

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА – 2020.

ШИРОКОЗОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ КАК ГЛАВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОНИКИ

ДМИТРИЙ БОДНАРЬ, к.т.н., генеральный директор, АО «Синтез Микроэлектроника»

Широкозонные полупроводники (ШЗП), к которым относятся карбид кремния (SiC), нитрид галлия (GaN), оксид галлия (Ga₂O₃) и искусственный алмаз, давно прошли этап фундаментальных исследований и в разной степени уже коммерциализированы для применения во многих текущих и перспективных сегментах рынка, начиная с простых зарядных устройств и заканчивая космической техникой. Феноменальные свойства ШЗП превратят приборы на их основе в ближайшие десятилетия в главный инструмент повышения энергоэффективности на Земле и в космосе, а революция в электротранспорте становится их визитной карточкой.

ШИРОКОЗОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ – ТОЛЬКО НАЧАЛО ПУТИ, НО ОНИ НАДОЛГО

Возможности кремния как основного материала для создания классических устройств силовой электроники уже давно достигли своих пределов. В последние годы этот материал лишь в небольшой мере способствовал улучшению параметров этих устройств, не суля каких-либо перспектив и надежд на революцию в статических и динамических характеристиках силовых приборов. Ему на смену в начале 2000-х гг. пришел карбид кремния (SiC), а с 2016 г. нитрид галлия (GaN); оба относятся к группе широкозонных полупроводников (Wide Band Gap, WBG). Их главное отличие от кремния – значительно более широкая запрещенная зона у SiC 3,3 эВ, а у GaN – 3,4 эВ, тогда как у кремния она равна 1,1 эВ (см. табл.). Но если оба эти материала уже широко применяются и представлены на коммерческом рынке в виде электронных компонентов на их основе, то некоторым другим материалам из группы ШЗП еще предстоит коммерциализация. И она обещает дальнейшие революционные улучшения параметров электронных устройств,

что уже было невозможно получить с помощью кремния. Однако это вовсе не значит, что кремниевые технологии и изделия силовой электроники уйдут в прошлое и прекратят свое существование. Они по-прежнему останутся более предпочтительными для маломощных низковольтных приборов в более экономичной категории применения, а также для мощных устройств, где высокая стоимость альтернативных компонентов сдерживает их использование.

Кремний еще на долгие годы останется одним из главных материалов для полупроводниковой микроэлектроники, особенно для интегральных схем сверхвысокой степени интеграции. Хотя и в этом направлении, особенно в СВЧ КМОП-технологии, его теснит SiGe. Кроме того, технологии с использованием ставших уже классическими SiC и GaN также подвергаются эволюционным улучшениям, что приводит к расширению параметрического ряда продукции на их основе. Это значит, что широкозонные полупроводники находятся только в начале своего пути и впереди их ждет дальнейшее эволюционное развитие, как это было когда-то с кремнием. Замена кремния на ШЗП будет происходить,

в первую очередь, в изделиях для жестких условий эксплуатации и в тех сегментах, где революционное улучшение параметров является определяющим и коммерчески окупаемым, невзирая на более высокую цену. По мере снижения цены на ШЗП и изделия с их использованием эта область будет постепенно расширяться. В настоящей статье рассматриваются основные наиболее перспективные программы международных ассоциаций по развитию ШЗП, а также ближние, среднесрочные и долгосрочные прогнозы по их применению. Кроме того, рассматриваются некоторые последние результаты исследований и перехода на коммерциализацию ШЗП, включая карбид кремния (SiC), нитрид галлия (GaN), оксид галлия (Ga₂O₃) и искусственный алмаз, позволившей им стать основным полупроводниковым инструментом в повышении энергоэффективности электроники. Некоторые из этих материалов (SiC и GaN) уже миновали начальный этап и улучшаются эволюционным образом, а другие (Ga₂O₃ и алмаз) только начинают движение по пути первых. Это будет длинный и успешный путь, каким он был и для кремния.

Таблица. Физические параметры различных полупроводников

| Свойство | Si | GaAs | 6H-SiC | 4H-SiC | GaN | Алмаз |
|---|------|------|--------|--------|------|-----------|
| Ширина запрещенной зоны, эВ | 1,12 | 1,43 | 3,03 | 3,26 | 3,45 | 545 |
| Диэлектрическая проницаемость | 11,9 | 13,1 | 9,66 | 10,1 | 9 | 5,5 |
| Напряженность электрического поля пробоя, кВ/см | 300 | 455 | 2500 | 2200 | 2000 | 10000 |
| Подвижность электронов, см ² /(В·с) | 1500 | 85 | | 500 | 1000 | 1000–2000 |
| Подвижность дырок, см ² /(В·с) | 600 | 400 | 101 | 115 | 850 | 850 |
| Теплопроводность, Вт/(см·К) | 1,5 | 0,46 | 4,9 | 4,9 | 1,3 | 22 |
| Скорость дрейфа электронов в режиме насыщения, 10 ⁷ см/с | 1 | 1 | 2 | 2 | 2,2 | 2,7 |

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Компания GaN Systems, мировой лидер в области производства силовых полупроводников на основе GaN, представила четыре тенденции на 2020 г., которые окажут серьезное влияние на мировую энергетику и потребление энергии [1].

Тенденция 1. Электромобили.

В настоящее время по дорогам мира ездит около 5,1 млн электромобилей, а к 2035 г. их число достигнет 125 млн. Учитывая количество электроэнергии, необходимой в качестве «топлива» для электромобилей, создается почва для серьезного неблагоприятного удара по глобальной энергосистеме.

Прогноз компании GaN Systems в 2020 г.:

- конструкции автомобилей от основных производителей будут совершенствоваться в направлении повышения эффективности, удельной мощности и уменьшения веса с упором на зарядные устройства и инверторы тяги;
- в беспилотных автомобилях продолжится развитие технологий с уровня 2 до уровня 3 и улучшенных систем безопасности с использованием LiDAR; технология GaN станет использоваться для разработки решений по обнаружению устройств с большей мощностью и большим радиусом действия.

Тенденция 2. Ускорение внедрения 5G в 2020 г. В Китае коммерческие услуги 5G уже были доступны в 50 городах, включая Пекин, Шанхай, Гуанчжоу и Шэньчжэнь. В Шанхае было активировано около 12000 базовых станций 5G для поддержки покрытия 5G на ключевых открытых территориях города. Провайдеры в Канаде, Франции, Германии, Гонконге, Испании, Швеции, Катаре и ОАЭ объявили о планах по ускорению построения сетей 5G до 2020 г. В результате, по оценкам Gartner, 7% компаний, оказывающих услуги связи, во всем мире уже развернули инфраструктуру 5G в своих сетях.

Прогноз компании GaN Systems в 2020 г.:

- объемы производства оборудования 5G продолжат расти по всему миру; при этом возрастет спрос на увеличение пропускной способности и мощности при меньших размерах устройств. Силовые транзисторы на основе GaN станут предпочтительными для сетей 5G из-за требований к высокой плотности мощности и компактному размеру системы для макро- и микроба-

зовых станций широкополосной передачи. ВЧ-транзисторы на основе GaN будут играть важную роль в усилителях мощности этих базовых станций;

- GaN позволит решить фундаментальную проблему с предоставлением клиентам широкополосных услуг 5G;
- очень высокая частота 5G позволяет быстро передавать большие объемы данных. Но сигнал не проходит сквозь стены. Энергетическое решение на основе GaN решает эту проблему, передавая не только сигнал, но и питание через препятствия;
- макро- и микробазовые станции 5G требуют очень высокой эффективности и удельной мощности. Ожидается, что они будут потреблять как минимум вдвое больше энергии, чем сегодняшние сети, поскольку этим станциям потребуются не только новые сотовые узлы, но и больше энергии для работы существующих узлов;
- использование технологии GaN позволит производить более компактное и легкое оборудование с увеличенной удельной мощностью до 50%. Ожидается, что к 2025 г. будут развернуты 70 млн микробазовых станций.

Тенденция 3. Возобновляемые источники энергии и хранение энергии.

В 2019 г. производство возобновляемой энергии еще не достигло основного критерия круглосуточной доступности 24/7. Во всем мире должен действовать целенаправленный мандат на решение проблем изменения климата, загрязнения и ненадежности энергосистем.

Прогноз компании GaN Systems в 2020 г.:

- высокоэффективные бытовые и коммерческие системы хранения энергии (ESS) с использованием технологии GaN обеспечат распределение, локальное хранение и доступ по требованию к возобновляемой энергии;
- с падением цен на ESS и повышением интереса к использованию местных микросетей для жилых домов и бизнеса продажа ESS продолжат расти, особенно в таких штатах как Калифорния и Техас;
- такие компактные изделия как солнечные панели с солнечным инвертором и встроенным аккумулятором будут обеспечивать питание переменного тока 24 ч в сутки 7 дней в неделю, если местная электросеть выйдет из строя. Эффективность GaN в преобразовании энергии (меньший вес

и меньший ESS) станет ключевым компонентом, позволяющим создавать продукцию такого типа;

- интерес к местным микросетям как для бизнеса, так и для жилых домов будет расти по мере того, как люди будут стремиться повысить свою энергетическую безопасность и использовать ESS коллективного пользования.

Тенденция 4. Адаптеры питания и зарядные устройства: более высокая мощность и распространение USB-C + USB-PD.

В 2019 г. широкое распространение на рынке бытовой электроники получили адаптеры/зарядные устройства меньшего размера, веса и большей мощности с использованием GaN. Крошечные адаптеры привлекли всеобщее внимание, т.к. их размер и вес сравнительно меньше в 2–3 раза.

Прогноз компании GaN Systems в 2020 г.:

- рост популярности изделий USB-C и USB-PD, которые можно использовать для зарядки любой совместимой продукции. Времена использования одного зарядного устройства для одного элемента электроники быстро пройдут, и начнет преобладать использование одного зарядного устройства для всей электроники. Единый адаптер/зарядное устройство, которое будет работать с любым устройством независимо от напряжения для телефона (5 В), планшета (12 В) или ноутбука (19 В), станет нормой;
- один адаптер с питанием от GaN с двумя портами «типа C» сможет удовлетворить потребности в высокой мощности при зарядке нескольких устройств в малом формате;
- USB-PD будет вызывать растущий коммерческий интерес во многих отраслях помимо мобильных телефонов и компьютеров благодаря его спецификациям для приложений с более высокой мощностью (100 Вт). Промышленные рынки также потребуют нового поколения более компактных и мощных зарядных устройств для использования в портативном испытательном и промышленном оборудовании, медицинской технике и цепях энергоснабжения.

Итоговый вывод. В 2020 г. для представленных на рынке продуктов и новых разрабатываемых изделий следующего поколения GaN становится основным строительным блоком, позволяющим повысить энергоэффективность и находящем применение во всех энергосистемах мира.

В конце 2020 г. GaN Systems выпустила новый прогноз на 2021 г. по технологии и оборудованию на основе GaN [2]. 2020 г. стал годом зарядного устройства с использованием GaN-приборов. На вторичном рынке появилось более 100 новых моделей зарядных устройств и адаптеров для телефонов, планшетов и портативных игровых устройств. Ожидается, что 2021 г. станет годом зарядных устройств на основе GaN от OEM-производителей. Мировой рынок мобильных адаптеров достигнет 25 млрд долл. в 2022 г.

В 2021 г. будет расти рынок высококачественных аудиоусилителей класса D для аудиоаппаратуры всех типов, который достигнет 4,92 млрд долл. в 2026 г. против 2,49 млрд долл. в 2018 г. GaN-устройства позволяют уменьшить массогабаритные показатели, обеспечивают превосходное качество звука устройств не только для корпоративного, но и для потребительского сегментов рынка.

По прогнозу компании Gartner в 2021 г., расходы на центры обработки данных (ЦОД), которые затормозились на 10,3% в 2020 г. из-за пандемии COVID-19, вырастут на 6% до 200 млрд долл. В следующем году основное влияние GaN будет сосредоточено на обеспечении новых уровней мощности и плотности данных в ЦОД и на дальнейшем повышении энергоэффективности.

В сегменте электромобилей продолжится тенденция на повышение энергоемкости аккумуляторных батарей, увеличении дальности автономного пробега и цены до уровней автомобилей с двигателем внутреннего сгорания. Использование GaN во внешнем зарядном устройстве мощностью 22 кВт позволяет повысить его производительность на 60%, уменьшить размеры на 33% и сделать эффективнее на 50% в сравнении с кремнием. Совершенствование GaN продолжится в направлении улучшения производительности и обеспечения новых возможностей конструкции автомобилей.

ДОРОЖНЫЕ КАРТЫ РАЗВИТИЯ ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Такие карты разрабатывали несколько ассоциаций в разных странах мира. В Европейский центр силовой электроники (European Center for Power Electronics, ECPE), в который входят 93 промышленных партнера, центры, университеты, институты, идентифицирует области применения и тенденции развития изделий. В своем отчете ECPE определяет приложения для автомобилей для личного пользования как самое крупное и доминирующее применение SiC и GaN

в силовой электронике [3]. Другими важными областями применения являются железнодорожный транспорт, фотоэлектрические инверторы, системы промышленной автоматизации, оборудование на крупных предприятиях.

