построить на одном кристалле ИС интегрированный контроллер и выходной каскад. Также станет возможным интегрировать многоуровневые топологии преобразования мощности, что позволит использовать более высокие входные напряжения с мощными приборами, рассчитанными на меньшие напряжения.

В конечном счете появится возможность монолитной интеграции p -канальных приборов на основе одной из многих перспективных структур.

При переходе на очень высокие частоты – выше 30 МГц – размер пассивных компонентов становится настолько мал, что на одном кристалле можно будет интегрировать все компоненты, необходимые для создания полного преобразователя источника питания. Эволюция, начавшаяся с простых дискретных GaN-FET, неуклонно движется к завершенным решениям типа «система-на-кристалле» (рис. 6) [2].



1. Bhalla Anup. How SiC Devices Have Changed the Face of Semiconductor Sector. *EE Times*, June 8, 2020: <https://www.eetimes.com/how-sic-devices-have-changed-the-face-of-semiconductor-sector/>

2. Lidow Alex. Silicon Is Dead... and Discrete Power Devices Are Dying. *EE Times*, June 9, 2020: <https://www.eetimes.com/silicon-is-deadand-discrete-power-devices-are-dying/>