

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА – 2022 г.

ЧАСТЬ 2. ШИРОКОЗОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ – МИРОВЫЕ ФАВОРИТЫ В НОВЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ И НАУЧНЫХ РАЗРАБОТКАХ

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



Мировой рынок материалов и приборов на основе широкозонных полупроводников (ШЗП) ежегодно растет двухзначными темпами, что приводит не только к увеличению объемов инвестиций, созданию новых технологий и производству по всему миру, но и к расширению прикладных научных исследований, направленных на создание новых технологий. Себестоимость производства снижается, а научные результаты расширяют технологические горизонты, позволяя все в большей мере вытеснять кремний из привычных сфер его применения в полупроводниковой микроэлектронике. Полупроводники с широкой запрещенной зоной – безусловные фавориты среди новых материалов и изделий силовой электроники в мировой отрасли в ближайшие годы.

ВВЕДЕНИЕ

Мировой рынок широкозонных SiC- и GaN-приборов, а также материалов уже три года демонстрирует хорошую динамику роста, остановить или развернуть которую не может даже начавшийся мировой экономический кризис. Бурный рост производства электрического и гибридного транспорта и вытеснение им автомобилей с двигателями внутреннего сгорания дали мощный импульс развитию производства приборов и SiC- и GaN-материалов. Некоторые мировые компании на этой волне даже изменили стратегию своего долгосрочного развития, продавая кремниевые фабрики производства БИС по технологиям 90–350 нм и планируя переход на аутсорсинг и фаундри-модель в этом сегменте, но при этом расширяют собственное производство приборов и материалов по широкозонным полупроводникам. Автор настоящей статьи давно и еще до текущего бума увидел большие перспективы ШЗП для всех потребительских сегментов рынка и ежегодно последовательно отражает в своих публикациях состояние и развитие мировой электронной отрасли по ним [1–6]. К сожалению, несмотря на хороший задел, созданный еще советской научной школой по широкозонным и компаундным полупроводниковым материалам и даже наличие отечественного нобелевского лауреата Жореса Алферова в этой области, наши специалисты из этих школ давно и с успехом работают за рубежом, а не в России, прокладывая новые научные и прикладные направления для электронных товаров. Увидеть российские фамилии среди авторов научных статей и руко-

водителей зарубежных компаний стало обычным явлением. Одного такого человека мы упомянем в этой статье. На прозаический вопрос о том, почему они не развивают отечественную науку и электронику, ответственные лица, в обязанности которых входит создание условий для работы в нашей стране, предпочитают молчать или делать вид, что виноваты не они, а международная миграция специалистов. Вот уж действительно – «нет пророка в своем Отечестве»!

Автор не ограничивался только публикациями по ШЗП: в течение только последних трех лет он и его компания как ведущее российское предприятие по всему комплексу рыночных и технических вопросов по ШЗП кроме создания нитрид-галлиевых транзисторов выполнили большую работу, провели успешные и сложные переговоры с зарубежными компаниями по трансферу из-за рубежа технологической линии и технологии производства электронных компонентов на основе широкозонных полупроводников, имеющих высокий экспортный потенциал, но пока малый спрос в нашей стране (и громадный в мире). Недальновидность чиновников, в т. ч. имеющих технические ученые степени и звания, санкции, а также известные события февраля текущего года обнулили эту работу. Наши предприятия имеют все возможности развивать разработку и производство этой продукции, не требующей таких капитальных затрат как суперсовременные нанометровые электронные изделия, но укоренившийся за 20 последних лет порочный подход властей и чиновников обменивать нефть и газ на все что

угодно, показал, что наши достижения и результаты далеки даже в сравнении с ближневосточными нефтяными странами. Теперь нам остается наблюдать, как мировой полупроводниковый рынок высокими темпами мчится к новым рубежам, а мы отстаем все больше из-за отсутствия технологий, оборудования, материалов и некомпетентности чиновников. Как бы то ни было, автор и в последующих публикациях продолжит освещать эту тему не только с точки зрения мировых научных, технологических и производственных достижений, но и с проблемной стороны для нашей электроники.

МИРОВОЙ РЫНОК ШЗП РАСТЕТ ДВУЗНАЧНЫМИ ТЕМПАМИ

Всего 10 лет назад широкозонные полупроводники как отдельный класс электроники были интересны не очень большой группе специалистов, главным образом, исследовательского, а не производственного профиля. Спрос на карбидокремниевые диоды Шоттки рос слабо из-за высокой стоимости этих изделий. Для его заметного повышения требовался новый сегмент большого рынка, внедрение новых методов и технологий производства не только материалов, но и электронных компонентов на их основе. Таким сильным толчком для рынка стало развитие электромобилей, а для нитрида галлия еще и потребительский сегмент с устройствами быстрой зарядки для электроники всех видов.

Авторитетная европейская компания YOLE Group, отличающаяся взвешенными прогнозами, ожидает что к 2027 г. мировой рынок мощных SiC-

Таблица. Топ-6 мировых производителей SiC-приборов в 2020–2021 гг.

Позиция	Регион	Компания	2020 г., млн долл.	2021 г., млн долл.	Рост 2020/2021 гг., %
1	Европа	STMicroelectronics	290	450	55
2	Европа	Infineon Technologies	110	248	126
3	Северная Америка	Wolfspeed	108	165	53
4	Азия	ROHM	103	108	5
5	Северная Америка	Onsemi	55	78	43
6	Азия	Mitsubishi Electric	26	28	8

приборов достигнет 6,297 млрд долл. К тому времени он увеличится почти в шесть раз с 1,09 млрд долл. в 2021 г. при среднегодовом темпе роста 34% (см. рис. 1) [7]. Главным сегментом применения SiC-приборов останется автомобильный рынок, который увеличится с 685 млн долл. (доля 63%) до 4,986 млрд долл. (доля 79%). Основными устройствами для электромобилей останутся тяговые инверторы двигателя и зарядные системы. Переход электромобилей со стандарта питания 400 на 800 В стимулирует применение SiC-приборов с напряжением 1200 В. Помимо автомобильных, промышленные и энергетические приложения представляют собой рынки с более чем 20-% темпами роста за указанный период. Этому будет способствовать развертывание инфраструктуры зарядки высокой мощности с модулями SiC и растущая установка фотоэлектрических устройств. Для рынка железнодорожного и скоростного транспорта потребуются мощные высоковольтные SiC-модули на 3300 В. Главные игроки на мировом рынке SiC-устройств компании STMicroelectronics и Wolfspeed увеличили выручку от их продаж в 2021 г. более чем на 50%, а Infineon обеспечила рост на 126%, войдя в основной инвер-