Приводы, сети и ЦОД. В отчете ECPE делается вывод, что наибольшее влияние на энергетику оказывает экономия за счет более высокой эффективности снижения статических и динамических потерь в информационных центрах и ЦОД. В дорожной карте представлена ожидаемая доля рынка для 28 различных приложений на 2018, 2025 и 2035 гг.

Автомобильные приложения, компоненты и рост их применения обусловлены уменьшением массогабаритных показателей устройств с использованием ШЗП. Эффективность преобразования также приводит к увеличению дальности пробега без использования дополнительной батареи. Компоненты на основе ШЗП, к которым, в основном, относятся 650-В или 1,2-кВ SiC MOSFET, уже применяются. Ожидается, что к 2025 г. они займут доминирующую долю рынка в тяговых инверторах (приводах электродвигателей), преобразователях постоянного тока в постоянный, бортовых зарядных устройствах или индуктивной зарядке. Прогнозируемая рыночная доля компонентов GaN до 650 В будет ниже и ограничивается преобразованием постоянного тока в постоянный с меньшей мощностью или встроенным зарядным устройством.

Железнодорожный транспорт. SiC-приборы обеспечивают преимущества и в тяге двигателей, и во вспомогательной тяге за счет меньшего размера систем охлаждения и массогабаритных показателей изделий. SiC MOSFET с напряжением 1,7–3,3 кВ уже сегодня представлены на рынке. Ожидается, что они займут значительную или доминирующую долю рынка к 2025 г. В более долгосрочной перспективе к 2035 г. SiC MOSFET будут преобладать в устройствах с напряжением 1,7–6,5 кВ.

Для *фотоэлектрических преобразователей* эффективность имеет наивысший приоритет. Гибриды Si-SiC (Si IGBT и SiC-диоды) уже представлены на рынке. Ожидается, что они получат наибольшую долю рынка в ближайшие годы не только в устройствах малой мощности (650 В, менее 600 Вт), но и в среднемощных (1,2 кВ, менее 30 кВт) и мощных системах (1,2–1,7 кВ, более 30 кВт). В то же время SiC MOSFET будут доминировать в течение длительного времени в средне- и высокомоощных приложениях. GaN-устройства могут стать альтернативой в системах малой мощности с низким напряжением (100 В).

Преобразовательные системы ветровой энергии как для генераторов, так и для сети требуют больших затрат. В настоящее время у SiC-приборов нет альтернатив доминирующему положению Si IGBT с напряжением 1,7 кВ. Однако в более долгосрочной перспективе SiC MOSFET могли бы стать альтернативой.

Силовая электроника для промышленности, автоматизации и робототехники включает в себя приводные инверторы и сервоприводы, которые находятся под давлением высокой стоимости, чтобы конкурировать с доминирующими устройствами Si IGBT (650 В...1,2 кВ). В краткосрочной перспективе только гибриды SiC-Si получат значительную долю рынка. Ожидается, что до 2035 г. SiC MOSFET с напряжением 1,2–1,7 кВ займут основную долю рынка. Для многих приложений устройства на основе GaN будут иметь более медленное и слабое влияние. Они также будут ограничены более низким напряжением, не превышающим 650 В. Ожидается, что для больших приводов как с низким, так и с высоким напряжением (1,2–6,5 кВ) Si IGBT будут доминирующими компонентами в течение всего времени. SiC MOSFET будут представлены разными классами напряжения, но гибридные решения – наиболее вероятные устройства (и комбинации устройств) на получение доли рынка.

Дорожная карта Power America Institute – Института при Университете шт. Северная Каролина (NCSU), финансируемого Правительством США в больших объемах. В состав этого учреждения, начавшего свою деятельность в 2016 г., входят компании, институты и научные круги США. Они поддерживают работу по ШЗП, финансирование проектов в компаниях и исследовательских институтах. Их рыночный прогноз предусматривает огромные возможности для роста материалов группы ШЗП, особенно SiC, и до некоторой степени – GaN [4]. Автомобилестроение определяется как основной драйвер роста, за ним следуют фотоэлектрические приборы, информационные центры и обработка данных. В дорожной карте SiC рассматривается как наиболее востребованный полупроводник в приложениях с более высоким напряжением (свыше 600 В), а GaN предназначен для меньших напряжений и потребительских/корпоративных приложений, которые являются массовыми. В дорожной карте указаны критические факторы, к которым относятся фактор стоимости, особенно для высокоточных приложений, надежность и контроль, в первую очередь, для GaN-приложений.

Дорожная карта ITRW (International Technology Roadmap on Wide Band Gap

Semiconductors), или «Международная технологическая дорожная карта по полупроводникам с широкой запрещенной зоной». ITRW является частью общества специалистов по электронике и электро-технике IEEE. Группа ITRW, приступившая к работе в 2015 г., имеет наиболее широкий стратегический план развития, опубликованный в сентябре 2019 г. [5]. В нем рассматриваются краткосрочные (0–5 лет), среднесрочные (5–10 лет) и долгосрочные (10–20+ лет) перспективы. Дорожная карта предполагает широкое распространение электронных компонентов на основе SiC в краткосрочной перспективе. Ожидается, что основное применение SiC-приборы найдут в автомобилестроении, включая тяговые приводы и быструю зарядку для электромобилей, а также инверторы для фотоэлектрических преобразователей и вспомогательные источники питания для высокоскоростных поездов и электричек. Основными компонентами, в которых используется SiC, являются диоды с барьером Шоттки и MOSFET в диапазоне класса 650 В...2,7 кВ, а также другие устройства, например биполярные транзисторы с управляемым переходом (BJT), JFET и транзисторы с суперпереходом (SJ).

ITRW оптимистичнее оценивает технологию GaN, чем другие дорожные карты. Несмотря на то, что это более новая и менее зрелая технология, чем SiC, ожидается, что она станет актуальной в среднесрочной перспективе. Основные приложения нитридной силовой электроники работают с меньшим напряжением и имеют больший рыночный объем. К ним относятся оборудование для ЦОД, бытовая электроника, зарядные устройства, в т. ч. для электромобилей, и фотоэлектрические инверторы.

Дорожная карта Yole – французской коммерческой компании, занимающейся анализом рынка и составлением стратегических планов развития для разных технологических областей, а также сравнением, обратным инжинирингом, анализом электронных компонентов и устройств. Все предыдущие годы Yole активно делала прогнозы по рынку SiC-приборов, а также по рынкам силовой GaN-электроники. Эти прогнозы были всегда чрезмерно амбициозными, но в последние годы хорошо предсказали рост силовой SiC-электроники. На рисунке 1 приведены прогнозы Yole по развитию силовой электроники на основе SiC и GaN на весну 2019 г. [6–7]. Для рынка GaN-приборов компания Yole предлагает два разных сценария – один консервативный («Базовый сценарий № 2»), а второй – более агрессивный («Бычий сценарий»), который предполагает высокий спрос на GaN-приборы в беспроводных зарядных устройствах

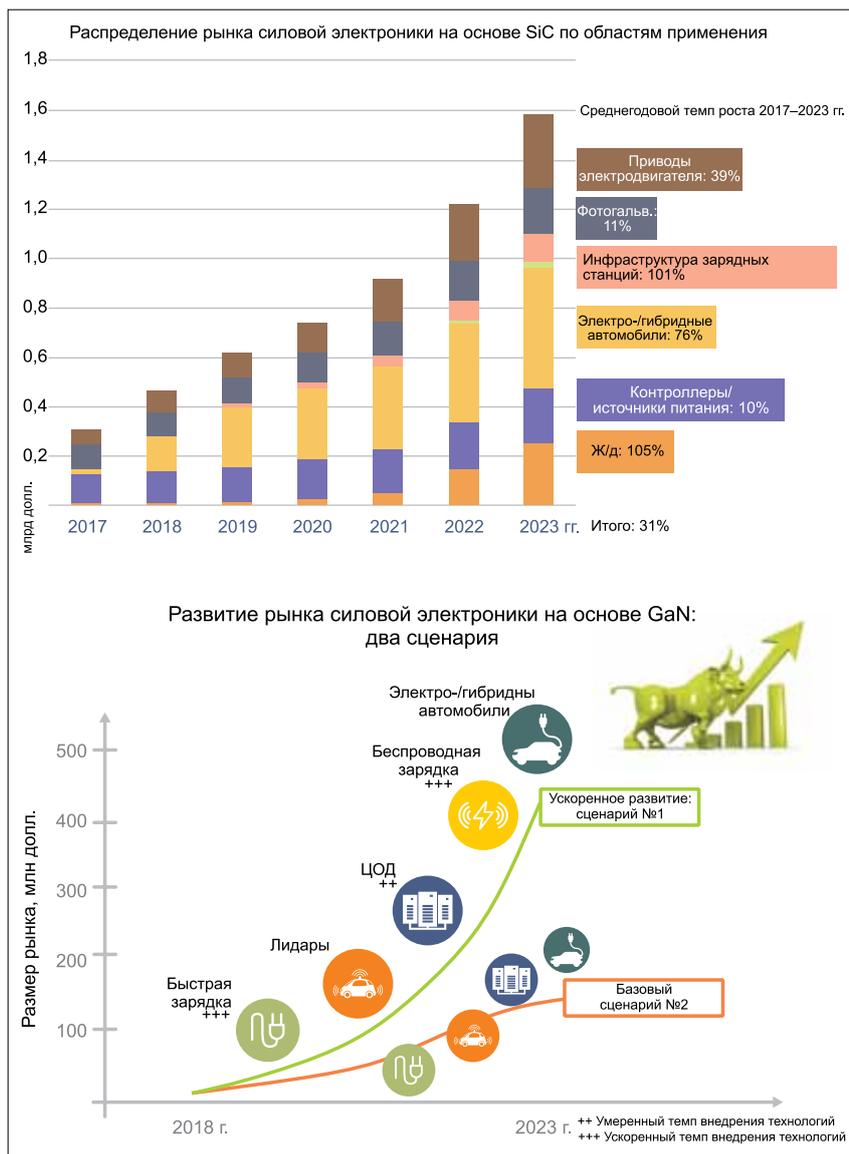


Рис 1. Прогноз мирового рынка силовой электроники на основе: а) SiC; б) GaN в 2017–2023 гг. от компании YOLE

для бытовой техники, например мобильных телефонов.

Основные итоги и выводы существующих дорожных карт. Все имеющиеся дорожные карты предполагают резкое увеличение использования ШЗП в силовой электронике в ближайшие годы – и SiC, и GaN, в то время как решения из других материалов требуют более длительного технологического развития. Основным драйвером роста как в отношении объема, так и цены, является спрос на эти полупроводники в электромобилях для личного пользования. Этот драйвер увеличит объем и снизит цену, что станет полезным и для других приложений, где силовая электроника с ШЗП повысит эффективность и уменьшит потребление энергии, хотя ценовой барьер для существующих технологий на основе кремния, особенно IGBT, ограничит использование ШЗП в приложениях с высоким током и большой мощностью.

ЕВРОПЕЙСКАЯ ПРОГРАММА ULTIMATEGAN

Особенного внимания заслуживает обширная и амбициозная Европейская программа UltimateGaN, координируемая компанией Infineon Technologies [8]. В этой программе со сроками май 2019 – апрель 2022 гг. и стоимостью 48 млн евро участвуют 26 партнеров из девяти стран. Она включает в себя семь областей деятельности, направленных на совершенствование технологии производства силовых и ВЧ-компонентов на основе GaN, их сборки, исследование надежности и применение в силовой и ВЧ-электронике. Первый пакет WP1 Vertical Power GaN рассмотрен в разделе «Вертикальные GaN HEMT» настоящей статьи.

Направление WP2 Benchmark Lateral Power GaN («Эталонные латеральные силовые GaN-приборы»), лидером которого является Infineon, фокусируется на реализации высоковольтных (600 В)

нормально закрытых латеральных силовых GaN HEMT на пластинах диаметром 200 мм со значительно лучшим соотношением между производительностью и стоимостью по сравнению с современными устройствами. Помимо разработки качественной и недорогой эпитаксии из GaN на Si диаметром 200 мм, основной целью работ будет уменьшение размеров кристалла за счет минимизации его неактивных площадей и активных ячеек GaN-транзистора вместе с оптимизацией схемы межсоединений. Чтобы выйти за пределы существующих концепций p-GaN, будут исследованы самые инновационные горизонтальные подходы HEMT с революционными характеристиками. Кроме того, технология латеральных GaN HEMT с низким напряжением (100 В) будет переведена на следующую ступень в отношении производительности и надежности, чтобы дать возможность реализовать инновационные решения в автомобильных приложениях LIDAR, в которых быстрое переключение устройств GaN HEMT является критически важным требованием. Наконец, будут исследованы конкурентоспособные по стоимости безбуферные эпитаксиальные пластины GaN на SiC с плотностью дислокаций и уровнями качества кристаллов, недостижимыми с GaN на Si. Кроме того, будут реализованы (первоначально на 2-дюймовых подложках) варианты создания буферов GaN на Si на основе наноматериала с целью их тестирования. Лучшие в своем классе латеральные силовые устройства на основе GaN, созданные в этом рабочем пакете, обеспечат во многих приложениях более высокие уровни плотности мощности и эффективности. Существенно улучшенное соотношение между производительностью и стоимостью закладывает основу для широкого внедрения силовых GaN HEMT, производимых в Европе, на конкурентных и растущих рынках всего мира.

