

Мощные SiC- и GaN-приборы: перспективы развития

М. Макушин¹

УДК 621.38 | ВАК 05.27.01

Дальнейшее развитие силовой электроники связано с совершенствованием мощных полупроводниковых приборов. Возможности традиционной кремниевой технологии практически исчерпаны, дальнейшие перспективы связаны с приборами на основе карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN). В этом плане важны не только технологические прорывы, но и улучшение экосистемы проектирования, производства, бизнес-моделей...

В настоящее время наиболее перспективными считаются SiC-приборы 3-го поколения на основе широкозонных материалов и GaN-приборы 5-го поколения. Как правило, по размеру, весу и быстродействию они превосходят кремниевые аналоги. При этом важным фактором их дальнейшего принятия рынком является снижение стоимости.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ SiC-ПРИБОРОВ (оценка корпорации UnitedSiC)

Третье поколение полупроводниковых приборов на основе SiC обеспечивает сочетание повышения производительности и расширения практических преимуществ во всё большем числе применений. Но с ростом темпов инновационных процессов в таких секторах, как электромобили, возобновляемые источники энергии и 5G-технологии, разработчики все чаще ищут новые решения и требуют более высоких результатов от технологии переключения мощности для удовлетворения потребительского и промышленного спроса.

В силовой электронике SiC известен как полупроводник с широкой запрещенной зоной (wide bandgap, WBG), который произвел революцию в области преобразования мощности, при этом применение SiC обеспечивает снижение стоимости, веса и размера мощных полупроводниковых приборов и изделий силовой электроники.

SiC FET-каскады позволяют формировать WBG-модули

SiC полевые транзисторы (SiC FET) третьего поколения вышли на передний край технологии WBG-приборов, они применяются в качестве каскадной компоновки кремниевых МОП полевых транзисторов (Si-MOSFET) и SiC полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом (JFET). SiC FET обладают лучшими показателями добротности по относительному сопротивлению площади кристалла

во включенном состоянии ($R_{\text{DS(on)-A}}$) и относительному сопротивлению в выключенном состоянии ($R_{\text{DS(on)-EOSS}}$) – основными показателями низкой проводимости и малых потерь в переключателях.

Например, сопротивление SiC FET (в абсолютном выражении) фирмы United Silicon Carbide (UnitedSiC, Монмут-Джанкшн, штат Нью-Джерси) во включенном состоянии составляет менее 7 мОм для приборов с рабочим напряжением 650 В и сопротивлением менее 10 мОм при номинальном напряжении 1200 В. При параллельном размещении SiC FET в модуле можно получить более высокие характеристики – так, недавно эта же фирма продемонстрировала модуль в корпусе SOT-227, общее сопротивление этого 1200-В прибора составляет 2 мОм. Важен и стоимостной фактор – цены на SiC-приборы снижаются и приближаются к ценам кремниевых приборов.

Основное применение SiC FET – это замена Si-MOSFET и биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT).

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/DC-DC-преобразователях и т. д. В случае электромоторов / электроприводов их эффективность может быть очень быстро повышена без изменения частоты переключения. При этом уменьшаются статические и динамические потери в канале, а также и в цепи драйвера затвора, то есть там, где при использовании IGBT и Si-MOSFET наблюдается значительное рассеивание мощности.

Существуют и другие преимущества, такие как уменьшение размера демпфирующих устройств и даже отказ от коммутирующих диодов, необходимых в IGBT-приводах. В таких применениях, как инверторы двигателей электромобилей, необходимо добиваться повышения эффективности – если частота при использовании SiC FET

¹ ЦНИИ «Электроника», главный специалист, mmackushin@gmail.com.

по сравнению с IGBT-решениями увеличивается, двигатели электромобилей смогут работать более эффективно и плавно. В промышленных и автомобильных приводах повышение эффективности ведет к увеличению пробега электромобиля без подзарядки.

Зарядные устройства электромобилей как бортовые, так и стационарные также используют SiC FET. 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 приводит к увеличению эффективности. Дискретные устройства SiC FET, распараллеленные по мере необходимости, часто практичнее и дешевле, чем дорогостоящие IGBT-модули, то есть экономятся денежные затраты и уменьшается потребление энергии.

Будущее SiC FET

Перспективы развития SiC FET определяются постоянно растущими требованиями конечных потребителей по экономии энергии и затрат при одновременном увеличении функциональности. Быстро расширяющиеся рынки применения SiC FET – это инфраструктура 5G-сетей, электромобили/гибридные автомобили, средства генерации энергии из возобновляемых источников и центры обработки данных (ЦОД). Во всех случаях технология SiC FET следующего поколения даст возможность достигнуть более высокой производительности.

Для улучшения параметров SiC-приборов разработана маршрутная карта, определяющая тенденции их изменения и возможные компромиссы (рис. 1). Все эти улучшения теоретически достижимы, и можно ожидать, что они появятся по мере дальнейшего развития. Улучшение параметров не всегда связано с уменьшением потерь, хотя 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 (облегчение охлаждения и повышение надежности). Разработчики корпорации UnitedSiC предполагают, что существуют возможности улучшения конструкции корпусов и ячеек SiC FET, что приведет к ожидаемому снижению $R_{DS(on)}$ и сокращению площади кристалла. Все это уменьшает

емкостное сопротивление кристалла и, в свою очередь, динамические потери.

Также в рамках SiC-технологии расширяется применение JFET – они имеют явные преимущества в качестве твердотельных автоматических выключателей и ограничителей тока, так как обладают относительно низким сопротивлением во включенном состоянии. SiC JFETs могут переключаться в тысячи раз быстрее, чем традиционные механические аналоги, при этом вносимые потери остаются низкими.

Таким образом, технология SiC обеспечивает экстремальную устойчивость к высоким пиковым температурам перехода и низкое сопротивление во включенном состоянии с четко определенным током насыщения и быстрым переключением.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ GaN-ПРИБОРОВ

Точка зрения корпорации EPC

На протяжении более 40 лет, по мере внедрения инноваций в MOSFET-структуры, эффективность приборов управления режимом электропитания росла, а их цена снижалась. Но сейчас, по мере приближения мощных MOSFET к теоретическим пределам улучшения возможностей, темпы совершенствования резко замедлились. Важно отметить, что аналогичные теоретические пределы для GaN в 6 тыс. раз выше, чем у зрелых кремниевых MOSFET и в 300 раз выше, чем у лучших GaN-приборов, доступных на рынке в настоящее время.