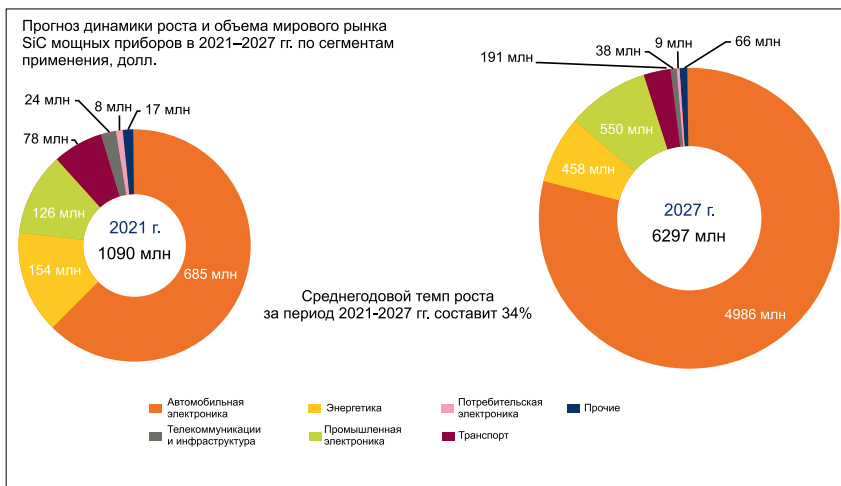


Рис. 1. Прогноз динамики роста и объема мирового рынка мощных SiC-приборов за период 2021–2027 гг. по сегментам применения

торный бизнес с базой промышленных приложений (см. таблицу) [8].

Близкий к этому прогноз дает компания по исследованию рынка TrendForce Prospects [9]. Согласно ее прогнозу, рынок силовых SiC-устройств для автомобильной промышленности превысит 2 млрд долл. в 2024 г. с текущего уровня 1,067 млрд долл. Кроме того, ожидается, что в 2025 г. он достигнет 3,166 млрд долл., а в 2026 г. – 3,942 млрд долл.

Резкий рост использования SiC-продукции в сегменте 600 В про-

изойдет в 2023 г., а в сегменте изделий на 1200 В и выше – с 2024 г. (см. рис. 2) [7]. В прогнозе развития SiC-продукции разных видов до 2035 г. преобладают SiC MOSFET до 6,5 кВ, SJ MOSFET с суперпереходом до 10 кВ, SiC-тиристоры и IGBT в диапазоне 10–60 кВ (см. рис. 3) [10].

Компания YOLE Group прогнозирует почти 16-кратный увеличение мирового рынка мощных приборов на основе GaN с 127 млн долл. в 2021 г. до 2 млрд долл. в 2027 г. со среднегодовым темпом роста 59% (см. рис. 4) [11]. Наиболее заметны-

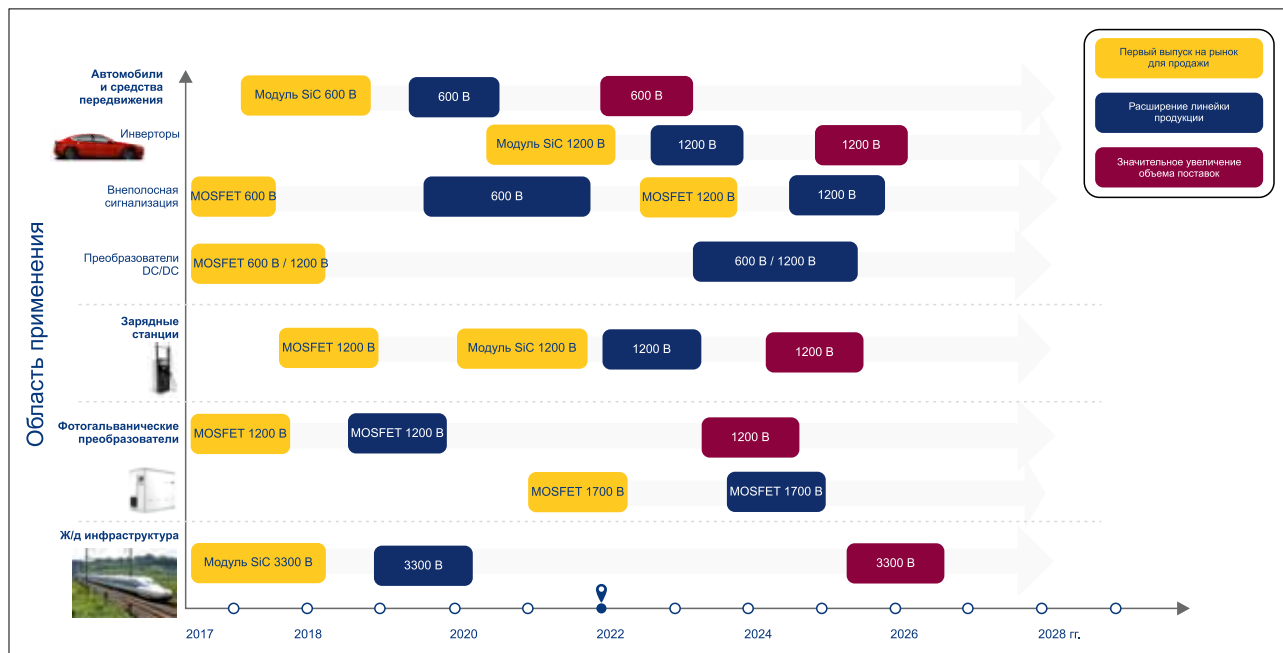


Рис. 2. Дорожная карта сфер применения мощных SiC-приборов в 2017–2027 гг.