Направление *WP3 GaN on Silicon RF Break Through* («Прорывные ВЧ-решения с использованием технологии GaN на Si»), лидером которого является Infineon, ориентировано на рассмотрение и демонстрацию разработки базовой технологической платформы для частот 4,5 и 28 ГГц для нормально открытого латерального RF GaN HEMT миллиметрового диапазона для MMIC. Рассматривается вся цепочка разработки, начиная с выбора концепции построения 28-ГГц устройства; разработки технологий необходимых технологических блоков, отдельных процессов и процессов эпитаксии; оптимизации производительности за счет использования передовых процессов

и методов, таких как длина затвора 100 нм и его особая геометрия; оценки и улучшения устойчивости и надежности, касающихся, среди прочего, значений $R_{DS(ON)}$, температурного дрейфа порогового напряжения, и заканчивая функциональным измерением 28-ГГц устройства для демонстрации производительности и возможностей этой новой технологической платформы. С развитием данной технологии и ее процессов, совместимых со стандартной массовой кремниевой КМОП-технологией и технологией силовой электроники на пластинах диаметром 200 мм, планируется довести уровень производства в Европе до лучших в своем классе показателей удельной мощности и эффективности, а также увеличить долю рынка применения ВЧ- и силовых компонентов, сделанных в Европе.

Направление *WP4 Assembly and Packaging of high speed and high frequency GaN on Si devices* («Сборка высокоскоростных и высокочастотных устройств GaN на Si»), лидером которого является Silicon Austria Labs, включает в себя исследования по сборке ВЧ-устройств на основе GaN на Si для увеличения токов, снижения паразитных эффектов, повышения частоты и надежности, а также для улучшения рассеивания тепла.

Направление *WP5 GaN Reliability and Defect Research* («Надежность и исследование дефектов GaN»), лидером которого является итальянский университет UNIPD, фокусируется на анализе повышения и механизмов, снижающих надежность в усовершенствованных GaN-приборах. Особое внимание будет уделено характеристике дефектов, поскольку точечные и протяженные дефекты могут ухудшать динамические характеристики, напряжение пробоя и долгосрочную стабильность GaN-транзисторов. Результаты анализа войдут в разделы WP1–WP3 для улучшения вертикальных латеральных устройств и ВЧ-транзисторов GaN на Si, в WP4 для разработки передовых стратегий сборки и в WP6 для обеспечения надежности на уровне приложений.

Направление *WP6 GaN RF and Power Applications* («ВЧ GaN и приложения силовой электроники»), лидером которого является испанский исследовательский центр IKERLAN, делает упор на высокоэффективные применения, включая выпрямители нового поколения для телекоммуникационных центров и ЦОД; фотоэлектрические инверторы; изолированные преобразователи питания постоянного тока для собственных микросетей; наносекундные импульсные лазерные драйверы для лидаров; зарядные устройства для

электротранспорта; усилители мощности для приложений RF, 5G и радаров. Один из ключевых моментов деятельности в направлении WP6 заключается в поиске оптимальной конструкции для каждого приложения, чтобы в полной мере использовать преимущества GaN-технологии.

Направление *WP7 Project Management, Dissemination and Exploitation* («Управление проектами, распространение и использование»), которое возглавляет Infineon, ставит перед собой три основные цели: 1) управление и снижение рисков; 2) распространение; 3) эксплуатация. Компания Infineon контролирует техническую сторону деятельности, выполняет администрирование ресурсов и результатов в соответствии с планом проекта, а также распространением результатов среди заинтересованных сторон и сообществ в Европе.

Одним из партнеров программы UltimateGaN является шведский Линчёпингский университет, который в сотрудничестве со своей дочерней компанией SweGaN провел исследования по использованию SiC-подложки и нового процесса гетероэпитаксиального роста пластин, предотвращающего образование структурных дефектов [9]. Таким образом, достигаются максимальные напряжения, сравнимые с показателями SiC-приборов, но обеспечивается способность работать на частотах GaN на Si. Исследование также показало, что внедрение этой технологии позволит улучшить управление тепловым режимом, увеличить вертикальное напряжение пробоя до значения выше 3 кВ и уменьшить сопротивления во включенном состоянии менее чем на порядок по сравнению с имеющимися решениями.

Структура QuanFINE основана на концепции гибридного материала GaN–SiC, сочетающего в себе тонкий слой GaN с высокой скоростью электронов и объемный слой SiC с высоким уровнем пробоя, который был реализован с помощью революционного процесса MOCVD SweGaN и доказал свою пригодность для использования как в высокочастотных, так и в силовых транзисторах. Для ВЧ-применений QuanFINE имеет гетероструктуру HEMT без буфера, в которой слой зародышеобразования AlN эффективно служит барьером на обратной стороне (см. рис. 2). Таким образом, электроны в тонком канале GaN (< 250 нм) хорошо удерживаются в квантово-ямоподобной структуре с помощью переднего и заднего барьеров. В силовых приложениях структура QuanFINE использует полуизолирующую подложку SiC в качестве слоя блокировки напряжения, качество и удельное сопротивление которого значительно выше, чем у обычного толстого буфер-

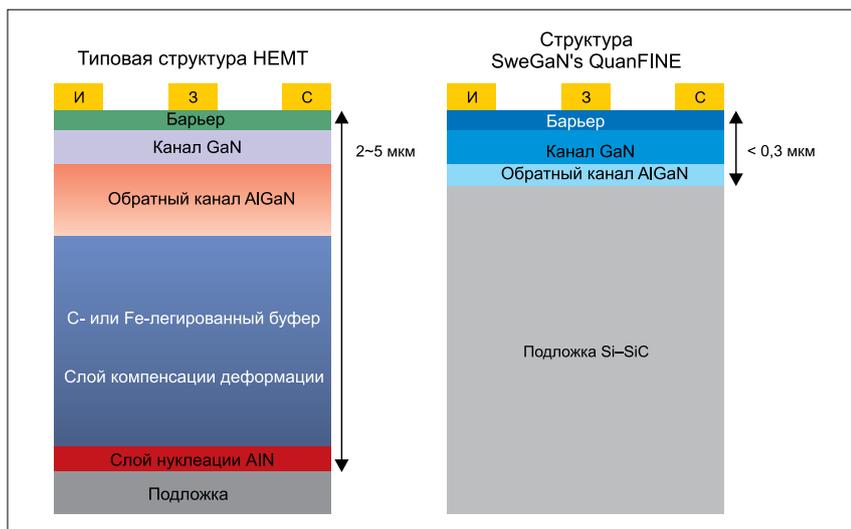


Рис. 2. Типовая структура транзисторов GaN HEMT и SweGaN

ного слоя GaN, легированного углеродом. Кроме того, обеспечивается лучшее управление тепловым режимом в своем классе благодаря почти идеальному интерфейсу GaN–SiC. Благодаря использованию запатентованного процесса роста высокой подвижности SweGaN, в эпителастинах с гетероструктурами AlGaN–GaN и InAlN–AlN–GaN подвижность электронов канала может превысить $1800\text{--}2000\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, что на 30% больше подвижности электронов в обычном канале. Рекордно высокая подвижность обеспечивает более высокий КПД и более высокую рабочую частоту транзисторов. Эпитаксиальные слои GaN и AlN, выращенные с помощью высокотемпературного процесса SweGaN, демонстрируют превосходное структурное качество. Обычно плотность пронизывающих дислокаций в слое GaN находится в низком режиме 10^8 см^{-2} , а зародышевый слой AlN не имеет границ зерен. По утверждению SweGaN, это лучшее структурное качество в классе, которое не только гарантирует надежность GaN, но и значительно снижает риск выхода устройства из строя из-за структурных дефектов. Обычное термическое граничное сопротивление (TBR) на границе раздела GaN–SiC вызывает дополнительное повышение температуры канала в транзисторах до 40%. Используя слой зародышеобразования AlN со сверхнизким TBR, удалось компенсировать это дополнительное повышение до незначительного уровня. Выдающееся структурное качество тонкого зародышевого слоя AlN значительно улучшает передачу тепла от канала подложке SiC с высокой теплопроводностью. Это позволяет решить одну из самых серьезных проблем, связанных с ВЧ- и силовыми устройствами – надежность. За счет уменьшения рабочей температуры

на 25°C срок службы устройства увеличивается в 10 раз.

SiC И GaN – ПОКА НЕ КОНКУРЕНТЫ ПО ПРИМЕНЕНИЮ

Карбид кремния и нитрид галлия на текущий момент являются главными материалами из группы ШЗП на быстрорастущих рынках полупроводниковой электроники. Несмотря на сходство на концептуальном уровне, компоненты SiC и GaN не взаимозаменяемы друг с другом, а различаются по параметрам использования в системе, в которой работают. Устройства на основе SiC выдерживают более высокие напряжения – до 1200 В и более, тогда как устройства на основе GaN выдерживают меньшие напряжения и плотности мощности. С другой стороны, благодаря почти нулевому времени переключения GaN-устройств их можно использовать в очень высокочастотных приложениях с беспрецедентной эффективностью и производительностью. Эта идеально положительная характеристика может оказаться неудобной: если паразитные емкости компонента не близки к нулю, возникают всплески тока порядка десятков ампер, что может вызвать проблемы на этапе проверки электромагнитной совместимости. SiC имеют дополнительные преимущества из-за возможности использования выводных корпусов, которые позволяют быстро заменять IGBT и MOSFET новыми SiC-приборами, тогда как GaN дает лучшие результаты при эксплуатации в корпусах для поверхностного монтажа, а выводные корпуса уменьшают преимущества GaN за счет избыточных паразитных параметров выводного корпуса. Общей проблемой для них до недавнего времени была необходимость в использовании драйверов затворов, позволяющих наилучшим образом задействовать

характеристики транзисторов на их основе по уровням применимого напряжения, не согласованного с управлением классических кремниевых транзисторов. Однако в последнее время в отношении GaN HEMT эта проблема решалась двумя способами: разработкой GaN-драйверов с интегрированным в его чип транзистором и созданием специализированных кремниевых драйверов с адаптированным напряжением по управлению затвором GaN HEMT. Тем не менее остается проблема невозможности простой выводной замены кремниевого MOSFET карбидокремниевым аналогом или GaN HEMT.

Что касается стоимости, то устройства на основе SiC в настоящее время дешевле, поскольку они стали совершенствоваться и коммерциализоваться до GaN. Требования по снижению цены и конкуренция на мировом рынке электроники привели к тому, что SiC-пластины последовательно прошли эволюцию повышения диаметра 50–76–100–150 мм, а теперь компания Wolfspeed ведет строительство завода по выпуску SiC-пластин диаметром 200 мм, окончание которого намечено на 2024 г. [10]. Можно было бы ожидать, что GaN-технология перейдет на 300-мм пластины, но это значительно ограничит возможности большинства производителей пластин силовой электроники, в основном работающих с пластинами диаметрами 150 и 200 мм и, к тому же, не будет сопровождаться переходом к нанометровым размерам, характерным для пластин такого диаметра.

ИНВЕСТИЦИИ КРУПНЫХ КОМПАНИЙ В ШИРОКОЗОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

Электронные компоненты на основе широкозонных полупроводников являются очень перспективными – они формируют направление развития полупроводниковой микроэлектроники на многие десятилетия. И это отчетливо понимают крупные мировые компании электронной промышленности. Однако если 30 лет назад эти компании набирали персонал и создавали новые подразделения по исследованиям, разработке и развитию новых продуктов, то к настоящему времени эти подходы изменились. Крупные компании покупают стартапы вместе с их патентами и персоналом по разработке новых материалов и продуктов, вступают в кооперацию с технологическими контрактными производителями пластин и чипов. Главными причинами такой политики является не экономия финансовых средств, поскольку затраты, наоборот, могут только повышаться, а необходимость ускорить вывод продукции на рынок.

Еще одним способом для компаний получить доступ к новой продукции является финансирование и инвестиции в стартапы. Именно так и следует расценивать решение *MediaTek*, четвертой мировой полупроводниковой компании по объему продаж, инвестировать финансовые средства в производство GaN-транзисторов израильской компании *VisiC* для электромобильных инверторов большой мощности [11]. Это направление продукции не является профилирующим для *MediaTek*, специализирующейся на кристаллах для беспроводной связи, но тайваньская фабрика-компания четко видит стратегические перспективы таких изделий. В мае 2020 г. *VisiC* объявила о партнерстве с немецким поставщиком автомобилей *Friedrichshafen AG* в области создания высокопроизводительных электрических трансмиссий для транспортных средств. Основываясь на полупроводниковой технологии *VisiC D³GaN*, две компании разработают приложения для трансмиссии на 400 В, охватывающие самый большой сегмент рынка электромобилей. Высоковольтная технология *VisiC D³GaN* обеспечивает пониженный заряд затвора и емкость с низким сопротивлением R_{DS} , поэтому для переключения GaN-устройства требуется энергия величиной всего 140 мкДж. Следовательно, коммутационные потери в три-пять раз ниже, чем у сопоставимых SiC MOSFET. «У GaN – лучшие фундаментальные физические свойства, к которым относятся максимальное электрическое поле пробоя и плотность тока, чем у кремния или SiC», – утверждает Грегори Бунин, технический директор *VisiC*. Компания *VisiC* не имеет собственного производства чипов и потому сотрудничает с контрактными производителями пластин. Ранее в 2018 г. израильская компания сообщала о кооперации с TSMC по освоению промышленной технологии производства кристаллов по GaN-техпроцессу [12].