Рис. 1. Основные характеристики SiC FET и тенденции их эволюции (синий – настоящее время, оранжевый – потенциальная перспектива)

Корпорация Efficient Power Conversion (EPC, Эль-Сегундо, штат Калифорния) производит полевые GaN-транзисторы с расширенными возможностями (eGaN) уже более 10 лет. Ее приборы 5-го поколения по размерам 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 более высоким быстродействием GaN по сравнению с кремнием. Действительно, транзисторы типа «GaN-на-кремнии» переключаются 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-огибающих 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 они находятся в точке, где их цены эквивалентны ценам более крупных MOSFET-компонентов эквивалентной номинальной мощности с меньшей скоростью переключения.

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-В постоянного тока. Такие источники, с точки зрения специалистов корпорации EPC, необходимы в высокопроизводительных вычислительных приложениях облачных вычислений, искусственного интеллекта, машинного обучения и игровых приложениях.

Автопроизводители также начинают внедрять топологию распределения мощности 48-В распределительной шины в гибридных автомобилях среднего класса. Автопроизводителям требуются двунаправленные 48-/14-В 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 возможность полупроводниковой GaN-технологии повлиять на рынок преобразования мощности 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 «чистой» кремниевой технологии.

ИС типа «GaN-на-Si» производятся корпорацией EPC уже более пяти лет. За это время они прошли различные этапы интеграции – от чисто дискретных приборов до монолитных полумостовых компонентов, мощных полевых транзисторов, обладающих собственным монолитно-интегрированным драйвером и, наконец, совсем недавно, до полностью монолитных силовых каскадов, содержащих мощные FET, драйверы, схемы сдвига уровня, логику и защитные средства. Примером такого монолитного каскада является полный силовой каскад с расширенными возможностями ePower Stage, работающий на мегагерцовых частотах и управляемый простой КМОП ИС опорного заземления. При добавлении нескольких пассивных компонентов этот прибор может стать полным регулятором постоянного тока. Он заменяет, по крайней мере, три компонента: драйвер затвора и два FET, что облегчает проектирование и производство. Эта монолитная GaN-реализация по сравнению с дискретной реализацией экономит не менее 33% занимаемой на печатной плате площади (площадь дискретного решения составляет 30 мм², а силового каскада ePower Stage – 20 мм²).

Эволюция GaN мощных компонентов продолжается

Монолитные ИС силового каскада (наподобие ePower Stage) выполняют все те же основные функции, что и многокристальный модуль DrMOS на основе кремниевых MOSFET, но при более высоких напряжениях, больших скоростях переключения. При этом они отличаются меньшими стоимостью и габаритами. Но это только начало возможностей интеграции приборов типа «GaN-на-Si». Эти 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. Это позволит построить на одном кристалле ИС интегрированный контроллер и выходной каскад. Также можно будет 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, находящихся в настоящее время в разработке. Как только появится



ГРУППА КОМПАНИЙ

ЭЛЕКТРОННОЕ СПЕЦИАЛЬНОЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Акционерное общество
«Научно-производственное предприятие
«Электронное специальное
технологическое оборудование»

124460, г. Москва, Зеленоград,
Георгиевский проспект, д.5, стр.1
тел.: (499) 729-7751, факс: (499) 479-1239
info@nppesto.ru www.nppesto.ru

СИСТЕМА GROOVY ICP –
ТЕХНОЛОГИЯ БУДУЩЕГО
Для критического травления
диэлектриков на основе уникального
узкозазорного индуктивного плазменного
реактора для массового производства

Разработка АО «НПП «ЭСТО» при финансовой
поддержке Министерства промышленности
и торговли Российской Федерации

МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



Группа компаний ЭСТО более 20 лет производит оборудование
для микроэлектроники в собственном инженерно-производственном комплексе
метражом в 5000 кв.м в г. Зеленограде



Оборудование для лазерной микрообработки:
резка, фрезерование, скрайбирование,
прошивка отверстий



Оборудование
для термических процессов



Оборудование для измерения физических
и геометрических параметров



Высокоточное оборудование
для дисковой резки

возможность интеграции комплементарных n- и p-канальных приборов, станет возможным и создание КМОП-схемотехники (но уже не кремниевой, а нитрид-галлиевой), что позволит более эффективно использовать драйверы и логические схемы.

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. 2) [2].

Вертикальные GaN-приборы корпорации NexGen Power Systems – следующее поколение силовой электроники

Корпорация NexGen Power Systems (Санта-Клара, штат Калифорния) приступила к изготовлению вертикальных мощных полупроводниковых приборов на подложках из гомоэпитаксиального GaN. Эти приборы, обладающие способностью переключения при очень высоких частотах и работы при высоких напряжениях, предназначены для использования в новом поколении более энергоэффективных систем силовой электроники. Утверждается, что вертикальные GaN-приборы на 90% меньше аналогичных кремниевых приборов. Их потери при переключении на 67% ниже, чем у кремниевых МОП полевых транзисторов (Si MOSFET) в большинстве стандартных применений, особенно в источниках питания. Как известно, GaN является материалом

Таблица 1. Сопоставление характеристик Si, SiC и GaN

Параметр	Материал		
	Si	SiC	GaN
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,12	3,26	3,45
Критическая напряженность электрического поля (E_c), МВ/см	0,3	2,2	3,3–3,7 (монокристаллический GaN)
Коэффициент добротности Балига (FOM) = $\epsilon \cdot \mu \cdot E_c^3$	1	675	3000