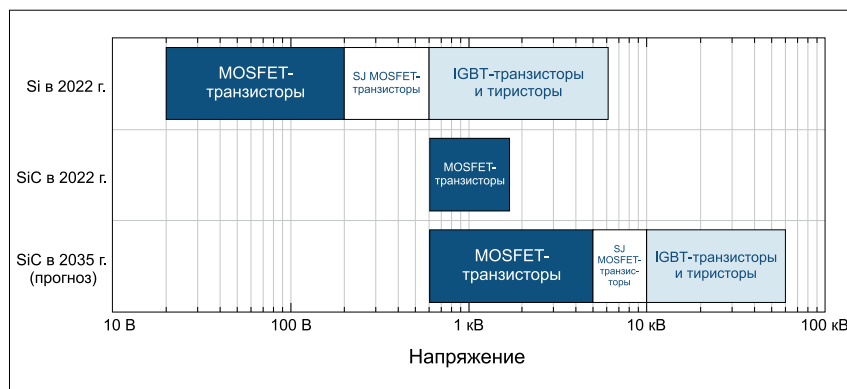


Рис. 3. Текущий рынок и прогноз будущего в 2035 г. для кремниевых и SiC MOSFET-, IGBT-транзисторов, тиристоров в диапазоне напряжения до 100 кВ

ми станут объемы потребительского и автомобильного сегментов рынка. В 2027 г. они достигнут, соответственно, уровней в 964,7 и 308,9 млн долл. Ожидается, что в среднесрочной перспективе на рынке GaN-приборов будут доминировать потребительские приложения – быстрые зарядные устройства для мобильных аппаратов и ноутбуков. В 2022 г. GaN-приборы стали проникать и в другие новые потребительские приложения – в светодиодные драйверы, аудиоустройства класса D, электронные инструменты и бытовую технику. Пока на каждое из этих приложений приходится небольшая доля рынка, но по мере падения цен она будет расти. Ожидается, что спрос на GaN-изделия будет непрерывно увеличиваться в системах обработки данных, оборудовании для промышленных предприятий с высокой мощностью и энергопотреблением; при этом основные страны будут при-

держиваться планов с нулевым уровнем выбросов углерода. На автомобильном рынке растет интерес к приложениям GaN-преобразователей для внутриавтомобильных зарядных систем и DC/DC-преобразователей.

Отдельным направлением рынка для GaN являются ВЧ- и СВЧ-устройства для мобильных станций 5–6G, радаров гражданского и военного сегментов, спутниковых систем и т.д., где в 2026 г. объем рынка достигнет 2,4 млрд долл. [12].

Компания Global Market Insights Inc. строит прогнозы аж до 2032 г. По ее данным, совокупный рынок SiC- и GaN-приборов к 2032 г. достигнет 15 млрд долл. [13]. Компания считает, что на долю сегмента силовых SiC-модулей в 2022 г. пришлось более 35% рынка силовых GaN- и SiC-полупроводников. Согласно ее прогнозам, к 2032 г. объем рынка энергетических приложений GaN- и SiC-полупроводников в Латинской

Америке превысит 600 млн долл. из-за резкого возрастания числа установок фотоэлектрических модулей и солнечных энергосистем. В таких странах как Бразилия, Мексика и Чили сеть центров обработки данных будет также быстро расширяться.

В результате резкого роста доли электроники в электро- и гибридных автомобилях обозначилась четкая тенденция, когда ведущие автомобильные компании и производители электронных блоков сами начинают проектировать электронные компоненты. Японская компания Denso, известный мировой поставщик автоэлектроники, стала самостоятельно проектировать кремниевые и SiC-чипы, производство которых осуществляется на фаундри-фабрике UMC [14]. Автогиганты Volkswagen и Toyota также пытаются работать по этой схеме с TSMC, а Ford – с GlobalFoundries [15]. В первую очередь, к этому в значительной мере их подтолкнул глобальный дефицит электронных компонентов во время мировой пандемии 2020–2022 гг. Denso также заказывает у японского стартапа Flosfia, созданного сотрудниками Киотского университета, силовые автокомпоненты на основе еще одного представителя полупроводников с широкой запрещенной зоной – оксида галлия (Ga_2O_3). Автор настоящей статьи в своих предыдущих публикациях на эту тему писал об особенностях оксида галлия и о самой компании, с представителями которой автор встречался на выставке электроники в Токио [1]. Flosfia, инвесторами которой являются