Крупнейший европейский полупроводниковый производитель *STMicroelectronics* уже обладает несколькими технологиями для изготовления приборов на основе широкозонных полупроводников, включая SiC и GaN. Одна из GaN-технологий на пластинах диаметром 150 мм разработана с помощью компании *MACOM* для производства ВЧ-изделий [13]. Вторая технология на основе гетероперехода GaN-Si на 200-мм пластинах для силовой электроники разработана французской компанией *CEA-Leti* [14]. Обе технологии освоены на фабрике STM в городе Туре во Франции. В феврале 2020 г. STM объявила о заключении сдел-

ки с компанией TSMC по производству у нее силовых компонентов на основе GaN [15]. Таким образом, STM получит доступ к GaN-технологии третьего типа. Одной из причин кооперации с TSMC может быть сдвиг сроков выпуска GaN-продукции на фабрике в Туре, который должен был начаться к концу 2019 г. Второй причиной могут быть худшие экономические показатели фабрики в Туре в сравнении с TSMC. Последнее выглядит странным с учетом того, что фабрика в Туре использует 200-мм пластины, а TSMC – 150-мм. При качественной технологии первые должны быть экономически эффективнее вторых. Очевидно, при массовом производстве экономика у TSMC будет лучше.

Другой крупный европейский (пока еще) полупроводниковый производитель NXP инвестировал 100 млн долл. в выпуск ВЧ GaN-изделий для сетей 5G на своем заводе в шт. Аризона (США) [16]. Актуальность создания технологии 5G в настоящее время возросла вдвое в результате всемирного запрета на использование китайского оборудования Huawei, которое должно было стать центром инфраструктуры 5G. Это обстоятельство открыло перед западными компаниями возможности для производства оборудования 5G. Разработка энергоэффективных ВЧ-усилителей – одна из областей, которая принесет особые выгоды. Таким образом, первоначальные инвестиции в размере 100 млн долл. (которые были сделаны до запрета на китайское оборудование) были исключительно хорошим шагом, считают в NXP.

Американская компания *Transphorm Inc.*, лидер в разработке и производстве полупроводников из нитрида галлия на 650 В с высочайшей надежностью (квалификация JEDEC и AEC-Q101), заявила о получении 15 млн долл. инвестиций от компании *Yaskawa Electric Corporation* [17]. Эта новость появилась всего через несколько недель после того, как *Yaskawa* представила свой интегрированный серводвигатель Σ -7F, основанный на высоковольтном (HV) транзисторе GaN FET *Transphorm* для обеспечения беспрецедентной производительности и удельной мощности.

Transphorm намеревается направить средства на разработку своего GaN-изделия. Эта технология также является оптимальным решением для автомобильных систем, ЦОД, промышленных источников питания, возобновляемых источников энергии и других промышленных приложений. Новаторским достижением этого совместно разработанного устройства является то, что Σ -7F объединяет в себе сервоусилитель с серводвигателем. Как было анонси-

ровано ранее, использование *Yaskawa* полевых транзисторов *Transphorm* на основе GaN позволяет создать интегрированный серводвигатель, который в два раза меньше аналогичной конструкции с использованием кремниевой технологии [18]. Кроме того, применение GaN позволило на 30% уменьшить размер пульта управления.

В январе текущего года южнокорейская инвестиционная холдинговая компания *SK Group*, объявила о приобретении 33,6% акций компании *Yes Power Techniques*, единственного производителя силовых полупроводников из карбида кремния (SiC) в Корее, за 26,8 млрд вон (20 млн евро) [19].

Компания *Nexperia*, созданная в 2016 г. на базе одного из подразделений NXP и проданная в 2018 г. китайской компании *Wingtech Technology* за 3,6 млрд долл., строит в Шанхае завод по производству силовых полупроводников на 300-мм пластинах. В феврале текущего года *Nexperia* заявила об увеличении финансирования на разработку и освоение изделий на основе широкозонных полупроводников, которое составит 9% от общего объема продаж *Nexperia* [20]. Финансирование будет направлено на 200-мм производство чипов в Гамбурге (Германия) и в Манчестере (Великобритания), в расширение центров разработки в этих городах, а также в Малайзии и Китае.

Британское правительство приняло решение поддержать проект *Compound Semiconductor Center (CSC)* и *Newport Wafer Fab (NWF)* по разработке технологии эпитаксии и фаундри-производства чипов GaN на Si. Проект позволит начать выпуск изделий для электромобилей, инверторов тяги и повысить производительность NWF с 8000 до 14000 пластин диаметром 200 мм в неделю [21].

В январе 2021 г. японская корпорация *Kyocera* завершила приобретение молодой американской *SLD Laser* (или *Soga Laser Diode*) – одной из ведущих компаний в области разработки сверхъярких источников света и лазерных диодов на основе нитрида галлия [22]. Они обладают на порядок большей яркостью по сравнению со светодиодными, что открывает новую эру в сфере источников освещения для автомобильной, медицинской промышленности, связи и многих других направлений. О стоимости сделки не сообщается.

СТИМУЛЫ И СУБСИДИИ МИРОВЫХ СТРАН ПОКУПАТЕЛЯМ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Тенденция стимулирования граждан для приобретения электромобилей наблюдается во всех развитых странах. Власти Франции будут доплачивать

по 1000 евро покупателям подержанных электрокаров на территории страны. Субсидия на новые электрокары в настоящее время составляет 7000 евро. Страна ставит цель продать 100 тыс. электрокаров в 2020 г. Госсубсидии уже привели к взрывному спросу на электрокары в Европе: правительства Германии и Франции увеличили размеры субсидий на покупку электрокаров до 9000 и 7000 евро, соответственно, что привело к взрывному росту спроса на них. Ранее сообщалось, что крупнейший штат США Калифорния профинансирует полный переход на электрокары к 2035 г. [23]. Предложенная демократами в Палате Представителей США концепция снижения вредных выбросов предусматривает их сокращение электроэнергетическими компаниями до нуля к 2040 г., а также производство исключительно электрокаров всеми автопроизводителями США в 2035 г. Кроме того предусматривается ужесточение норм по выбросу метана в атмосферу (он увеличивает парниковый эффект гораздо больше, чем CO₂), повышение энергоэффективности зданий, продление до 2025 г. налоговых льгот на солнечную и ветровую энергетику. В Норвегии уже давно объемы продаж электрокаров превышают продажи авто с двигателями внутреннего сгорания. В октябре 2020 г. доля проданных электрокаров и подзаряжаемых гибридов составила 80%, а за 10 мес. их продажа выросла на 67,8% [24].

Продажи автомобилей в Европе восстанавливаются медленнее, чем в Китае или Северной Америке, что вынудило политиков повысить объем субсидий для стимулирования экономической активности и рынка, где занято много людей. В результате, во Франции, по прогнозам, продажи Renault Zoe в этом году удвоятся, а в Амстердаме (Нидерланды), полностью переходящем на электрокары с 2030 г. (с этого года автомобилям с ДВС въезд в город запрещен), ежемесячный фонд в 10 млн евро для субсидий на покупку электрокаров закончился... за восемь дней [25]. В Германии огромные субсидии увеличили продажи стартапа Carfellows в 10 раз. «Это идеальное время для нас», – заявил Райнер Вестдорп (Rainer Westdoerp), представитель компании, предложившей в лизинг электрический Smart EQ за... 10 евро в месяц! По словам Вестдорпа, в июне всего за три дня за такими «смартами» выстроилась очередь из 1000 человек, из-за чего прием заявок временно приостановили. В Германии с июня 2020 и до конца 2021 г. в рамках второй антикризисной программы правительства ФРГ удвоены

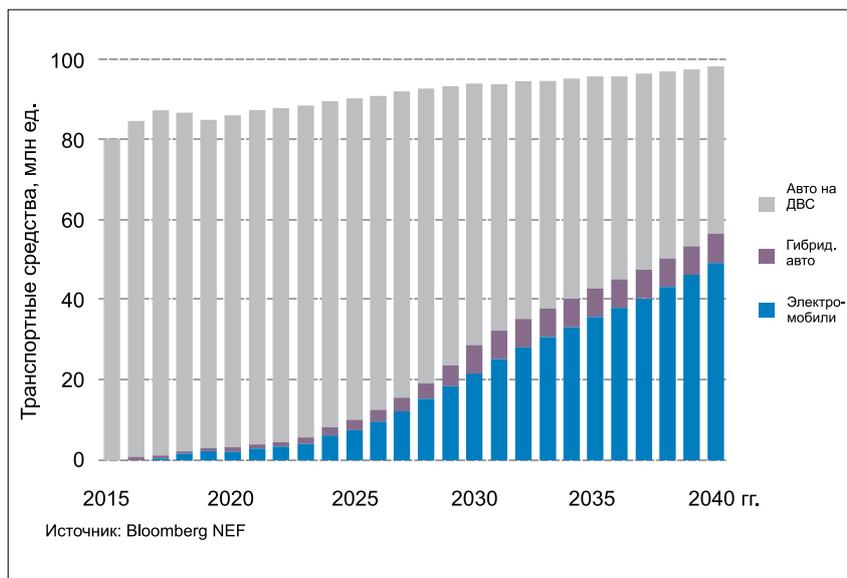


Рис. 3. Прогноз мирового авторынка на 2015–2040 гг.

государственные субсидии физическим и юридическим лицам, приобретающим автомобили с экологичными альтернативными двигателями. Покупателям электрокаров по цене менее 40000 евро от государства полагаются 6000 евро вместо прежних 3000, плюс еще 3000 от производителя; в общей сложности, это 9000 евро. В первом полугодии 2020 г. продажи автомобилей с бензиновыми моторами снизились на 43,6%, с дизельными – на 37%. В то же время продажи электрокаров выросли на 42,7%, а гибридов – на 54,6% [26]. При этом число подзаряжаемых от сети плагин-гибридов (plug-in), составляющих примерно треть от общего числа гибридов, подскочило на 199,8%. В рамках все той же второй антикризисной программы правительства ФРГ ставка НДС с июля по декабрь 2020 г. снижена с 19 до 16%, что для покупателей любых автомобилей дает ощутимую экономию.

Правительство Австрии с 1 июля компенсирует покупателям электрокаров 5000 евро вместо прежних 3000 евро.

Конечно, не везде ситуация с государственными субсидиями на покупку электрокара выглядит, как во Франции и Германии. К примеру, в Бельгии, наоборот, сокращают такую программу, но в целом для европейцев ситуация выглядит очень неплохо.

Власти Японии планируют увеличить в два раза с 3800 до 7600 долл. выплаты покупателям электрокаров. В 2019 г. в стране были проданы 20 тыс. электрокаров [27].

В России ситуация с продажей электрокаров удручающая из-за высокой цены из-за девальвации рубля, отсутствия сервиса зарядки и обслуживания, климатических условий. Россия в этом рейтинге

занимает третье место с конца после Бразилии и Индии. В отличие от развитых стран, даже предоставление субсидий и льгот не изменит ситуацию в лучшую сторону в нашей стране, если первые две причины будут превалировать.

По прогнозу Bloomberg, к 2025 г. мировые продажи электрокаров достигнут 10 млн в год, а к середине 2030-х гг. они превзойдут по продажам авто с ДВС (см. рис. 3) [28]. Очевидно, что одним из важнейших элементов такой программы являются электрические компоненты на основе ШЗП, используемые в авто и в сервисной отрасли. И это лучшая гарантия, что продажи такой электроники будут только расти.

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ GaN HEMT

Практически все имеющиеся на рынке дискретные транзисторы GaN HEMT или интегрированные в чип GaN-микросхем имеют горизонтальную (латеральную) структуру, что обусловлено несколькими обстоятельствами. В них использован принцип поверхностной конструкции, используемый в СВЧ-транзисторах на основе GaN, которые появились на рынке раньше силовых транзисторов на основе нитрида галлия. Вторым важным обстоятельством является использование кремниевой подложки большого 200-мм диаметра, на которую наносится многослойная эпитаксиальная пленка GaN. Кремний в такой структуре выполняет пассивную функцию несущей подложки, позволившей за счет большого диаметра сделать качественный прорыв в снижении стоимости эпитаксиальных структур и транзисторов. Однако различие в параметрах кристаллической решетки GaN и Si ограничивает максимальную толщину эпитаксиального слоя GaN, не приводящую к снижению качества и надежности.