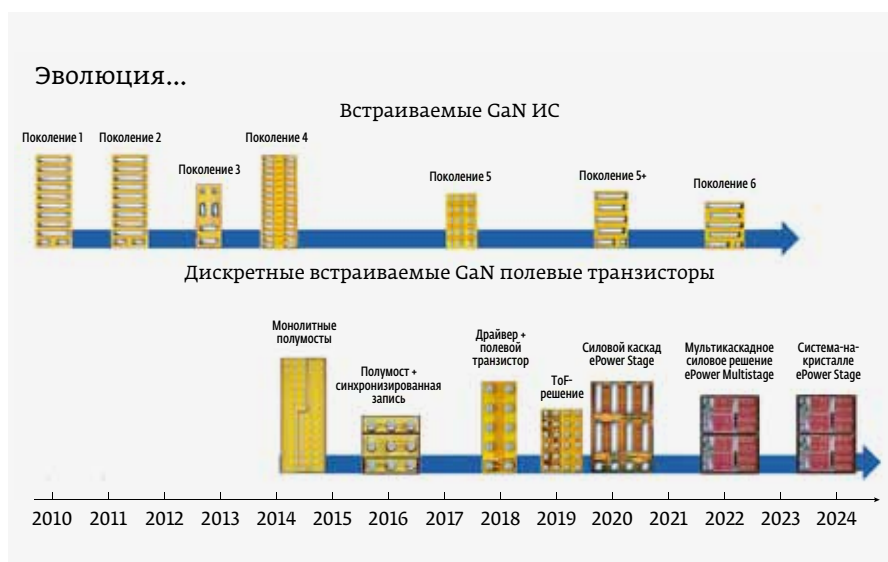


Рис. 2. Динамика и прогноз технологии встраиваемых GaN-приборов от дискретных до полностью интегрированных решений

с широкой запрещенной зоной, что позволяет изготовленным из него приборам работать при более высоких температурах и напряжениях по сравнению с кремниевыми приборами. Более того, GaN обладает большим напряжением пробоя, что позволяет изготавливать более тонкие приборы с низким омическим сопротивлением. Меньшее значение сопротивления области истока/стока во включенном состоянии ($R_{DS(on)}$) дает возможность создания миниатюрных приборов с низким емкостным сопротивлением.

Всё вышеперечисленное обеспечивает значительные конкурентные преимущества вертикальных мощных полупроводниковых приборов на GaN по сравнению с горизонтальными приборами, изготовленными с применением других материалов – особенно в плане интеграции.

Преимущество выращивания эпитаксиальных слоев с низкой концентрацией дефектов на монокристаллических GaN-подложках с низкой концентрацией дефектов заключается в том, что данный подход позволяет создавать вертикальные мощные приборы с повышенной надежностью при недонапряжении* и термическом напряжении – по сравнению с горизонтальными GaN-приборами, изготовленными на других подложках.

Вертикальные GaN-приборы способны работать при высоком напряжении пробоя (табл. 1), что позволяет использовать их в качестве источников питания в применениях с самыми высокими требованиями, таких как

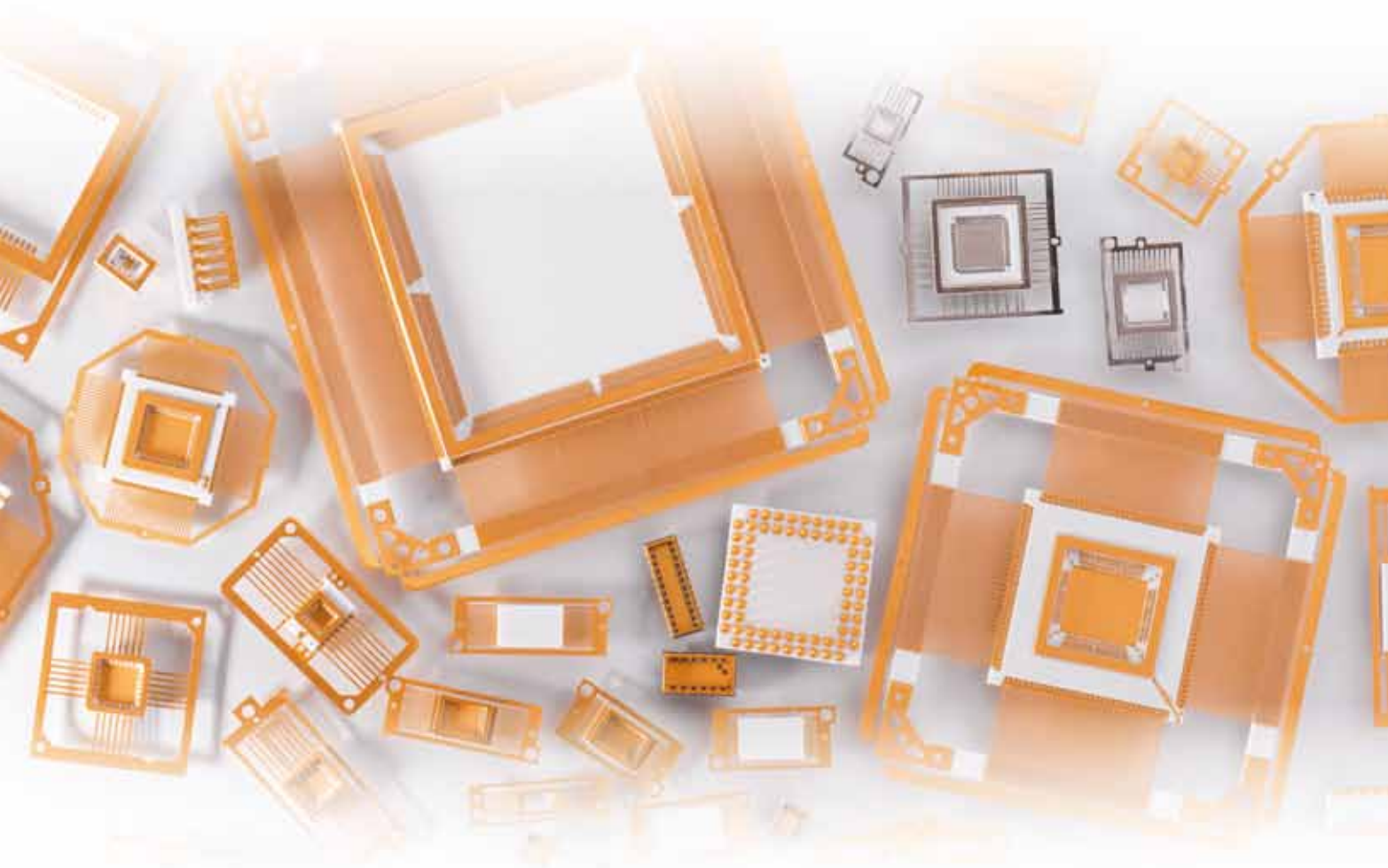
* Undervoltage – сброс напряжения, недонапряжение, снижение электрического напряжения до значений, представляющих опасность для потребителя (например прибора).