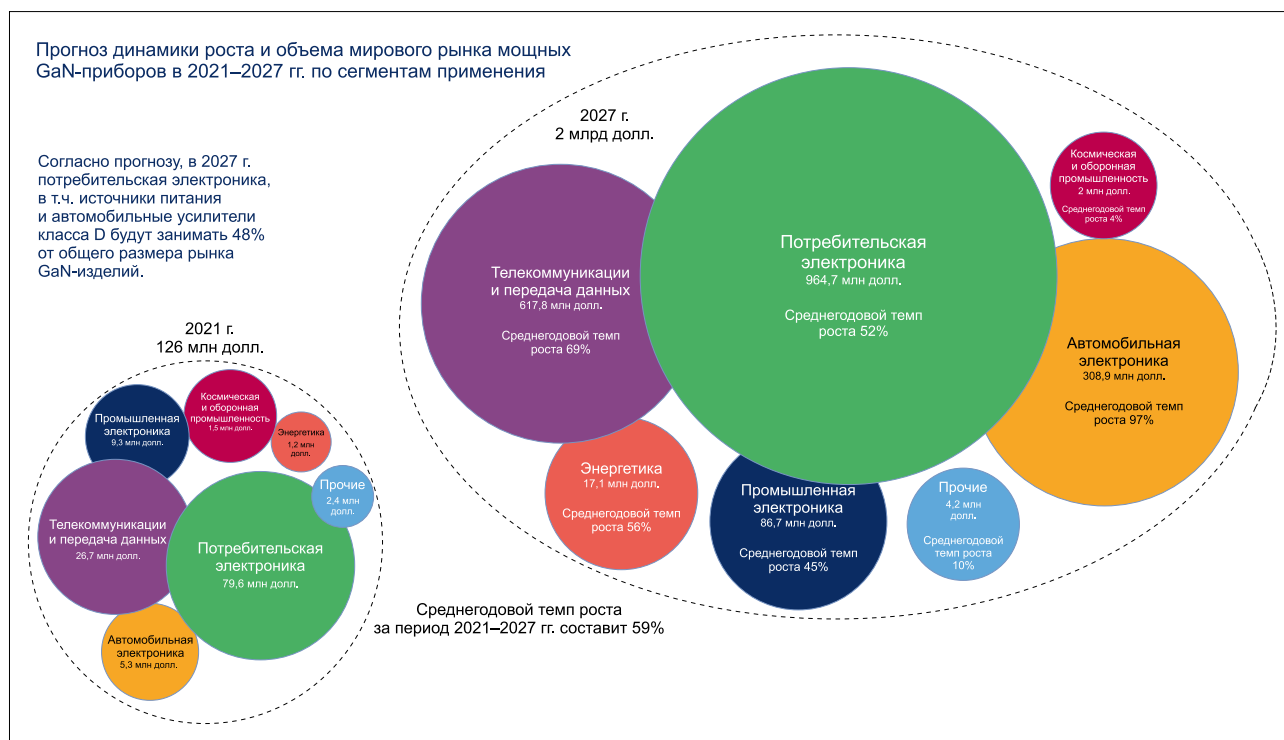


Рис. 4. Прогноз динамики роста и объема мирового рынка мощных GaN-приборов за период 2021–2027 гг. по сегментам применения

Mitsubishi Heavy Industries, Toyota Motor, Denso и Банк развития Японии, утверждает, что ее разработка может снизить потери мощности в электромобиле на 70% по сравнению с современными полупроводниковыми приборами, а энергопотребление – на 10%, что приведет к увеличению дальности поездки на одной зарядке [16]. Компания планирует передать производство японским компаниям электроники на аутсорсинг и амбициозно прогнозирует продажи объемом в 732 млн долл. к 2030 г.

Признавая высокую значимость и перспективы полупроводников с широкой запрещенной зоной, США расширили санкционные ограничения в отношении Китая на все, что связано с этим направлением технологий и продукции, тем самым приравняв их к суперсовременным нанометровым технологиям.

ИНВЕСТИЦИИ В ПОЛУПРОВОДНИКИ С ШИРОКОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНОЙ

В 2022 г. продолжились начавшиеся несколько лет назад инвестиционные вложения в производство электронных компонентов на основе ШЗП. Несмотря на спад продаж в мировой полупроводниковой отрасли сегмент ШЗП-изделий не показывает признаков замедления – и мировые компании, и инвесторы стремятся воспользоваться перспективами этого роста.

В сентябре компания Wolfspeed заявила об инвестициях в размере до 2 млрд долл. в крупнейший в мире завод по производству карбида кремния. Он появится на окраине города Роли (шт. Северная Каролина) рядом со штаб-квартирой компании Wolfspeed [17]. На новом заводе будут выращивать слитки и изготавливать 200-мм пластины для фабрики по производству чипов, которая открылась ранее в этом году в штате Нью-Йорк. Она является самой современной в мире и полностью автоматизированной фабрикой для карбида кремния. Огромное энергопотребление обоих объектов стало ключевым аргументом в принятии решения из-за близости Ниагарского водопада, что даст преимущества в энергообеспечении. Общие инвестиции в течение ближайших 10 лет составят 5 млрд долл. SiC MOSFET производства Wolfspeed используются в инверторах, которые имеют решающее значение для дальности пробега, производительности и времени зарядки электромобиля. Компания также прогнозирует рост бизнеса инверторов для солнечной энергетики. В 2021 г. выручка Wolfspeed выросла на 42% по сравнению с прошлым годом, но компания до сих пор не может удовлетворить имеющийся спрос. Wolfspeed,

скорее всего, получит около 1 млрд долл. в виде местных налоговых льгот в штате Нью-Йорк. Для проекта Wolfspeed стоимостью 5 млрд долл. местные стимулы, вероятно, в четыре раза превысят те, которые предусмотрены «Законом о чипах» в размере 200–300 млн долл. Для минимизации расходов, снижения себестоимости продукции Wolfspeed одной из первых в сегменте ШЗП стала применять вертикальную интеграцию и собственное производство по всему циклу создания продуктов.

Чтобы удовлетворить растущий спрос клиентов на SiC-устройства в автомобильной и промышленной сферах, в которых наблюдается переход на новые и более совершенные технологии электропитания, STMicroelectronics построит вертикально интегрируемый завод по производству подложек из карбида кремния в Италии [18]. Начиная с 2023 г. производство обеспечит сбалансированную поставку SiC-подложек между внутренними и внешними источниками. Этот завод станет первым в Европе предприятием по производству эпитаксиальных слоев и подложек из карбида кремния диаметром 150 мм, объединяющим все этапы производственного процесса. Он будет построен на заводе ST в Катании в Италии рядом с уже существующим предприятием по производству устройств SiC. ST намерена в ближайшем будущем разработать 200-мм пластины. Правительство Италии предоставит финансовую помощь для инвестиций в размере 730 млн евро в течение пяти лет в рамках Национального плана восстановления и обеспечения устойчивости. В результате полной реализации проекта появятся 700 дополнительных рабочих мест.

Американская компания Onsemi расширяет завод по производству пластин из карбида кремния в Чехии – она намеревается инвестировать в него 450 млн долл. в течение ближайших двух лет [19]. К настоящему времени Onsemi вложила более 150 млн долл. в расширение площадки в Рожнове и планирует потратить еще 300 млн долл. до 2023 г. Расширение завода позволит увеличить мощности по производству полированных карбидокремниевых и эпитаксиальных пластин в 16 раз в течение последующих двух лет и создать 200 рабочих мест к концу 2024 г. Ранее в 2022 г. Onsemi заявила об открытии завода по производству карбида кремния в Гудзоне (шт. Нью-Гемпшир) [20]. Завод увеличит в пять раз производственные мощности компании по SiC по сравнению с прошлым годом, начиная с поставок порошка карбида кремния, графитового сырья и заканчивая поставками полностью упакованных SiC-устройств, и почти

в четыре раза увеличит количество сотрудников в Гудзоне к концу 2022 г. В рамках новой стратегии Fab-Liter компания Onsemi старается отказаться от старой IDM-модели, сократить постоянные расходы за счет продажи фабрик 200-мм пластин, где производятся незапатентованные изделия, и перейти на фаундри-модель [21]. В 2021 г. Onsemi продала свою фабрику в Ауденарде (Бельгия), а в 2022 г. объявила о продаже завода 200-мм пластин в Японии и идентичного в шт. Айдахо (США). Однако производство SiC-продукции она считает своим стратегическим направлением, инвестирует в расширение текущих и создание новых мощностей. Автор несколько лет назад посетил фабрику Onsemi в Бельгии, с которой его компания имела коммерческие и технические контакты.