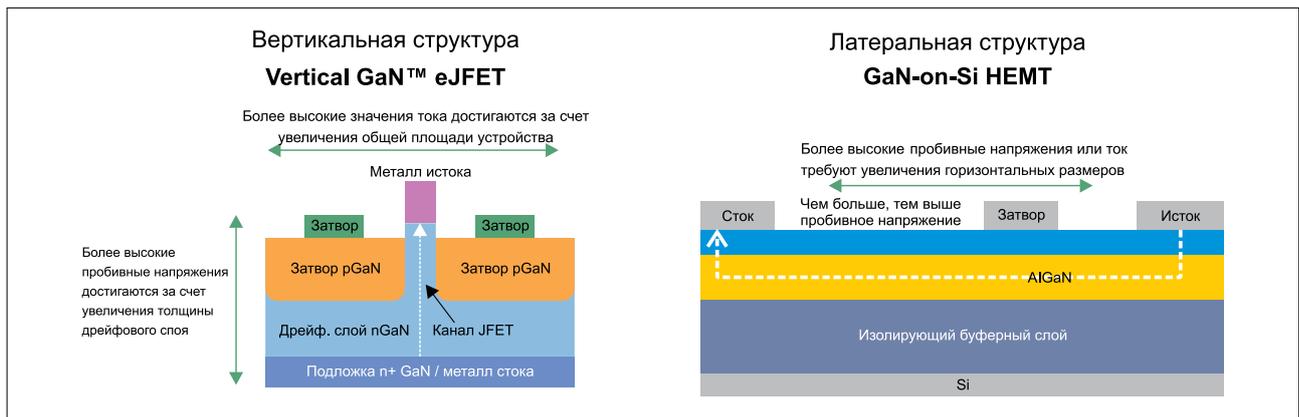


Рис. 4. Структура вертикального транзистора GaN eJFET и латерального GaN-на-Si HEMT

Горизонтальные конструкции на основе GaN-на-Si (или GaN-на-SiC) сочетают в себе материалы с разными значениями коэффициента теплового расширения (КТР), что может привести к снижению надежности. В типичном устройстве GaN HEMT канал расположен очень близко к поверхности (порядка нескольких сотен нм), что создает проблемы при пассивации и охлаждении. В нем ширина разделения областей сток-исток определяет напряжение пробоя устройства. Более разделение областей сток-исток увеличивает сопротивление канала и ограничивает допустимый ток. Чтобы компенсировать это ограничение и увеличить пропускную способность по току, устройство необходимо сделать шире. Комбинация требований для обеспечения большего напряжения и большего тока приводит к созданию устройств с большой площадью и, следовательно, более высокой емкостью. Поэтому латеральные транзисторы GaN-на-Si ограничены напряжением пробоя на уровне около 650 В. Для увеличения напряжения свыше 650 и 1000 В используется вертикальная конструкция GaN-транзисторов. А для идеального согласования КТР эпитаксиальной структуры и подложки применяется один и тот же материал. На массивной подложке GaN можно выращивать очень толстые эпитаксиальные слои GaN, что позволяет создавать устройства с очень высоким напряжением. Структуры вертикального и латерального GaN-транзисторов представлены на рисунке 4. Вертикальные устройства на основе GaN предназначены для проведения тока через дрейфовый слой внутри основной части транзистора. Следовательно, не существует механизма динамического изменения сопротивления в открытом состоянии $R_{DS(ON)}$, которое создается зарядами, захваченными из-за поверхностных примесей. В отличие от горизонтальных устройств из GaN, в вертикальных структурах тепло

оптимально передается через однородный материал GaN-подложки, обладающей лучшей теплопроводностью, чем кремний, а от нее непосредственно к выводной рамке корпуса, на которую монтируется кристалл. Вертикальные GaN-устройства на 90% меньше кремниевых аналогов. Емкость напрямую зависит от площади устройства: чем она меньше, тем меньше емкость и тем выше коммутационная частота. У вертикального GaN-прибора на 67% меньше коммутационные потери, чем у Si MOSFET, в большинстве типовых приложений, особенно в источниках питания.

Компания NexGen Power Systems, занимающаяся разработкой вертикальных GaN-приборов, создала приборы с толщиной дрейфового слоя более 40 мкм – диоды с напряжением пробоя более 4000 В и транзисторы с удельным сопротивлением 2,8 мОм·см². При той же токовой нагрузке размер вертикального GaN-устройства примерно в шесть раз меньше, чем у 650-В GaN-на-Si HEMT, но при этом гораздо больше напряжение пробоя – 1200 В [29]. Специалисты компании утверждают, что преимущество этого устройства в том, что в нем только *p-n*-переходы изготовлены из GaN. У него отсутствуют двумерные электронные газы и сложные слои материалов, а есть усовершенствованный JFET-транзистор, который является хорошо изученным устройством. Благодаря *p-n*-переходам он обладает повышенной надежностью и устойчивостью к лавинному пробоям.

В рамках европейской программы UltimateGaN, состоящей из семи направлений, имеется проект **WP1 Vertical Power GaN** по разработке высоковольтных вертикальных транзисторов [8]. Лидером этого направления является ведущий европейский центр по микроэлектронике – бельгийский IMEC, а партнерами выступают восемь европейских компаний. В WP1 будет разработана технология вертикальных устройств

на подложках большой площади (200 мм) с технологическими КМОП-совместимыми модулями. Чтобы обеспечить работу этих ключей при высоком напряжении, на новой подложке поли-AlN с согласованным КТР будет создан стек эпитаксиальных слоев с толстой дрейфовой областью с минимальной толщиной 5 мкм. Дальнейшие действия будут направлены на проектирование и моделирование материала и ключей, а также на подробное описание материалов пакета и изготовленных компонентов. Достижение этой цели станет настоящим прорывом для вертикальных устройств на основе GaN – появится рентабельный способ создания высоковольтных ключей, а также потенциальный соперник и альтернативы для изделий на основе SiC. Параллельно с работой над подложками большой площади будут изготовлены вертикальные устройства с толстым дрейфовым слоем на подложках из GaN толщиной 2 дюйма для изучения предельных свойств материала и тестирования, что напрямую соответствует общей цели проекта WP1 по изучению возможностей реализации GaN-устройств с вертикальной структурой и связанных с ними технологий. Исследуя новые материалы, толстые дрейфовые области и КМОП-совместимую технологию, проект позволит создать первую крупномасштабную производственную технологию вертикального построения устройств на основе GaN.

Еще одно направление развития вертикальных GaN транзисторов по технологии **SweGaN** рассмотрено в разделе «Европейская программа UltimateGaN».

По мнению автора настоящей статьи, эти проекты по разработке концепции вертикальных высоковольтных транзисторов являются наиболее значимыми для силовой электроники в ближайшие три года не только с точки зрения создания нового класса транзисторов и диодов, альтернативных SiC, но и для освоения GaN-микросхем по КМОП-технологии

¹Продолжение. Часть 4 см. в ЭКЗ, 2021 г.

с интегрированными в них высоковольтными ключами и диодами (свыше 1000 В), чего нет у карбида кремния.

ИСКУССТВЕННЫЙ АЛМАЗ

Алмаз как полупроводник не только является идеальной теплопроводящей подложкой, но и превосходит кремний в 16 раз по этому параметру и может использоваться в приложениях с высокой плотностью мощности. Алмаз в монокристаллической форме можно применять как полупроводник, полностью заменяя полупроводники GaN и SiC.

Если карбид кремния занимает уникальное положение на рынке высоковольтной и силовой электроники, уникальное положение алмаза позволяет ему заменить вакуумные лампы, все еще используемые в мощных беспроводных коммуникациях, например в радиовещательных станциях, спутниках связи и радарх. Ни один из других полупроводников, например GaN, SiC, Si, GaAs или InP, не подходит для беспроводной связи высокой мощности, как алмаз. Эти уникальные свойства способствуют переходу на его применение в электронных изделиях.

Еще в 2012 г. американское Агентство перспективных оборонных исследовательских проектов (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) утвердило проект «Тепловой транспорт ближнего перехода» (Near Junction Thermal Transport, NJTT) в рамках программы DARPA «Технологии теплового управления» (Thermal Management Technologies, TMT) [30]. Согласно DARPA, в проекте NJTT можно реализовать разные способы уменьшения теплового барьера вблизи перехода. К ним относятся использование алмазных подложек с высокой теплопроводностью, которые заменят материалы с меньшей проводимостью, например SiC, Si и сапфир. Кроме того, эпитаксиальные и переходные слои с низкой проводимостью на границе раздела активных слоев GaN и подложки могут быть удалены травлением или другими методами. DARPA также указывает на внедрение жидкостного охлаждения в области перехода, а также на использование метрологии и моделирования не только для проверки измерений в этом масштабе, но и для количественной оценки тепловых и электрических характеристик устройств на основе GaN. Компания TriQuint Semiconductor (в наст. время Qorvo) получила контракт на 2,7 млн долл. от DARPA на утроение производительности устройств и схем на основе GaN, а компания RFMD (в наст. время Qorvo) – 2,1 млн долл. на повышение

теплового КПД GaN-схем. Партнерами TriQuint в этой программе были Бристольский университет (известный своими тепловыми испытаниями, моделированием и микрорамановской термографией) и Group4 Labs, специализирующаяся на алмазных подложках. Кроме того, Lockheed Martin оценит результаты программы с точки зрения прогнозируемого воздействия на будущие системы защиты. Партнерами RFMD по программе выступили Технологический институт Джорджии (известный своими тепловыми испытаниями, моделированием и микрорамановской термографией), Стэнфордский университет (лидер в области тепловых измерений интерфейсных слоев внутри кристалла транзистора), Group4 Labs и Boeing. Постановка задачи и состав участников четко обозначали важность этой программы для космических и оборонных программ США.

В январе 2019 г. в Великобритании прошел семинар **Diamond D-Day**, посвященный достижениям в области GaN-на-алмазе для РЧ- и СВЧ-применений [31]. На семинаре с участием 120 специалистов, из которых более половины было иностранцев из США, Японии, Китая, Австралии и др., отмечалось, что эта технология следующего поколения составит основу будущей мощной радиочастотной и микроволновой связи, космических и оборонных систем, проложив путь к сетям мобильной связи 5G и 6G и гораздо более совершенным комплексным радиолокационным системам. Бристольский университет работает с консорциумом четырех других университетов Великобритании (Кардифф, Глазго, Кембридж и Бирмингем), а также с отраслевыми партнерами в рамках пятилетней (2017–2021 гг.) программы GaN-DaME

(Integrated GaN-Diamond Microwave Electronics: From Materials, Transistors to MMICs). В начале 2017 г. он получил грант в размере 4,3 млн фунтов стерлингов от Совета по инженерным и физическим наукам Великобритании (EPSRC). По словам профессора Мартина Куболла (Martin Kuball), руководителя работ от Бристольского университета, задача программы GaN-DaME заключается в разработке преобразующих транзисторов GaN-на-алмазе с высокой подвижностью электронов (HEMT) и монокристаллических интегральных схем (MMIC) в качестве технологического шага за пределы существующих микроволновых устройств (например, GaN-на-SiC). Новые устройства позволяют сделать революционный скачок в тепловом управлении, которое в настоящее время ограничивает электронику на основе GaN. Потоки энергии в них могут достигать величины теплового потока на поверхности Солнца, и алмаз благодаря очень высокой теплопроводности является единственным материалом, который может с ними справиться. Ожидается, что эти устройства позволят реализовать будущие сети связи и радарные системы с возможностями, выходящими за рамки современных. Одной из задач в этом направлении является разработка новых технологий выращивания алмаза, включая создание новых затравочных слоев. В результате получают устройства, ВЧ-мощность которых больше в пять раз по сравнению с предлагаемыми на рынке современными SiC HEMT. В качестве альтернативы, что не менее важно, возможно резкое уменьшение размеров MMIC или усилителя мощности, что обеспечит повышение эффективности за счет удаления объединяющих сетей, а также снижения стоимости усилителя мощности.