**ЗАВОД
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ**

ЙОШКАР-ОЛА, РЕСПУБЛИКА МАРИЙ ЭЛ

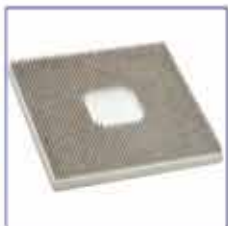
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ЗАВОД ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ»



**Предприятие располагает научно-технической и испытательной базой
для проведения исследований, разработки и выпуска новой продукции**



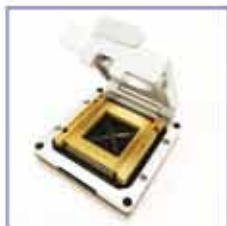
Выводные рамки



Металлокерамические
корпуса



Нагревательные
элементы



Контактные
устройства



Графитовая
оснастка



Оптоэлектронные
корпуса



424003, Россия, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 26
Тел.: +7-8362-45-70-09, 45-67-68.
info@zpp12.ru marketing@zpp12.ru

zpp12.ru

серверы ЦОД, электромобили, инверторы солнечные батареи, электродвигатели и высокоскоростные поезда.

В случае сочетания GaN и Si или SiC рассогласование параметров их решеток ухудшает электрические свойства GaN и влияет на надежность. В случае выращивания GaN-приборов на GaN-подложках и параметры решеток, и коэффициент линейного теплового расширения (СТЕ) идеально сочетаются – это один и тот же материал. В результате на монокристаллической GaN-подложке можно эпитаксиально вырастить очень толстые слои GaN, что позволяет создавать очень высоковольтные приборы.

Технология вертикальных GaN-приборов позволяет реализовать весь потенциал свойств материала GaN, поскольку она основана на гомоэпитаксиальном выращивании GaN на GaN-подложках. Кроме того, вертикальные GaN-приборы используют все три пространственных измерения: более высокое пробивное напряжение за счет увеличения толщины дрейфового слоя и низкое сопротивление области истока/стока во включенном состоянии ($R_{DS(on)}$), допустимая нагрузка по току за счет увеличения площади устройства; позволяют эффективно создавать 3D-приборы, в которых уменьшена связь напряжения пробоя и допустимой нагрузки по току ($R_{DS(on)}$).

Системы переменного тока требуют высокоэффективных схем компенсации коэффициента мощности с существенным уменьшением гармонических искажений. Высокая частота переключений вертикальных GaN-приборов позволяет создавать новые алгоритмы управления и обеспечивает все это с реализациями с меньшими занимаемыми площадями и увеличенной эффективностью.

Схемы JFET с расширенными возможностями (eJFET) и HEMT типа «GaN-на-Si» показаны на рис. 3. Представители корпорации NexGen заявляют, что им удалось продемонстрировать толщину дрейфового слоя более

40 мкм. Это обеспечивает изготовление диодов с пробивным напряжением выше 4000 В и транзисторов с удельным сопротивлением 2,8 мОм·см². Таким образом, при той же самой допустимой нагрузке по току размеры вертикальных GaN приборов оказываются примерно в шесть раз меньше, чем у 650-В HEMT типа «GaN-на-Si», но они обеспечивают гораздо большее пробивное напряжение – 1200 В. Вертикальный GaN eJFET имеет возможность лавинного пробоя, которая защищает прибор при превышении заданного пробивного напряжения.

Вертикальные GaN-приборы формируются так, чтобы проводить ток через дрейфовый слой, находящийся внутри основной части транзистора. Таким образом, отсутствует механизм динамического изменения $R_{DS(on)}$, который создается зарядами, захваченными вследствие наличия примесей на поверхности раздела. Расширение обедненной области затвор-исток диода в канал управляет электрическим током между стоком и истоком. В ситуациях, когда пробивное напряжение превышено, лавина первоначально происходит через область затвор-исток диода с обратной полярностью, что впоследствии вызывает лавинный ток, увеличивающий напряжение этой области и делает канал открытым и проводящим. Из-за малой выходной емкости потери при переключениях очень малы. В отличие от горизонтальных GaN-приборов тепло оптимально передается через однородный материал (без дополнительных слоев) непосредственно к выводной рамке корпуса (табл. 2) в верхней и нижней части прибора.

Преимущество этого прибора заключается в том, что он имеет только р-п-переходы, сделанные из GaN. Здесь нет двумерных электронных газов и сложных слоев материалов. Вместо этого используется хорошо изученная структура eJFET, и, поскольку она имеет р-п-переходы, есть

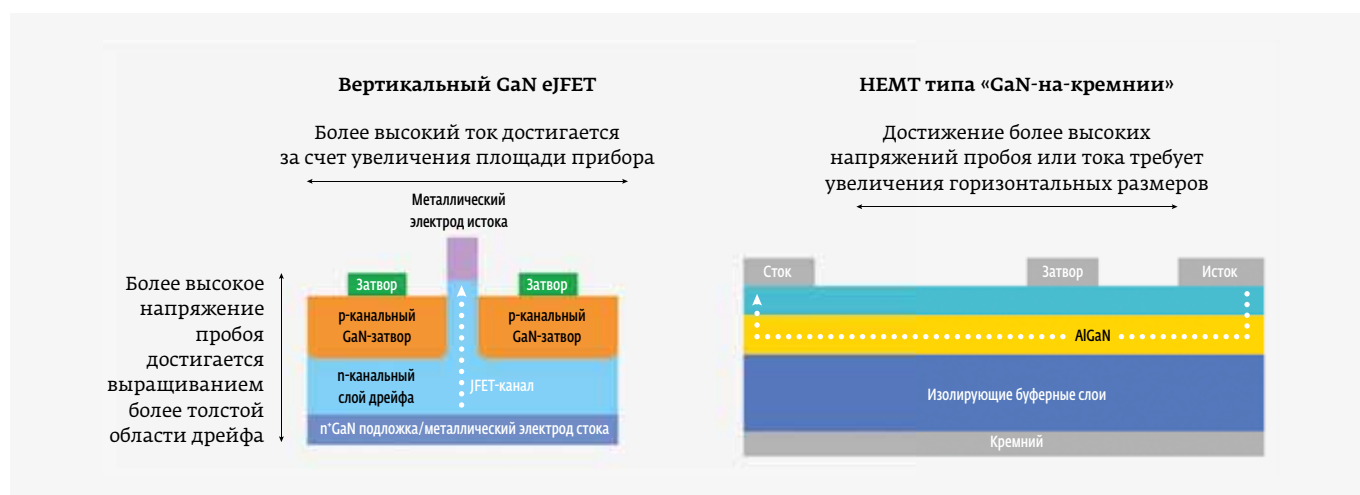


Рис. 3. Схематическое сопоставление вертикального GaN eJFET и HEMT типа «GaN-на-кремнии». Белые пунктирные линии обозначают путь электронной проводимости



ИНТЕЛЛЕКТ. КАЧЕСТВО.