Компания GlobalFoundries (GF) получила федеральное финансирование в размере 30 млн долл. для разработки и производства GaN-на-кремнии на заводе GF в Эссексе (шт. Вермонт). Это финансирование было получено через подразделение Defense Microelectronics и Управление программы доверенного доступа (ТАРО) Министерства обороны США в дополнение к 10 млн долл. и направлено на создание изделий двойного применения GaN-на-кремнии на 200-мм пластинах. GF заявляет, что GaN-материал благодаря уникальной способности выдерживать значительные уровни тепла и мощности способен обеспечить такие рабочие характеристики, которые считаются революционными во многих приложениях. К ним относятся 5G- и 6G-смартфоны, беспроводная радиочастотная инфраструктура, электромобили, энергооборудование, сети, солнечная энергетика и другие технологии.

Компания Navitas Semiconductor, один из мировых лидеров по разработке, продажам и техническим инновациям в сфере GaN-продукции, приобрела разработчика и производителя силовых полупроводниковых устройств на основе карбида кремния GeneSiC Semiconductor из Даллеса (шт. Вирджиния) примерно за 100 млн долл. наличными, 24,9 млн акций Navitas и возможные выплаты в размере до 25 млн долл. при условии достижения существенных целевых показателей доходов для бизнеса GeneSiC в течение четырех финансовых кварталов до конца сентября 2023 г. [22]. Очевидно, что успешная и динамично растущая Navitas хочет расширить свои компетенции и возможности по ШЗП-изделиям.

Еще большему росту выпуска электромобилей и широкозонных полупроводников будет способствовать

изобретение технологии сверхбыстрой зарядки аккумуляторных батарей. Швейцарский технологический стартап Morand разработал сверхбыстрый перезаряжаемый аккумулятор, который может произвести революцию в мобильности [23]. Аккумулятор сочетает в себе характеристики суперконденсатора с возможностями химической батареи для создания прочного и сверхбыстрого источника энергии, который можно перезарядить за считанные секунды. Во время испытаний прототип eTechnology мощностью 7,2 кВт·ч смог зарядиться до 80% всего за 72 с, до 98% – за 120 с и до 100% – за 2,5 мин при токе до 900 А. Срок службы стандартных химических батарей достигает 3000–5000 циклов зарядки/разрядки, тогда как новые аккумуляторы легко обеспечивают свыше 50 тыс. циклов без очевидного ухудшения своих возможностей. Стартап Morand заявляет, что самый продолжительный срок службы при испытаниях достигает 70 000 циклов.

ЭКОНОМИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ С ШИРОКОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНОЙ

Долгое время высокие производственные затраты и цены электронных компонентов на основе карбида кремния были основными сдерживающими факторами в быстром росте их рынка. В ближайшие годы задача по снижению производственных затрат наряду с внедрением новых технологий станет одной из главных в достижении конкуренто-

способности участников этого рынка. Однако именно по такому сценарию всегда и происходило быстрое развитие новых полупроводниковых изделий и мировой электроники.

Компания PGC Consultancy, используя собственные модели и прогнозы, проанализировала стоимость изделий, SiC-материалов и перспективы их снижения на ближайшее десятилетие [24]. Расчет был выполнен на примере одного из самых популярных на рынке SiC MOSFET, рассчитанного на ток 100 А (при напряжении 650 и 1200 В), которые в 2021 г. продавались в розницу почти в три раза дороже, чем эквивалентные кремниевые IGBT. И это несмотря на то, что площадь SiC-чипа в три–четыре раза меньше площади кремниевого IGBT. Основной вклад в затраты вносит карбидокремниевая подложка. Это связано с тем, что кремниевые пластины производятся с использованием процесса Чохральского, в котором слитки метровой длины извлекаются из расплавленного кремния при 1500°C. Процесс сублимации для производства карбида кремния требует высоких энергетических затрат и температуры величиной 2200°C, тогда как длина готового слитка намного меньше, а время его роста очень велико. Следствием этого является увеличение стоимости пластины SiC в 30–50 раз по сравнению с кремнием. Другие затраты, к которым относятся расходы на эпитаксию и пр., низки по сравнению со стоимостью SiC-подложки. Вторым важным факто-

ром является выход годных на стадиях эпитаксии и при изготовлении чипов, которые в случае карбида кремния значительно проигрывают кремниевым технологиям.

Компания рассчитала стоимость чипа SiC MOSFET на 100 А/1200 В на ближайшие 10 лет с учетом снижения стоимости подложки, плотности дефектов структур и размера чипа (см. рис. 5). Переход с диаметра 150 на 200 мм позволит выпускать примерно в 1,8 раза больше устройств за один производственный цикл и, таким образом, снизит производственные затраты. Однако PGC Consultancy не ожидает, что этот переход изначально приведет к существенному снижению доли расходов на изготовление подложки. Наиболее значительными окажутся совершенствование технологии, конструкции чипов, уменьшение их площади и снижение дефектности. Любое уменьшение сопротивления на единицу площади приводит к увеличению плотности тока. Это значит, что площадь кристалла можно уменьшить, сохранив заданный номинальный ток. Однако из-за проблемы отвода тепла от кристалла меньшей площади нельзя игнорировать изменение теплового сопротивления, и потому площадь чипа масштабируется пропорционально квадратному корню из его электрического и теплового сопротивления. Таким образом, снижение сопротивления на 50% приведет к уменьшению активной площади чипа на 29%. Уменьшение размера кристалла не только увеличивает