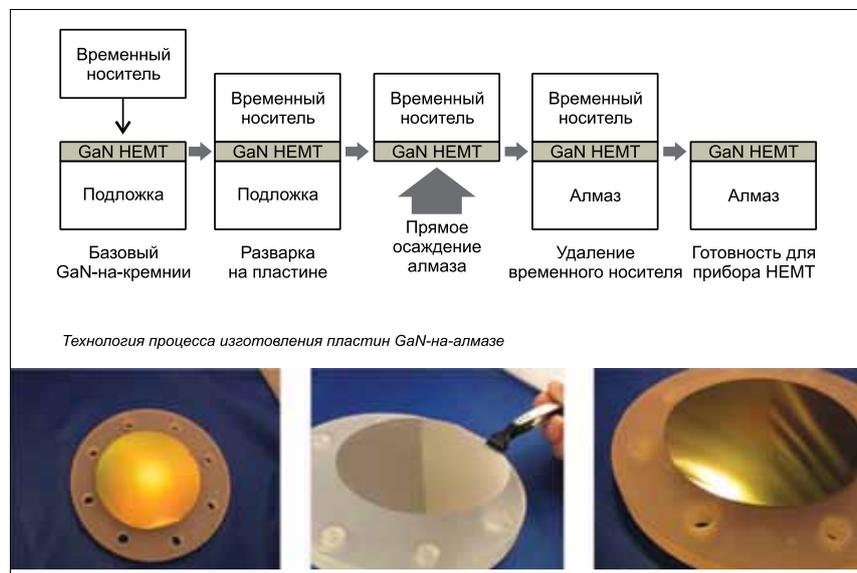


Рис. 5. Технология изготовления пластин GaN-на-алмазе компании Akash Systems

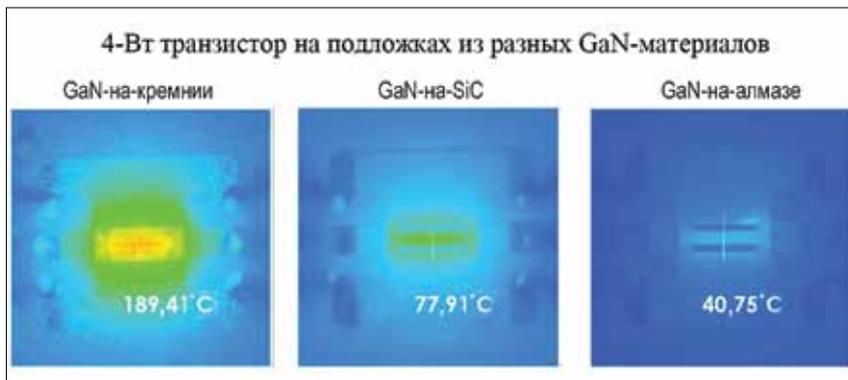


Рис. 6. Сравнение температуры поверхности GaN-транзистора на подложке Si, SiC и алмаза

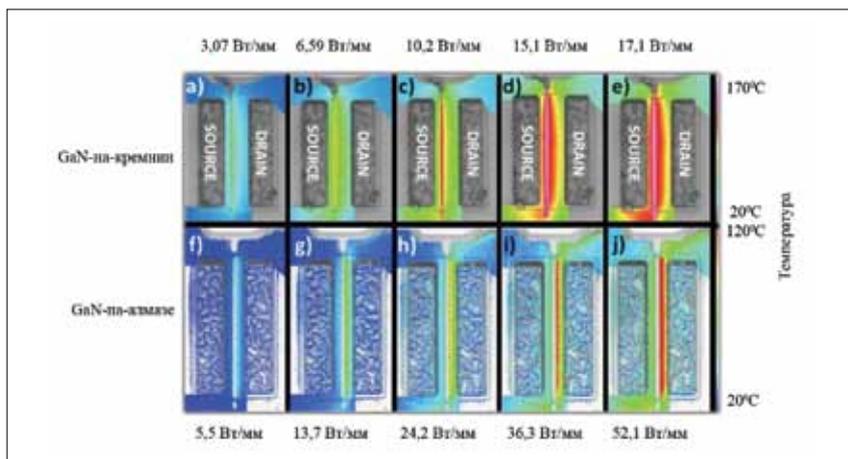


Рис. 7. В усилителях мощности GaN-на-алмазе температура снижается на 50°C

По словам Куболла, это революционное изменение в возможностях позволит реализовать новые системные архитектуры, например для поисковиков радиочастот и медицинских приложений, а также обеспечить полосу пропускания для связи 5G и выше. Снижение требований к охлаждению повысит надежность и приведет к значительной экономии затрат на системном уровне.

Одним из примеров коммерциализации этой программы является американская компания **Akash Systems**, которой удалось привлечь на фондовом рынке финансирование в объеме 14,5 млн долл. [32]. Компания планирует использовать этот капитал на развитие доходности производства радиомодулей и усилителей мощности по технологии GaN-на-алмазе для спутниковых систем. Эти устройства предназначены для связи с наземной станцией и спутниковой инфраструктурой. Технология GaN-на-алмазе Akash Systems использует оригинальную идею основателей компании по изготовлению пластин диаметром 100 мм с эпитаксиальными пленками GaN на подложках с искусственным алмазом (см. рис. 5) [33]. Суть идеи в том, чтобы перенести эпитаксиальную пленку GaN с несущей подложки (например, кремния) на подложку из искусственного алмаза. Последний обладает высокой теплопроводностью

1500 Вт/(м·К), что в четыре раза превышает теплопроводность Cu и SiC. Пластина GaN-Si со структурами HEMT прикрепляется к вакуумному носителю, после чего подложка кремния с обратной стороны шлифуется или травится до остаточной пленки GaN толщиной 700 нм, а на обратную сторону наносятся барьерный слой

SiN толщиной 30 нм и слой поликристаллического CVD-алмаза, выполняющий функции эффективного тепловода [34]. Транзисторы GaN HEMT можно сформировать и до, и после замены подложки. Сравнение температуры GaN-транзистора на подложках Si, SiC и алмаза, ранее выполненное компанией TriQuint Semiconductor (в наст. время Qorvo), показывает, что температура составляет 189,41, 77,91 и 40,75°C, соответственно (см. рис. 6).

Akash Systems владеет более чем 20 патентами на материалы, технологии и изделия GaN-на-алмазе. К предлагаемой компанией продукции относятся усилители мощности (УМ) с частотой 7,7–31,5 ГГц и мощностью 2–500 Вт, а также радио- и передающие устройства для космических спутников разных размеров и назначения. Самые современные коммерческие спутники передают данные на Землю со скоростью 100–200 Мбит/с; несколько передовых концепций более крупного одиночного спутника призваны увеличить скорость до 1–4 Гбит/с. Эти скорости передачи данных существенно ограничены работой и состоянием РЧ-усилителей мощности, используемых для изготовления передатчиков. При снижении температуры УМ его эффективную мощность можно повысить на 40–50%, а значит, и объем передаваемой информации. Усилители GaN-на-алмазе позволяют существенно снизить температуру кристалла в сравнении с GaN-на-Si (см. рис. 7). Akash Systems впервые создает концепцию небольшого спутника, у которого предварительная скорость передачи данных по нисходящему

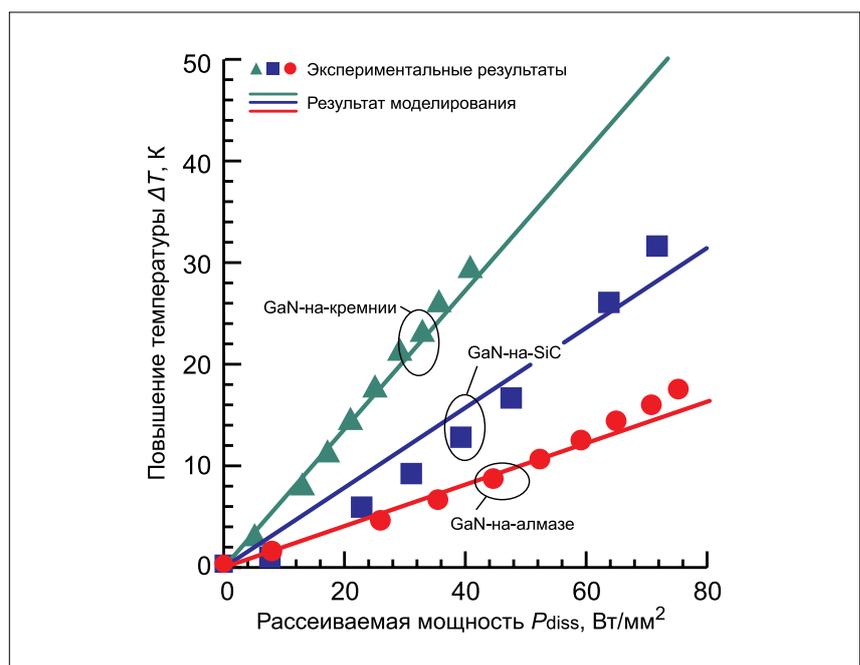


Рис. 8. Повышение температуры GaN HEMT при разной мощности на подложках Si, SiC, алмаза (Mitsubishi Electric)

каналу составит 14 Гбит/с. В следующей демонстрации будут представлены скорости передачи данных более 100 Гбит/с. Конечная техническая цель – обеспечить скорость нисходящего канала величиной 1 Тбит/с с одного спутника скромных размеров с использованием усилителя мощности GaN-на-алмазе.

В исследовательском центре компании Mitsubishi Electric экспериментально подтвердили, что тепловое сопротивление устройства GaN-на-алмазе было снижено на 45 и 70% по сравнению с устройствами GaN-на-SiC и GaN-на-Si, соответственно, что особенно проявляется при большой рассеиваемой мощности (см. рис. 8) [35]. Проведя стационарный тепловой анализ с учетом зависимости толщины подложки, японцы показали, что в случае использования утолщенной подложки только алмаз может эффективно повысить скорость снижения теплового сопротивления.

В сентябре 2019 г. на конференции в Японии японская компания **Mitsubishi Electric** заявила, что в сотрудничестве с Национальным институтом перспективных технологий (AIST) она разработала первый в мире транзистор GaN HEMT на алмазе с многоячеистой структурой (несколько ячеек транзисторов, расположенных параллельно) [36]. Mitsubishi Electric занималась проектированием, производством, измерениями и анализом GaN-на-алмазе HEMT, а AIST разработала технологию прямого соединения с алмазной подложкой. В последние годы высокоэффективные GaN HEMT использовались в мощных усилителях на базовых станциях мобильной связи и в системах спутниковой связи, что помогло сделать такое оборудование меньше, легче и эффективнее. Однако из-за тепловыделения во время работы с высокой мощностью типовую выходную мощность GaN HEMT нельзя реализовать, и их надежность снижается. Большинство существующих GaN HEMT, которые используют алмазную подложку для отвода тепла, создаются с использованием эпитаксиальной фольги GaN, с которой удалена кремниевая подложка и на которую алмаз осаждается при высокой температуре. Затем на этой пластине завершается изготовление транзистора. Поскольку коэффициенты теплового расширения GaN и алмаза различаются, пластина может сильно деформироваться во время производственного процесса, что затрудняет изготовление больших многоячеистых HEMT из GaN. В последних исследованиях был изготовлен многоячеистый GaN HEMT, после чего была удалена кремниевая подложка. Затем задняя поверхность GaN HEMT была отполирована, чтобы сделать ее

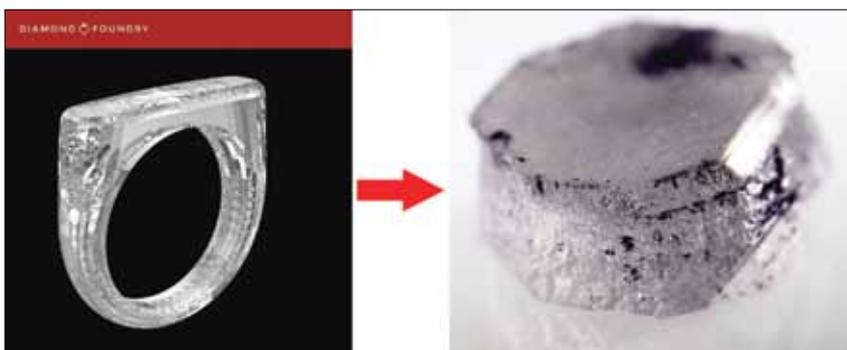


Рис. 9. Амбициозные цели компании Diamond Foundry: от создания первого в мире кольца из искусственного алмаза – к первым в мире алмазным слиткам для полупроводниковых пластин

более тонкой и плоской, и прикреплена непосредственно к алмазной подложке с использованием наноадгезионного слоя. Многоячеистая структура использовалась для параллельного выравнивания восьми транзисторных ячеек того типа, который используется в существующих изделиях. Таким образом, первый в мире многоячеистый HEMT-транзистор GaN-на-алмазе был изготовлен с использованием подложки из монокристаллического алмаза с высокой теплоотдачей. Применение монокристаллического алмаза с высокой теплопроводностью уменьшает температуру GaN HEMT с 211,1 до 35,7°C, благодаря чему повышается выходная мощность на ширину затвора с 2,8 до 3,1 Вт/мм, а также повышается энергоэффективность с 55,6 до 65,2%, что обеспечивает значительную экономию энергии. Новый HEMT-транзистор GaN-на-алмазе должен быть в состоянии повысить эффективность мощных усилителей в базовых станциях мобильной связи и системах спутниковой связи и уменьшить энергопотребление. Mitsubishi Electric стремится усовершенствовать HEMT GaN-на-алмазе перед его коммерческим запуском, намеченным на 2025 г.