АО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»
Москва, Щелковское шоссе, д.5, стр.1
Тел. (499) 644-21-03, (499) 644-25-62
(многоканальный)
Факс +7(499) 644-19-70
E-mail: mwsystems@mwsystems.ru
www.mwsystems.ru

- СОВРЕМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО И ТЕХНОЛОГИИ
- ОПТИМАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ ЦЕНА/КАЧЕСТВО
- ПОЛНЫЙ СПЕКТР УСЛУГ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ПРОИЗВОДСТВУ МОНОЛИТНЫХ И ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ, МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ И БЛОКОВ РЭА (0,3 - 22 ГГц)

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»



Таблица 2. Преимущества гомоэпитаксиально выращенной структуры

Свойства	GaN-на-кремнии	Вертикальный GaN
Концентрация дефектов, см ⁻²	10 ⁹	10 ³ –10 ⁵
Рассогласование параметров решетки, %	17	0
Толщина слоя, мкм	1–2	>40
Рассогласование коэффициентов теплового расширения, %	54	0
Напряжение пробоя, В	900	4 000
Ток утечки в выключенном состоянии	Высокий	Низкий (1 нм)
Возможность лавинного пробоя	Нет	Да
Надежность	Низкая	Высокая

возможность лавинного пробоя, исключающего разрушительный пробой. Поскольку все это происходит в монокристаллической части прибора, она может поглощать изрядную часть энергии во время лавинного пробоя, а после этого события прибор восстанавливается и работает как обычно. Таким образом, он имеет встроенный предохранительный механизм. И поэтому это гораздо более надежный и робастный прибор.

Технология вертикальных GaN-приборов корпорации NexGen сочетает в себе свойства устройств, которые ранее считались несовместимыми. Основные области применения, где востребован потенциал этой новой технологии – преобразование энергии в автомобилях, потребительских приборах, гелиотехнике, электродвигателях и ЦОД. Реализованные на ее основе приборы обеспечивают более низкие потери на более высоких частотах переключения и лучшую лавинную устойчивость, чем переключательные приборы, созданные с использованием других технологий. Кроме того, вертикальные GaN-приборы эффективно конкурируют с кремниевыми приборами по стоимости и габаритам.

Таким образом, вертикальные GaN мощные полупроводниковые приборы позволяют решать весь спектр задач преобразования мощности, которые в настоящее время могут обслуживаться только большим числом приборов, реализованных по различным технологиям.

ОБЗОР РЫНКА МОЩНЫХ GaN- И SiC-ПРИБОРОВ

Силовая электроника развивается за счет внедрения мощных полупроводниковых приборов на основе GaN и SiC. Представители исследовательской корпорации Yole Développement (Yole, Лион, Франция) оценили общее состояние рынка этих приборов на основе WBG-материалов. В то время как кремний все еще доминирует

на рынке, устройства GaN и SiC уже являются более эффективными решениями в некоторых приложениях. С точки зрения разработки, исследования в отношении SiC направлены на улучшение качества пластин и перехода на пластины большего диаметра, а также разработку мощных модулей. В области GaN основные тенденции связаны с интеграцией устройств GaN – решений типа «система в модуле» или «система на кристалле» [4].

Мощные SiC-приборы

По данным Yole мировые продажи SiC-приборов в 2019 году увеличились на 28,2% по сравнению с предыдущим годом – с 440 млн до

564 млн долл. Основной фактор роста продаж – спрос со стороны поставщиков аккумуляторов для электромобилей, гелиотехники и источников питания. Предполагается, что в пятилетний период, до 2024 года, среднегодовой рост продаж SiC-приборов в сложных процентах (CAGR) будет близок к 30%. На фоне растущего спроса на рынок SiC-приборов пытаются выйти несколько независимых кремниевых заводов (контрактные производители), стремящихся расширить свою клиентскую базу. Однако сделать это будет не так просто из-за жесткой конкуренции со стороны традиционных вертикально интегрированных поставщиков (IDM) SiC-приборов, таких как корпорации Cree, Infineon, Rohm и STMicroelectronics [5].

Эксперты Yole отмечают прогресс в переходе на пластины большего диаметра при формировании схем на SiC – в 2018–2020 годах наблюдается переход с пластин диаметром 100 мм на пластины диаметром 150 мм, на которых уже работает ряд производителей. Однако высококачественные 150-мм пластины по-прежнему сложны в производстве с точки зрения выращивания подложки, а также подготовки поверхности пластин, что напрямую влияет на выход годных. Поэтому для производителей важно использование качественного материала – как для максимизации выхода годных, так и для экономии с точки зрения стоимости продукта в целом.

Инвестиции в данной сфере осуществляются такими ведущими игроками, как Cree, II-VI и SiCrystal, а также китайскими производителями. Многолетние соглашения о поставках подписаны между поставщиками подложек Cree/Wolfspeed и SiCrystal, с одной стороны, и производителями приборов, такими как Infineon и STMicroelectronics, с другой стороны. ON Semi не только покупает, но и производит собственные SiC-подложки.

У нее также есть соглашение с GTAT о поставках SiC-кристаллов (для резки на пластины). Для ON Semi важно контролировать качество получаемых материалов, а также вертикально интегрировать их в цепочку поставок (рис. 4, 5).

Партнерские отношения изготовители приборов формируют и с их потребителями. Пример – соглашение STMicroelectronics с Tesla, касающееся в основном поставок SiC основных инверторов, поэтому STMicroelectronics в настоящее время контролирует значительную долю рынка мощных SiC-приборов. Infineon и ON Semi также принимают активное участие в разработках SiC-приборов, предназначенных для автомобильных и промышленных систем.

По прогнозам Yole, поставщики будут уделять все больше внимания модулям, ориентированным на приложения высокой мощности, такие как основные инверторы и инфраструктура зарядки.