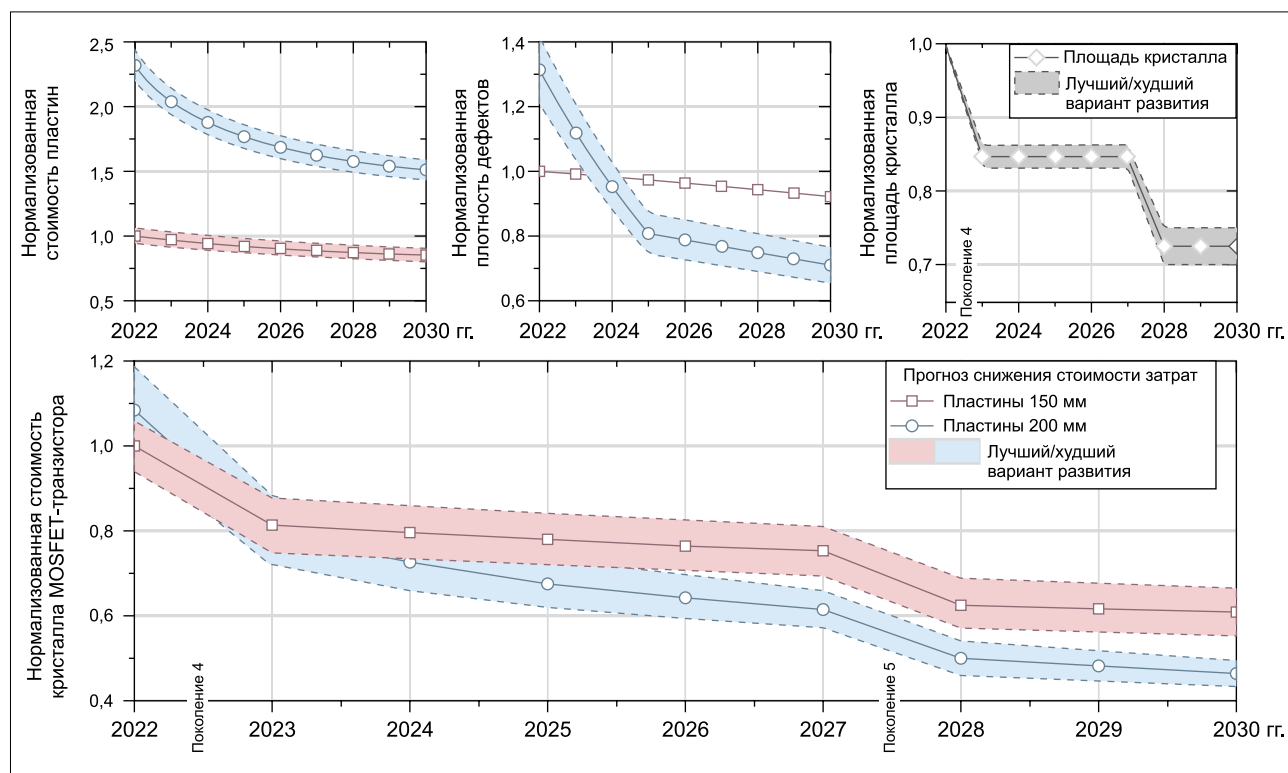


Рис. 5. Прогноз снижения затрат для кристалла SiC MOSFET 100 А/1200 В для диаметров пластин 150, 200 мм с учетом их снижения дефектности и размера чипа на 2022–2030 гг.

количество физических чипов на пластине, но и приводит к более высокому выходу годных. В 2022 и 2027 гг. ожидается появление двух новых поколений кристаллов (4 и 5), каждое из которых позволит уменьшить сопротивление примерно на 45% (до 40% в худшем случае и до 50% – в лучшем). Поскольку площадь сокращается в соответствии с квадратным корнем из сопротивления, его снижение на 40–50% приводит к уменьшению активной площади устройства на 23–29%. Согласно этим расчетам и прогнозам, стоимость кристалла SiC MOSFET на 100 A/1200 В, изготовленного на 200-мм подложке, в 2030 г. может снизиться на 54% по сравнению с сегодняшними затратами на 150-мм подложке. Таким образом, моделирование PGC Consultancy предполагает, что переход на 200-мм пластины едва ли приведет к немедленному снижению стоимости. Тем не менее постоянное улучшение качества подложек после перехода на 200 мм, повышение выхода годных в сочетании с дальнейшим постепенным улучшением конструкции устройств приведет к тому, что стоимость карбида кремния станет еще более конкурентоспособной. Важной также является вертикальная интеграция производителей электронных SiC-компонентов, включающая полный цикл производства, начиная с выращивания слитков, изготовления подложек, эпитаксии и выпуска чипов. Конкуренция между производителями также станет важным рыночным фактором.

Однако экономические показатели SiC-кристалла меняются при повышении требуемого напряжения. Чем оно выше, тем шире должна быть дрейфовая область, и, следовательно, тем больше толщина и выше затраты на эпитаксию. Из рисунка 6 видно, что для SiC MOSFET с напряжением 6,5 кВ и толщиной эпислея 60 мкм затраты на эпитаксию уже превышают затраты на подложку. На каждом шаге повышения напряжения требуется дрейфовая область, которая является более толстой и менее легированной, чем в предыдущем классе. При удвоении напряжения сопротивление увеличится примерно в 5,5 раз. Чтобы противодействовать этому и поддерживать заданный номинальный ток/сопротивление необходимо пропорционально увеличивать размер кристалла, что влечет за собой значительный рост дефектности эпитаксии, снижение физического количества и выхода годных. В итоге происходит стремительный рост стоимости кристалла, который при напряжении 15 кВ достигает 75-кратной стоимости кристалла на 650 В. На основании этого моделирования PGC Consultancy полагает, что SiC MOSFET