Однако в технологии выращивания искусственного алмаза существует и другой подход, который разрабатывает американская компания **Diamond Foundry** [37]. Она создает первые в мире монокристаллические алмазные пластины для полупроводниковых приложений. Это развитие стало возможным недавно благодаря совместному применению достижений в новой технологии плазменных реакторов и передовых научных достижений. Проблема в том, что для выращивания алмаза обычно требуется зародыш в виде другого алмаза. Таким образом, разработку алмаза размером с пластину нельзя реализовать, поскольку в мире нет ни одного натурального алмаза такого размера. Когда Diamond Foundry в 2013 г. представила для продажи на аукционе Sotheby's полностью бриллиантовое кольцо

и продала его за 256250 долл., это событие привлекло внимание всего мира (см. рис. 9). Тем не менее мало кто осознал, что скрывается за появлением этого кольца: первая алмазная пластина диаметром один дюйм, созданная без использования алмаза, – та же фундаментальная технология, которая теперь позволяет использовать монокристаллические алмазные пластины для полупроводниковых приложений. Diamond Foundry запатентовала технологию плазменных реакторов для осуществления очень амбициозной цели – создания 200-мм монокристаллических алмазных пластин. Эта инновация, считают в компании, станет основой полупроводниковых технологий будущего. Никакой другой способ добычи алмазов, будь то горнодобывающая промышленность, приборы высокого давления или современные плазменные реакторы, не в состоянии получить пластины тех типов, которые требуются современному интегрированному производству. Diamond Foundry теперь может производить алмазы на площадях размером с пластину, которые требуются производителям интегрированных устройств. Кроме того, была показана возможность создать алмазы размерами больше существующих в мире. Время покажет, насколько эта технология станет коммерчески эффективной для электроники.

ОКСИД ГАЛЛИЯ (Ga₂O₃)

К настоящему времени обнаружены пять кристаллических фаз Ga₂O₃, т. е. фазы α , β , γ , δ и ϵ [38]. Моноклинная фаза β -Ga₂O₃ имеет лучшую тепловую стабильность, в то время как другие четыре фазы являются метастабильными и склонны превращаться в β -Ga₂O₃ при высоких температурах. Следовательно, в настоящее время большинство исследований сосредоточено на изучении β -Ga₂O₃. Некоторые недавние исследования также показали, что другие фазы обладают некоторыми особыми свойствами материала, которых не имеет

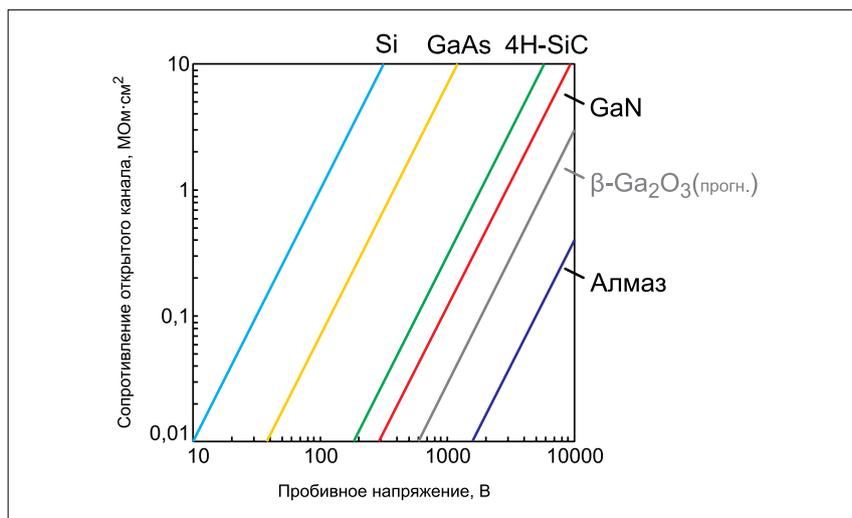


Рис. 10. Теоретические значения сопротивления открытого канала в зависимости от пробивного напряжения для разных полупроводников

β -фаза. Например, α -Ga₂O₃ имеет кристаллическую структуру корунда, аналогичную структуре сапфира (Al₂O₃), поэтому сравнительно легко вырастить высококачественную монокристаллическую эпитаксиальную пленку α -Ga₂O₃ на имеющейся монокристаллической подложке Al₂O₃. Гексагональная фаза ϵ -Ga₂O₃ является второй стабильной фазой благодаря сильному эффекту спонтанной поляризации, который способствует образованию двумерного электронного газа с высокой плотностью на границе гетероперехода, аналогично условиям в переходе AlGaIn–GaN. В последние годы благодаря успешному выращиванию монокристаллической подложки β -Ga₂O₃ большого размера и ее лучшей стабильности исследований β -Ga₂O₃ намного больше, чем исследований других четырех фаз. Соединение β -Ga₂O₃ относится к моноклинной системе и термически устойчиво. Его постоянные решетки равны 1,22 нм, $b = 0,30$ нм и $c = 0,58$ нм. За счет кристаллической структуры β -Ga₂O₃ имеет определенную проводимость, ограниченную сверхширокой запрещенной зоной (4,7–4,9 эВ) – самой широкой из всех известных полупроводниковых материалов. Только если в запрещенной зоне существуют некоторые дефектные уровни энергии и генерируются свободные электроны, материал имеет сравнительно высокую проводимость. Для большинства полупроводников с широкой запрещенной зоной проводимость формируется именно из-за наличия дефектных уровней в запрещенной зоне. Собственная электропроводность β -Ga₂O₃ обусловлена наличием свободных электронов из-за точечных дефектов в объеме кристалла. Большинство исследований продемонстрировало, что кислородные вакансии являются ключевыми дефектами

для электропроводности. Поскольку из-за наличия большого количества кислородных вакансий поликристаллическое соединение β -Ga₂O₃ легко поглощает какой-либо газ, что изменяет сопротивление, было много сообщений об использовании β -Ga₂O₃ для изготовления газовых сенсоров с целью обнаружения H₂, CH₄, CO и O₂. По сравнению с SiC и GaN, β -Ga₂O₃ обладает особыми электрическими характеристиками, среди которых наиболее заметной является сверхширокая запрещенная зона (4,7–4,9 эВ). Она обеспечивает очень высокое критическое электрическое поле пробоя ($E_{br} \approx 8$ МВ/см), которое примерно вдвое больше, чем у SiC и GaN.

На рисунке 10 показаны основные пределы сопротивления в открытом состоянии (R_{ON}) как функция напряжения пробоя (V_{br}) для нескольких полупроводников, включая Si, GaAs, SiC, GaN, Ga₂O₃ и алмаз [39]. Из этого рисунка видно, что потери проводимости устройств с Ga₂O₃ на порядок ниже потерь устройств SiC и GaN при том же V_{br} . Таким образом, большой потенциал применения Ga₂O₃ имеется в униполярных устройствах. Поскольку подвижность электронов насыщения β -Ga₂O₃ сравнительно невысока (~ 200 см² В⁻¹ с⁻¹), β -Ga₂O₃ не подходит для высокочастотных устройств, в отличие от GaN. Кроме того, ширина запрещенной зоны около 4,8 эВ обеспечивает Ga₂O₃ наличие специальной полосы волны поглощения (250–280 нм), которая находится как раз в диапазоне солнечно-слепых ультрафиолетовых (УФ) лучей. Таким образом, Ga₂O₃ является естественным хорошим материалом для изготовления УФ-детекторов.

В последние годы в основном реализовано легирование β -Ga₂O₃ n-типа. Легирование p-типа – большая проблема

для Ga₂O₃. Однако оксид галлия обладает некоторыми недостатками. Поскольку акцепторные уровни далеки от валентной зоны β -Ga₂O₃, энергия активации акцепторных примесей очень высока. Между тем, фоновые примеси n-типа в кристалле Ga₂O₃ также будут вызывать эффект самокомпенсации акцепторных примесей, что приводит к самоизоляции материала. Следовательно, до сих пор не было эффективных решений для создания p-типа. Второй недостаток – очень низкая теплопроводность Ga₂O₃. Экспериментальные и теоретические исследования доказали, что теплопроводность β -Ga₂O₃ составляет всего 0,1–0,3 Вт/(см·К). Это недостаток для силовой электроники, использующей высокие напряжения и токи. Малая подвижность отрицательно сказывается на частотных и токовых характеристиках.

Трудности, связанные с выращиванием высококачественных и недорогих монокристаллических подложек, долгое время сдерживали коммерциализацию устройств SiC и GaN. В то же время монокристаллические подложки Ga₂O₃ можно выращивать недорогим методом плавления, благодаря чему в последние годы большое внимание привлекают силовые устройства на основе монокристалла Ga₂O₃. В настоящее время технология легирования Ga₂O₃ n-типом достаточно развита, но отсутствие легирования p-типа делает материал Ga₂O₃ невозможным для применения в биполярных устройствах. Очень большая запрещенная зона дает большое преимущество при использовании в униполярных устройствах. Следовательно, в развитии силовых устройств на основе Ga₂O₃ преобладают униполярные устройства двух типов: диоды с барьером Шоттки и полевые MOSFET.

Теоретически, по сравнению с SiC и GaN, диод Шоттки с Ga₂O₃ может достигать того же напряжения пробоя при гораздо более тонком дрейфовом слое. В то же время более тонкий дрейфовый слой снижает паразитную емкость, сокращая время обратного восстановления устройства. С развитием технологии эпитаксии структура диодов Шоттки превратилась из исходной простой структуры на основе подложки в сложную на основе подложки и многослойной эпитаксиальной пленки. Диоды Шоттки на основе Ga₂O₃ начинают проявлять свой потенциал в приложениях силовой электроники. Однако на сегодняшний день процесс разработки полупроводниковых приборов с Ga₂O₃ очень похож на путь, который прошел карбид кремния.

В июне 2020 г. группа исследователей из Университета Баффало опубликовала результаты работы по исследованию

сверхтонкого транзистора из оксида галлия с напряжением пробоя 8 кВ [40]. Его структура представлена на рисунке 11, а отличительной особенностью также является использование пассивации SU-8 на основе эпоксидной смолы, без которой было бы невозможно нейтрализовать поверхностный пробой транзистора, неминуемый при таких высоких напряжениях. Практическая реализация этого высоковольтного транзистора незаменима при использовании в силовых тяговых установках электротранспорта, особенно в скоростном электротранспорте, начиная с поездов метро, скоростных вагонов и электросамолетов. Однако для этого предстоит пройти многолетний путь дополнительных исследований и практических совершенствований.

ШИРОКОЗОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ ДЛЯ КОСМОСА

Некоторые применения для космических проектов искусственного алмаза, одного из широкозонных полупроводников, рассмотрены в разделе «Искусственный алмаз».

Электроника на борту околоземных спутников, а также на исследовательских спутниках в самых отдаленных районах космоса постоянно подвергается воздействию гамма-лучей, нейтронов и тяжелых ионов. Поток космического излучения состоит, в основном, на 85% из протонов и на 15% – из тяжелых ядер. Воздействие излучения может привести к ухудшению характеристик и сбоям в работе устройства. Эта бомбардировка может повредить полупроводник и даже разрушить кристалл. В частности, могут образоваться ловушки в зоне проводимости или пары электрон–дырка, которые нарушают баланс работы устройства, создавая короткие замыкания. В GaN-компонентах энергичные космические частицы не могут вызвать мгновенное короткое замыкание, потому что в этих устройствах не могут появиться пары электрон–дырка [41].

По словам Алекса Лидова (Alex Lidow), основателя компании EPC – одного из мировых лидеров приборов на основе GaN, в космических полетах используемые напряжения на самом деле ниже, чем напряжения в большинстве линий переменного тока, поэтому лучше всего использовать компоненты на 200 В, а иногда и на 300 В. В этом диапазоне у GaN – гораздо более высокие характеристики, чем у карбида кремния. Кроме того, в дальнейшем нитрид галлия, являющийся латеральным устройством, намного проще интегрировать. Мы уже лета-

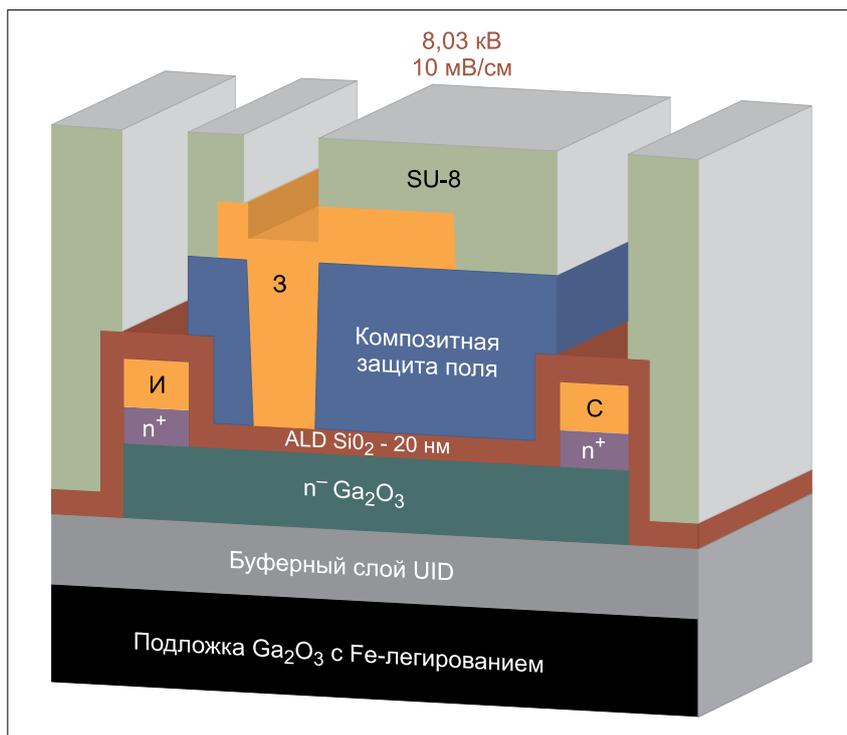


Рис. 11. MOSFET транзистор на основе Ga₂O₃, напряжением 8 кВ, созданный в Университете Буффало

ем на интегральных схемах в космос. Со временем они станут более совершенными – у них увеличится плотность по сравнению с современными ИС. Другое дело, что карбид кремния, как правило, используется в МОП-транзисторах. Поскольку затворный оксид SiC MOSFET-транзистора не является «естественным», у него еще больше проблем с общей дозой облучения, чем у кремниевого MOSFET [42].