Отраслевые обозреватели особо подчеркивают, что для корпусирования мощных SiC-модулей необходимо разработать новые типы корпусов и методы корпусирования, которые, в отличие от существующих, будут лучше приспособлены к карбиду кремния [4].

Общая ситуация в области SiC мощных полупроводниковых приборов

На рынке SiC-приборов в настоящее время доминируют IDM, включая Cree, Rohm и т. д. Они осуществляют производство на собственных заводах по обработке пластин, под своими товарными знаками и с использованием фирменных процессов, что позволяет дифференцировать выпускаемую продукцию. IDM конкурируют друг с другом, а также с растущим числом fabless-фирм («чистые» разработчики), проектирующих SiC-приборы, изготавливаемые на мощностях кремниевых заводов. Кремниевые заводы, обладающие SiC технологическими процессами, предоставляют клиентам доступ к производственным мощностям, но при этом есть некоторые проблемы с затратами и цепочками поставок. Как правило, IDM, выпускающие SiC-приборы,



Рис. 4. Долгосрочный прогноз развития рынка мощных SiC-приборов

не предоставляют услуги контрактного производства, но это может измениться.

Кремниевые заводы только начинают осваивать сектор SiC-приборов. При этом они рассчитывают достичь здесь тех же успехов, что на рынке полупроводниковых приборов в целом. Надо отметить, что крупнейшие кремниевые заводы, такие как TSMC, Samsung (корпорация является одним из крупнейших IDM, но оказывает услуги кремниевого завода на мощностях специализированного подразделения), GlobalFoundries и UMC не работают в секторе SiC-приборов, пока это удел кремниевых заводов второго уровня. Действительно, в целом модель кремниевого завода очень успешна. В области SiC-приборов у нее тоже неплохие шансы, но если говорить о таком типе полупроводниковых приборов, таких как IGBT, то это скорее бизнес IDM.



Рис. 5. Прогноз структуры продаж мощных SiC-приборов по конечному потреблению

О развитии услуг кремниевых заводов на рынке SiC-приборов свидетельствуют следующие факты:

- кремниевый завод X-Fab (Эрфурт, ФРГ) удвоил мощности по производству SiC-приборов своего американского филиала;
- на рынок SiC-приборов недавно вышли такие кремниевые заводы, как Clas-SiC (Великобритания), Episil (Тайвань), Sanan (Китай) и YPT (Южная Корея);
- еще несколько IDM и кремниевых заводов изучают возможность выхода на данный рынок.

Мир SiC IDM

Почему в секторе мощных MOSFET, особенно SiC-приборов, наблюдается **доминирование IDM, использующих собственные заводы по обработке пластин**? На это есть несколько причин. Каждый новый прибор разрабатывается и оптимизируется на основе избранного процесса в рамках одного завода по обработке пластин. Прибор и технологический процесс оказываются тесно связаны в этих рамках. Здесь не получается отличиться от конкурента за счет схемотехники, потому что мощные SiC не совсем схемы с традиционной точки зрения, а множество соединенных параллельно дискретных MOSFET. Конструкция прибора полностью зависит от процесса и наоборот. Другими словами, стандартного процесса нет, структура отклонений с каждым клиентом уникальна.

Итак, основной работающей на рынке SiC-приборов моделью в настоящее время является модель IDM. Здесь она представлена корпорациями Cree, Infineon, On Semiconductor, STMicroelectronics, Rohm, Toshiba и т.д. Но не все IDM одинаковы. Некоторые из них полностью вертикально интегрированы. Например, корпорация Cree производит свои собственные SiC-подложки и использует их не только для производства собственных SiC-приборов, поставляемых заказчикам, но и продает подложки конкурентам. Корпорации Rohm и STMicroelectronics также вертикально интегрированы, а поэтому, как и Cree, могут контролировать всю цепочку поставок, что позволяет быстро реагировать на циклы спроса. Но большинство IDM не является вертикально интегрированными в полном смысле – они покупают подложки у Cree, Rohm или независимых поставщиков.

У всех поставщиков SiC-приборов существует несколько общих производственных проблем. Самая большая – высокая стоимость SiC-пластин, определяющая высокую стоимость конечных приборов. Затраты на подложку составляют примерно 50% от стоимости обработанной пластины. Необходимо добиться снижения стоимости и увеличения производства подложек наряду с повышением их качества.

Отмечается, что, несмотря на значительные усилия по расширению коммерциализации SiC-технологии, она все еще не достаточно готова по сравнению с технологиями

IGBT на основе кремния. Это особенно верно в автомобилестроении, где надежность имеет решающее значение, а сертификация продукции может быть сложной и длительной. Чтобы закрыть этот пробел и ускорить освоение SiC-технологии, требуется целостное понимание дефектности при изготовлении SiC-приборов.

Модель fabless-foundry

Заказчики могут приобрести SiC-приборы у IDM и fabless-фирм (для которых их производят кремниевые заводы). В области КМОП-приборов второй вариант часто называют моделью fabless-foundry, которая была впервые представлена еще в 1980-х годах.

Для сектора SiC-приборов модель fabless-foundry относительно нова и сталкивается с рядом проблем. Хотя в обозримом будущем на рынке SiC-приборов будут продолжать доминировать IDM, место для fabless-фирм и кремниевых заводов найдется. Несколько fabless-фирм уже успешно наращивают производство продукции с использованием мощностей кремниевых заводов.

Модель fabless-foundry позволяет стартапам и небольшим компаниям тестировать свои продукты без значительного инвестиционного процесса (в частности за счет практики «многопроектных»^{*} пластин). С другой стороны, IDM сохраняют преимущество стратегических поставщиков, которым отдают предпочтение крупные клиенты. Обе модели играют на своих сильных сторонах, удовлетворяя разнообразные потребности современного промышленного ландшафта и находя способы сосуществования.

На протяжении многих лет несколько поставщиков оказывали услуги кремниевого завода для поставщиков SiC-приборов, но в незначительных объемах. Существенные усилия по расширению применения этой практики начались в 2015 году, когда министерство энергетики США и Университет штата Северная Каролина создали совместное предприятие PowerAmerica с целью ускорить коммерциализацию GaN- и SiC-технологий. Это СП в 2016 году оказало поддержку кремниевому заводу X-Fab, развивавшему (и развивающему до сих пор) услуги кремниевого завода на своем предприятии по обработке 150-мм SiC-пластин в Техасе. PowerAmerica и X-Fab вместе разработали наборы средств проектирования

^{*} MPW (Multi Project Wafer services) – (shuttle services) – услуги по производству на одной пластине опытных ИС разных проектировщиков с целью сокращения и распределения накладных расходов, затрат на разработку и производство. При этом осуществляется объединение различных конструкций ИС на едином комплекте фотошаблонов и производство одной или нескольких ИС для различных талантливых разработчиков по достаточно передовым процессам, что при обычных условиях невозможно по экономическим соображениям.