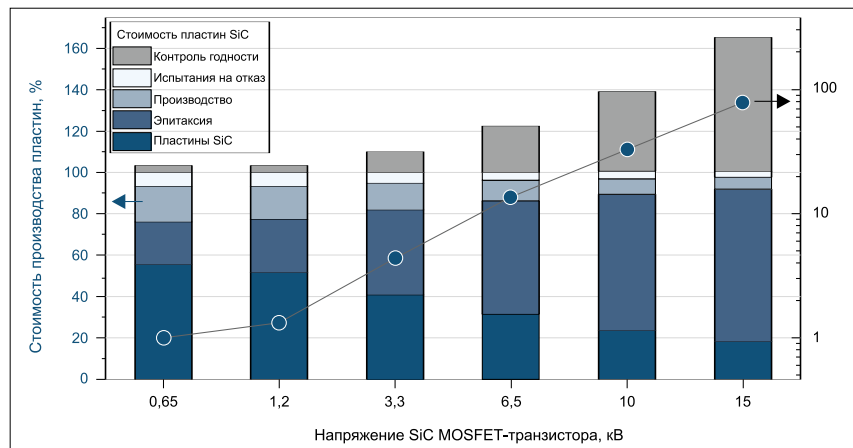


Рис. 6. Прогноз структуры стоимости SiC MOSFET для напряжений 650 В...15 кВ

	SiC	GaN-на-GaN
Диаметр пластины, дюймы	6	4
Количество кристаллов на пластине, шт.	522	2128
Стоимость пластины, долл.	812	1500
Выручка с пластины	35036	142831

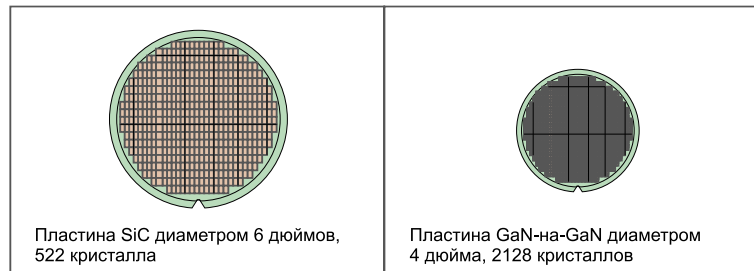
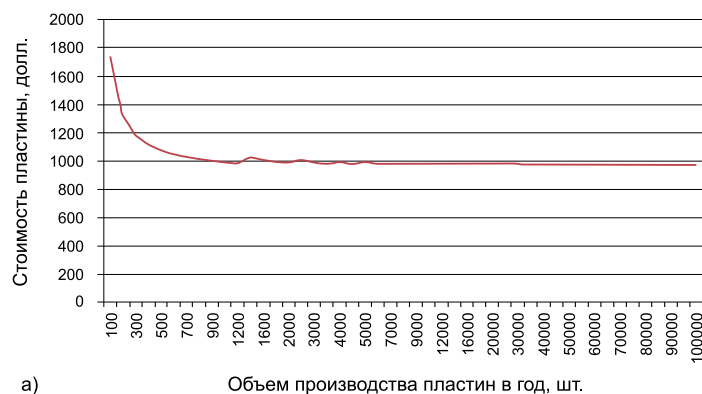


Рис. 7. Сравнение затрат производства и доходов для пластин с SiC и GaN-на-GaN вертикальными транзисторами



а) Объем производства пластин в год, шт.

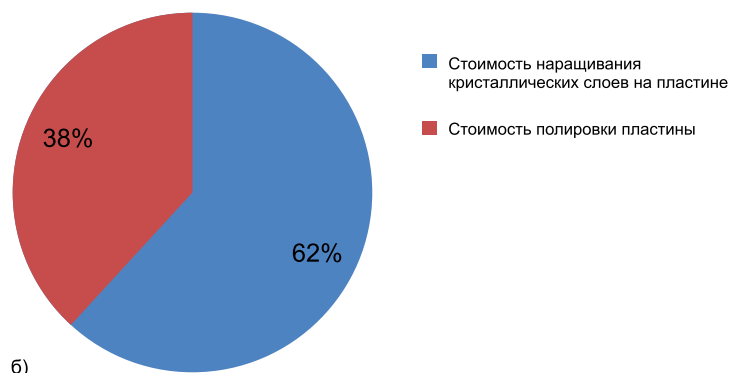


Рис. 8. а) стоимость 150-мм пластин GaN-на-QST в зависимости от ежегодных объемов производства; б) доли процессов HVPE GaN и полировки

выглядят жизнеспособным предложением до 6,5 кВ, возможно даже до 10 кВ, но сопутствующие затраты могут помешать реализации SiC MOSFET с более высокими напряжениями.

Американская компания Odyssey Semiconductor, разработчик вертикальных транзисторов GaN-на-GaN, оценила размеры производственных затрат и дохода для своих вертикальных GaN-на-GaN транзисторов на 1200 В на пластинах 100 мм в сравнении со 150-мм пластинами SiC MOSFET идентичного напряжения [25]. По сравнению с SiC, удельное сопротивление GaN во включенном состоянии благодаря более высоким критическим полям и подвижности в 10 раз лучше. Таким образом, у вертикального GaN-кристалла, изготовленного на 100-мм пластине GaN-на-GaN, количество чипов в четыре раза выше, чем у аналогичного чипа на 150-мм SiC-пластине, и такие же ценовые преимущества (см. рис. 7).

На рисунках 8а–б показана стоимость производства пластины GaN-на-QST диаметром 150 мм по технологии компании Qromis (описание технологии в следующем разделе) и доли HVPE-процессов наращивания GaN и полировки в суммарных затратах [26]. Очень конкурентная цена пластины 1000 долл. достигается уже при производстве около 1000 пластин в месяц. Имеется также хороший резерв и возможность снижения себестоимости за счет совершенствования процесса полировки (см. рис. 8б).

Очевидно, что рыночная конкуренция производителей станет мощным стимулом для снижения цен на широкозонные полупроводники в среднесрочной перспективе.