Заряженные частицы и гамма-лучи создают ионизацию, которая может изменить параметры устройства. Эти изменения оцениваются с помощью общей накопленной ионизирующей дозы (TID). Поскольку спутниковые миссии длятся годами, значение TID может оказаться большим. Некоторые миссии в дальнем космосе требуют стойкости в 10 Мрад, которую кремний не в состоянии обеспечить. Эффекты воздействия одиночного импульса с повышенной энергией (SEE), возникающие в космической среде в результате излучений высокой энергии, непредсказуемы и могут возникнуть в любое время во время полета космического корабля. Механизм, составляющий основу каждого эффекта SEE, заключается в накоплении заряда в чувствительной области устройства после прохождения частиц. В результате создается такое сильное переходное электрическое поле через оксид затвора, что он разрушается, приводя к выгоранию всей области, когда энергичная частица пересекает область дрейфа транзистора с относи-

тельно высоким электрическим полем. Устойчивость к одиночному импульсу SEE не достигается только за счет правильно подобранного материала транзистора, а определяется конструкцией прибора.

Силовые транзисторы на основе GaN – идеальный выбор для преобразования энергии в космосе. GaN-приборы более надежны, чем радиационно-стойкие полевые МОП-транзисторы, при воздействии различных форм излучения. Электрические и тепловые характеристики GaN обеспечили отличное функционирование этих устройств в космической среде.

Источники питания обычно тяжелее большинства другого оборудования на борту космического корабля. Силовые транзисторы на основе GaN обеспечивают наилучший КПД, а также позволяют значительно сократить размеры устройств управления питанием, поскольку эти силовые устройства работают на очень высокой частоте, а примененные GaN-компоненты уменьшают в их архитектуре количество и размер силовых магнетиков (трансформаторов и катушек индуктивности с железными и металлическими сердечниками, которые добавляют вес). Более легкий вес также означает меньший расход топлива при запуске, т. е. снижает затраты. Для таких ракет-носителей как Delta или Atlas затраты на запуск должны быть сокращены примерно с 200–250 до 50 млн долл., или даже до низкой стоимости SpaceX. Как известно, стоимость

спутников варьируется в диапазоне от 500 млн до 1 млрд долл. Эти затраты тоже необходимо снизить, чему способствует эффективная электроника. GaN также имеет преимущества в отношении электромагнитных помех, поскольку уменьшение количества паразитных компонентов позволяет уменьшить объем энергии, запасаемой и выделяемой ими во время каждого коммутационного цикла.

В мировой электронике имеется несколько компаний, специализирующихся на разработке и производстве радиационно-стойких GaN-транзисторов и микросхем для применения в космосе. Среди них – американские компании EPC, EPC Space, являющаяся преемником Freebird Semiconductor, японская Renesas. Они обладают большим количеством электронных изделий и задают направление мирового развития электронных GaN-компонентов для космоса.

Карбид кремния, второй материал из группы широкозонных полупроводников, имеет над GaN преимущество в лучшей теплопроводности и термостабильности. Это качество и использует исследовательский центр Glenn NASA для разработки высокотемпературных датчиков, транзисторов и микросхем на основе SiC, работающих при температурах до 650°C, недостижимых для кремния и GaN, но крайне необходимых для функционирования в условиях космоса [43].

Очевидно, что широкозонные полупроводники благодаря лучшим параметрам, в первую очередь энергоэффективности и спецстойкости, в сравнении с классическим кремнием вытесняют его из сферы космического применения еще быстрее, чем в «земных» приложениях, поскольку надежность и энергоэффективность космического оборудования стоят на первом месте.

ВЫВОДЫ

1. Электронные компоненты на основе широкозонных полупроводников SiC и GaN демонстрируют прекрасные рыночные показатели и перспективы роста с прогнозами удвоения объемов в течение ближайших трех лет.
2. По прогнозу, электронные приборы на карбиде кремния, главным образом, найдут применение в автомобилестроении, включая тяговые приводы и быструю зарядку для электромобилей, а также в инверторах для фотоэлектрических преобразователей, тяговых приводах и вспомогательных источниках питания высокоскоростных поездов и электричек.

3. В первую очередь, нитридная силовая электроника предназначена для приложений с более низким напряжением и с большим рыночным объемом, например для оборудования ЦОД, бытовой электроники и зарядных устройств, бортовых зарядных устройств для электромобилей и фотоэлектрических инверторов.
4. СВЧ-транзисторы на основе GaN становятся предпочтительными транзисторами для оборудования 5G из-за требований повысить плотность мощности, энергоэффективность и уменьшить размеры системы для макро- и микробазовых станций для широкополосной передачи.
5. Европейская программа UltimateGaN планирует широкий прорыв в совершенствовании GaN-технологий для ВЧ-, силовой и интегральной КМОП-электроники, позволяющих в еще большей мере повысить энергоэффективность и улучшить экономические показатели.
6. Крупные международные компании, высоко оценивающие рыночные перспективы продукции на основе широкозонных полупроводников, увеличивают инвестиции в их развитие, технологии и приобретение профильных стартапов.
7. Правительства развитых стран мира значительно увеличивают субсидии и стимулы для приобретения гражданами электромобилей в личное пользование, а некоторые страны к 2030-м гг. планируют полный переход на электромобили. Этот рынок должен стать одним из главных драйверов роста электроники на основе SiC и GaN.
8. Разработка вертикальных GaN-транзисторов может стать наиболее значимым проектом в ближайшие годы для создания силовой и интегральной высоковольтной электроники нового класса.
9. Благодаря прекрасной теплопроводности искусственный алмаз позволяет резко снизить температуру чипов, в пять раз повысить плотность мощности, скорость передачи данных спутниковой связи и может стать незаменимым для длительной эксплуатации электроники в условиях космоса.
10. Исследования оксида галлия демонстрируют его перспективы для применения в высоковольтной электронике, обусловленные сверхширокой шириной запрещенной зоны. Однако Ga₂O₃ должен пройти тот же путь исследований и коммерциализации, который прошли SiC и GaN.
11. Прекрасная спецстойкость, теплопроводность и энергоэффективность

широкозонных полупроводников в сравнении с классическим кремнием позволят вытеснить его из сферы космического применения еще быстрее, чем в «земных» приложениях, поскольку надежность и энергоэффективность космического оборудования стоят на первом месте. —

ЛИТЕРАТУРА

1. *The 2020 Top Technology Trends in Power-Reliant Industries*. GaN Systems. January 15. 2020//www.gansystems.com.
2. *2021 Technology Predictions in Power Electronics*. GaN Systems. December. 2020//www.gansystems.com.
3. *ECPE WBG Roadmap Lead Applications for SiC & GaN (2020)*. ECPE//www.ecpe.org.
4. *PowerAmerica's "Strategic Roadmap for Next Generation Wide Band Gap Power Electronics"*. Power America//www.poweramericainstitute.org.
5. *International Technology Roadmap for Wide Bandgap Power Semiconductors. 2019 Edition*. IEEE. September 2019//www.ieee-pels.org/standards/about-itw.
6. *Power GaN 2019: Epitaxy, Devices; Applications and Technology 2019*. YOLE Development//www.yole.fr.
7. *Power SiC 2018 Materials Devices Applications 2018*. YOLE Development//www.yole.fr.
8. *UltimateGaN. Work Plan*//www.ultimategan.eu.
9. *SweGaN Technology*//www.swegan.se.
10. *Cree to Invest \$1 Billion to Expand Silicon Carbide Capacity*. Cree. Wolfspeed. May 7. 2019//www.cree.com.
11. *MediaTek invests in VisiC's Series E funding round*. Semiconductor Today. October 20, 2020//www.semiconductor-today.com.
12. *VisiC Technologies partners with TSMC to offer industry's most advanced 1200V GaN-based Power Device solutions*. February 04, 2018//www.visi-tech.com.
13. *MACOM and STMicroelectronics to Bring GaN on Silicon to Mainstream RF Markets and Applications*. STMicroelectronics. February 06. 2018//www.st.com.
14. *STMicroelectronics and Leti Develop GaN-on-Silicon Technology for Power Conversion Applications*. STMicroelectronics. September 24. 2018//www.st.com.
15. *ST Looks to TSMC for its Third GaN Technology*. February 21. 2020. News Power Management//www.eenewspower.com.
16. *NXP Opens New Advanced GaN Fab in Arizona*. EEPower. October 01. 2020//www.eepower.com.
17. *Transphorm Announces \$4 Million Multi-Year Development Agreement with Yaskawa Electric*. December 14. 2020//www.transphorm.com.
18. *Transphorm Partner Yaskawa Electric's New Servo Motor is First to Use Gallium Nitride*. September 20. 2017//www.transphorm.com.
19. *SK Holdings Makes Equity Investment in a Power Semiconductor Company*.

BusinessKorea. January 29. 2021//www.businesskorea.co.kr.

20. Nexperia announces plans to grow global production and increase R&D spend. Nexperia News. February 09. 2021//www.nexperia.com.

21. UKRI support for 200mm Gallium Nitride HEMT foundry process. New Electronics. February 04. 2021//www.newelectronics.co.uk.

22. Kyocera Completes Acquisition of SLD Laser. Business Wire. January 12. 2021//www.kyocera-sldlaser.com.

23. California to Phase out Sales of New Gas-Powered Cars by 2035. The Washington Post. September 24. 2020//www.washingtonpost.com.

24. Norway EV Sales Push 80 Percent as Volkswagen ID.3 Takes off. The Driven. November 10. 2020//www.thedriven.io.

25. Electric-Car Subsidies Make Renaults Free in Germany. Bloomberg. July 15. 2020//www.bloomberg.com.

26. Авторынок ФРГ: бум электромобилей на фоне обвала продаж машин с ДВС. Deutsche Welle. 8.07.2020//www.dw.com.

27. Японцы могут получить до \$7,6 тысяч за покупку электромобиля. Прайм. 25.11.2020//www.1prime.ru.

28. Electric Vehicle Outlook 2020. BloombergNEF//www.bnef.com.

29. Vertical GaN Devices – the Next Generation of Power Electronics. EETimes. May 16, 2020//www.eetimes.com.

30. DARPA GaN Contracts Go Head To Head. Microwaves&RF. October 29. 2012//www.mwrf.com.

31. Diamond D-Day Workshop Gives Progress Update on GaN-on-Diamond Microwave Technology. Semiconductor Today. February 7. 2019//www.semiconductor-today.com.

32. Akash Systems Raises \$14.5M Series A. Microwave Journal. July 15. 2019//www.microwavejournal.com.

33. Ultra-Cool GaN on Diamond Power Amplifiers for SATCOM. Microwave Journal. June 13. 2018//www.microwavejournal.com.

34. Akash Systems website. Technology//www.akashsystemsinc.com.

35. Thermal Analysis of GaN Device on Diamond Substrate with High Thermal Conductivity. Mitsubishi Electric R&D Center. December. 2019//www.mitsubishielectric.com.

36. Mitsubishi Electric Develops First Multi-Cell GaN-HEMT Bonded Directly to Single-Crystal Diamond Substrate. Semiconductor Today.

September 2. 2019//www.semiconductor-today.com.

37. Diamond Foundry Future Tech. Diamond Foundry//www.diamondfoundry.com.

38. An Overview of the Ultrawide Bandgap Ga2O3 Semiconductor-Based Schottky Barrier Diode for Power Electronics Application. Nanoscale Research Letters. 13. 290 (2018)//www.nanoscalereslett.springeropen.com.

39. Higashiwaki M., Sasaki K., Kuramata A., Masui T., Yamakoshi S. Gallium oxide (Ga₂O₃) metal-semiconductor field-effect transistors on single-crystal β-Ga₂O₃ (010) substrates. Appl. Phys. Lett. (2012). 100 (1):013504.

40. Field-Plated Lateral Ga₂O₃ MOSFETs with Polymer Passivation and 8.03 kV Breakdown Voltage. IEEE Electron Device Letters. Vol. 41. Issue 6. June. 2020.

41. GaN Transistor for Space Missions. EETimes. August 07. 2020//www.eetimes.com.

42. GaN in Space Applications. Power Electronics Europe. Issue 6. 2020//www.powermag.com.

43. Silicon Carbide Electronics and Sensors. Glenn Research Center NASA//www1.grc.nasa.gov.