технологических процессов и ряд технологий для изготовления SiC-приборов.

Другие кремниевые заводы также разрабатывают предложения по контрактному изготовлению SiC-приборов. Так, фирма Episl находится в процессе перевода своих мощностей с обработки 100-мм пластин на обработку 150-мм пластин. Фирма Sanaп приступила к контрактному производству SiC-приборов на 150-мм пластинах. Отмечается, что все большее число кремниевых заводов заинтересовано в выходе на данный рынок.

Но развитие услуг кремниевых заводов в секторе SiC-приборов сопряжено с некоторыми проблемами. В частности, необходимы инвестиции в производство и соответствующую инфраструктуру, удовлетворяющие требованиям потребителей мощных SiC-приборов.

К другим проблемам можно отнести:

- совершенствование структуры затрат с тем, чтобы она оказалась конкурентоспособной с аналогичной структурой IDM;
- убеждение IDM в целесообразности дополнять их собственные мощности, в случае необходимости, мощностями кремниевых заводов;
- привлечение нужных специалистов для разработки и внедрения новых процессов.

Несмотря на перечисленные трудности, некоторые fabless-поставщики SiC-приборов производят свою продукцию с использованием услуг кремниевых заводов. К ним относятся фирмы ABB, GeneSiC, Global Power, Microchip, Monolith и UnitedSiC.

Еще один довод в пользу кремниевых заводов – объемы производства. Если какой-либо фирме в месяц требуется не более 10–30 тыс. пластин со сформированными SiC-приборами, то нет экономического смысла обладать собственным заводом по обработке SiC-пластин. Лишь немногие производители могут похвастаться такими объемами.

Наличие кремниевых заводов – только часть уравнения, которое решают fabless-фирмы. Им необходимо не просто проектировать MOSFET по принципу «тоже можем», а создавать конкурентоспособную продукцию. Для этого необходимо как четко очертить границы сотрудничества с кремниевыми заводами, так и определить основные IDM конкурентов, выработать рыночную стратегию, гарантирующую рентабельность деятельности.

Например, fabless-фирма UnitedSiC предлагает несколько изделий, в том числе SiC JFET, которые затем собираются в каскадную схему с низковольтными MOSFET, то есть в результате – достаточно сложные приборы. Учитывая то, что некоторые клиенты опасаются иметь дело с fabless-фирмами, компания UnitedSiC обеспечила себе устойчивую поддержку. Например, она заключила соглашение о долгосрочных поставках с корпорацией ADI, которая, чтобы гарантировать эти поставки, осуществила инвестиции в UnitedSiC.

Тем не менее для fabless-фирм конкуренция с IDM будет трудной задачей как с точки зрения затрат на развитие технологий, так и с точки зрения ценообразования.

Есть и другие обстоятельства. В области КМОП-приборов многие IDM перестали строить новейшие заводы по обработке пластин из-за их запредельной стоимости. Вместо этого они передали часть производства своей продукции на аутсорсинг кремниевым заводам. Неясно, будет ли модель аутсорсинга работать для IDM, выпускающих SiC-приборы. У них уже есть огромные, полностью амортизированные заводы по обработке пластин, выпускающие или выпускавшие КМОП ИС по зрелым технологиям, и им будет выгоднее переоборудовать эти мощности с производства КМОП-приборов на производство SiC-приборов, нарастить их производство и, может быть, начать самим оказывать услуги кремниевого завода. У них нет мотивации использовать сторонние кремниевые заводы [5].



Рис. 6.
Прогноз
структуры
рынка мощных
GaN-приборов

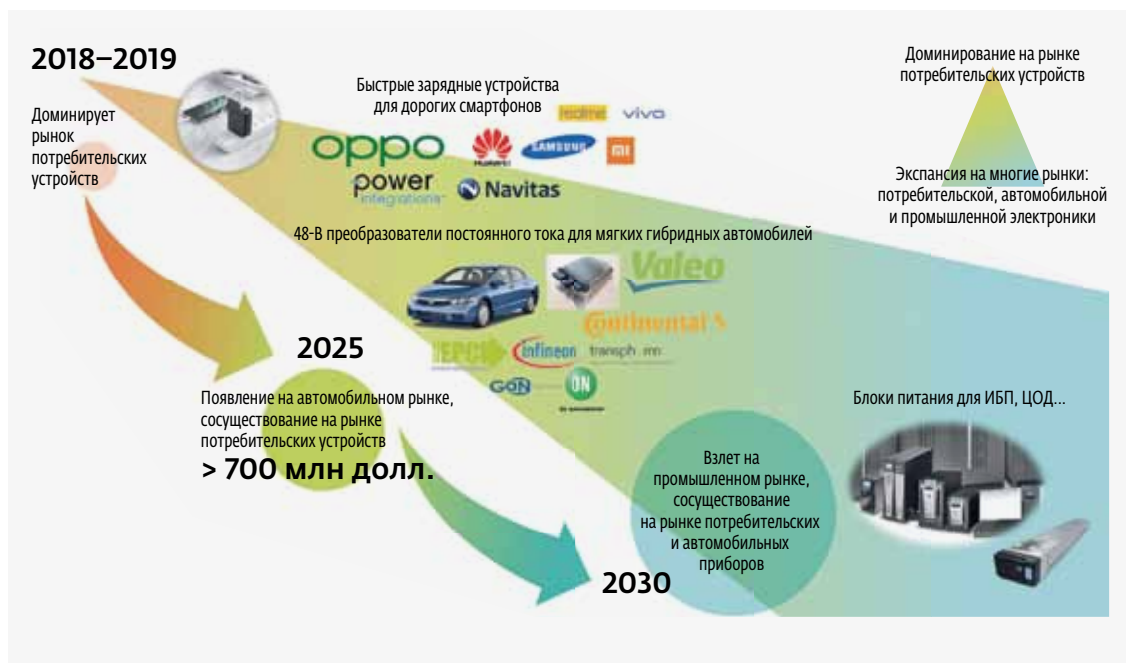


Рис. 7.
Долгосрочная эволюция рынка мощных GaN-приборов

Мощные GaN-приборы

В области мощных GaN-приборов одной из основных тенденций стало сотрудничество их поставщиков с такими известными кремниевыми заводами, как Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC), X-Fab или Episil Technologies (в целях снижения издержек производства).

Мощные GaN-приборы продаются в основном на рынке бытовой электроники – для быстрых зарядных устройств (рис. 6). Происходит активное освоение этих устройств. Основные требования к быстрому зарядному устройству – плотность мощности и эффективность. Таким образом, необходимо снижать габариты и удельную цену мощности. Основными решениями, которые сейчас предлагаются для быстрых зарядных устройств, являются GaN системы-в-модуле и GaN системы-на-кристалле.

Быстрые зарядные устройства уже широко осваиваются китайскими производителями комплектного оборудования (OEM) – им их поставляют такие поставщики, как Navitas и Power Integrations.

Мощные GaN-приборы изготавливаются на двух типах подложек: кремниевых и сапфировых. Приборы типа «GaN-на-Si» производятся в основном на 150-мм пластинах, хотя некоторые поставщики для их изготовления применяют 200-мм пластины (рис. 7).

Мощные дискретные приборы на основе GaN по-прежнему будут пользоваться спросом, но они больше подходят для приложений с высокой мощностью, например для ЦОД или источников питания базовых станций.

Отмечается, что замена кремниевой технологии на GaN-технологии в секторе мощных полупроводниковых приборов обусловлена прежде всего большей

эффективностью и скоростью переключения GaN-решений, а также меньшими потерями самих источников питания.

При развитии рынков SiC- и GaN-приборов важными факторами являются ценовая конкурентоспособность и выбор бизнес-модели. Многое в этом плане зависит от конкретного сегмента рынка. При этом ожидаемый выход на рынок мощных полупроводниковых приборов крупнейших кремниевых заводов наподобие TSMC, UMC и т. д. может привести к существенным изменениям конъюнктуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bhalla A.** How SiC Devices Have Changed the Face of Semiconductor Sector // EE Times. 06.08.2020. <https://www.eetimes.com/how-sic-devices-have-changed-the-face-of-semiconductor-sector/>
2. **Lidow A.** Silicon Is Dead... and Discrete Power Devices Are Dying // EE Times. 06.09.2020. <https://www.eetimes.com/silicon-is-dead-and-discrete-power-devices-are-dying/>
3. **Emilio M. Di P.** Vertical GaN Devices – the Next Generation of Power Electronics // EE Times. 05.16.2020. <https://www.eetimes.com/vertical-gan-devices-the-next-generation-of-power-electronics/>
4. **Emilio M. Di P.** Insight of GaN and SiC Market // EETimes magazine. 07.27.2020. <https://www.eetimes.com/insight-of-gan-and-sic-market/>
5. **LaPedus M.** SiC Foundry Business Emerges // Semiconductor Engineering. January 23rd. 2020. <https://semiengineering.com/sic-foundry-business-emerges/>

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ



ПРОЕКТИРОВАНИЕ



ГЕНЕРАЦИЯ
ИЗОБРАЖЕНИЙ



КОНТРОЛЬ
ФОТОШАБЛОНОВ



РЕМОНТ
ФОТОШАБЛОНОВ



ФОТОЛИТОГРАФИЯ



КОНТРОЛЬ
ПЛАСТИН



СБОРКА ИЗДЕЛИЙ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

БЕЗМАСОЧНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Многоканальные лазерные генераторы изображений
- Проектная норма 0.35, 0.6 μm
- Высокая точность совмещения
- $\varnothing 200, 150, 100$ мм



ГЕНЕРАТОРЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Диапазон UV, DUV
- Проектная норма 90, 130 нм
- 16/32-лучевая архитектура
- Фазосдвигающие шаблоны
- Быстрая переналадка пластина — шаблон



КОНТРОЛЬ ФОТОШАБЛОНОВ

- Проектная норма 90, 130, 250 нм
- Твердотельный лазер
- Контроль методом D2DB, D2D
- Высокая производительность
- Контроль неплоскостности



РЕМОНТ ФОТОШАБЛОНОВ

- Фемтосекундный лазер
- 0.15/ 0.3/ 0.5 μm min элемент
- Размер шаблона до 9"х9"
- Ремонт копированием
- Ремонт через пелликл
- Прозрачные / непрозрачные дефекты



КОНТАКТНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Ручная и автоматизированная загрузка
- Двусторонняя литография
- Высокая точность совмещения
- Низкий уровень генерации дефектов
- Высокая энергоэффективность



СТЕППЕРЫ

- Проектная норма 0.35, 0.8 μm
- Автоматический масштаб
- Двустороннее совмещение
- $\varnothing 200, 150, 100$ мм
- Твердотельный источник света



КОНТРОЛЬ ТОПОЛОГИИ

- Контроль привносимых дефектов пластин без топологии
- Автоматический микро и макро контроль дефектов пластин с топологией
- Высокая производительность



АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЕ

- Контроль микrorазмеров
- Контроль неплоскостности
- Контроль координат
- Контроль толщин
- Контроль рассовмещения



ЗОНДОВЫЙ КОНТРОЛЬ

- $\varnothing 200, 150, 100$ мм
- ± 4 мкм погрешность контактирования
- Ручное / полуавтоматическое / автоматическое оборудование



РАЗДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИН И ПОДЛОЖЕК

- $\varnothing 300, 200, 150, 100$ мм
- 2 независимые зоны разделения в одной установке
- 2.4 кВт мощность электрошпинделя
- Полуавтоматическое / автоматическое оборудование



Создаем традиции будущего!

- Единое таможенное пространство
- 58 лет опыта в разработке и производстве прецизионного оптико-механического и сборочного оборудования
- Высокий уровень применяемых технологий и современного оборудования
- Полный цикл разработки и производства, высококвалифицированный персонал
- Высокое качество изделий подтверждено национальными и международными стандартами
- Возможность комплексной поставки оборудования, адаптированного для Российского рынка, программного обеспечения для поддержки процессов изготовления фотошаблонов и 3D-моделирования для фотолитографии компании GeniSys (Германия)