GAN QST-ТЕХНОЛОГИЯ – УГРОЗА ПРЕИМУЩЕСТВАМ SiC

Технология Qromis Substrate Technology (QST) является одной из наиболее важных для перехода к массовому промышленному производству силовых продуктов и ИС на основе нитрида галлия на пластинах большого диаметра 200–300 мм. Самым большим препятствием для этого являлось различие в коэффициентах температурного расширения (КТР) подложки из кремния или сапфира и выращиваемого на их поверхностях эпитаксиального GaN-слоя. Процесс наращивания сопровождается большим количеством структурных дефектов и ростом механических напряжений, приводящих к деформации и растрескиванию готовой структуры. Одним из решений, позволивших освоить промышленное производство пластин GaN-на-Si диаметром 200 мм, стала многослойная GaN-эпитаксия с исполь-

зованием буферных слоев между GaN и Si, имеющих промежуточное значение КТР. Однако дальнейший переход на диаметр 300 мм для снижения стоимости электронных GaN-компонентов был затруднен из-за низкого выхода годных вследствие указанных проблем. Технология QST позволяет решить эти проблемы за счет разработки новой композитной подложки вместо кремния. Ее КТР точно соответствует тепловому расширению эпитаксиальных слоев GaN-AlGaIn, что дает возможность нанести эпитаксиальный GaN-слой с низкой плотностью дислокаций и без трещин толщиной от нескольких микрон до объемного слоя. Такая разработка началась в начале 2000-х гг. в исследовательской лаборатории BMC США [27]. Благодаря усилиям Управления передачи технологий BMC США (NRL) эта разработка прошла ряд компаний, каждая из которых придерживалась разных взглядов на коммерциализацию. Конечным получателем переданной технологии является компания Qromis, базирующаяся в Силиконовой долине [28]. Партнерство по передаче технологий было начато в 2009 г., когда шесть патентов легли в основу инноваций лаборатории, а затем лицензии были переданы компании малого бизнеса под названием Amberwave Systems Corporation. Затем она была приобретена компанией Micron Technology, которая вложила средства в дальнейшую разработку концепции подложки по лицензии NRL. Любопытно, что один из соучредителей компании Qromis и ее текущий технический директор – наш соотечественник д-р Владимир Однолюб, выпускник Санкт-Петербургского технического университета и бывший сотрудник лаборатории Жореса Алферова, ранее занимал должность директора по светотехническим решениям в Micron Technology, а также другие должности в американских компаниях по этому направлению. Большое количество российских специалистов по композитным материалам продолжает трудиться в других зарубежных компаниях, включая Wolfspeed. К сожалению, в своей стране они не востребованы.

Деятельность компании Qromis по коммерциализации своей технологии QST началась еще в 2015 г. В январе 2020 г. Qromis сообщила о двух событиях, свидетельствующих о том, что она находится на пороге быстрого расширения [29]. Ее бизнес по производству материалов с широкой запрещенной зоной получил инвестиции от фонда The Mirai Creation, возглавляемого японскими инвесторами SPARX. В то же время компания подписала лицензионное соглашение с Shin-Etsu Chemical – японским

производителем кремниевых пластин и материалов – на производство подложек и эпитаксиальных пластин для силовой GaN- и ВЧ-электроники, светодиодных устройств и многого другого. Благодаря этому партнерству материалы на основе QST стали коммерчески доступны для заказчиков и от Shin-Etsu, и Qromis. Shin-Etsu активно занимается разработкой продукции, связанной с GaN, дополняя свою существующую линейку GaN-на-Si, КНИ и кремниевых пластин. В компании заявляли, что согласно прогнозам их партнеров и клиентов, спрос достигнет десятков тысяч пластин в ближайшие три–четыре года.

К 2020 г. Qromis уже выпустила 6- и 8-дюймовые QST-подложки, а также 6- и 8-дюймовые эпитаксиальные структуры с GaN-слоями толщиной 5 и 10 мкм. В течение года после основания компания заключила партнерское соглашение с израильской компанией Vanguard International Semiconductor (VIS), предоставив ей и тайваньской TSMC лицензию на свои ключевые технологии по производству кремниевых сплавов.

С 2016 г. Qromis также тесно сотрудничает с международным бельгийским микро- и наноэлектронным научно-исследовательским центром Imec в изготовлении устройств, разработке силовых GaN-устройств для дискретных приборов и микросхем на 200-мм QST-подложках в усовершенствованной кремниевой пилотной КМОП-линии. Imec и Qromis также сотрудничают с компанией Aixtron из Германии, являющейся производителем оборудования GaN MOCVD (метод химического осаждения из газовой фазы), в разработке эпитаксии GaN-на-QST в установке Aixtron G5+ C 200 мм MOVCD. Заметим, что центр Imec смог перенести свою технологию p-GaN E-Mode на 200-мм пластины Qromis GaN-на-QST в своей кремниевой экспериментальной линии, а также реализовать высокоэффективные устройства питания с этой технологией. Imec также изучает возможность создания вертикальных GaN-устройств на 200-мм пластинах GaN-на-QST, чтобы в еще большей мере расширить диапазон напряжений и токов технологий на основе GaN [30]. Решив лицензировать технологию устройств Imec, эпитаксию GaN и остальные процессы, компания VIS в настоящее время стала выпускать устройства в соответствии с этими спецификациями. Qromis ожидает, что производство 300-мм пластин, первоначальные запросы на которые она уже получает, начнется с 2025 г. В компании считают, что основными потребителями продукции Qromis станут силовые GaN- и ВЧ-устройства,

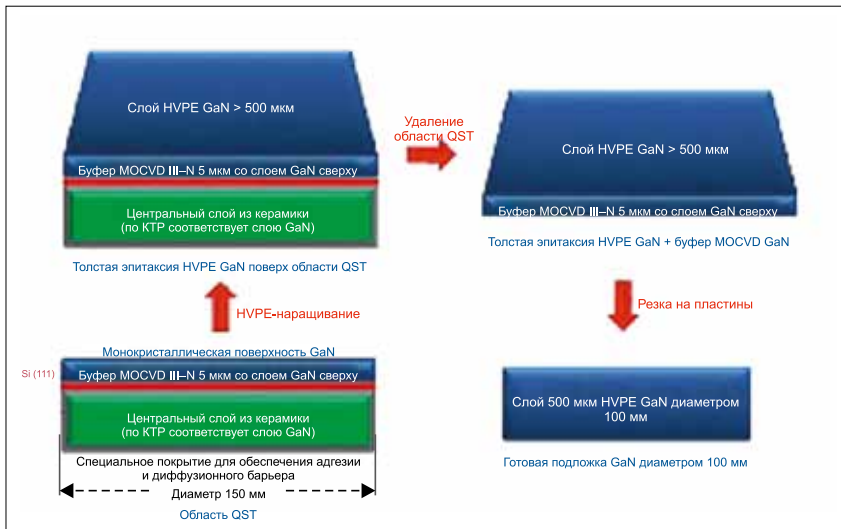


Рис. 9. Схема процесса наращивания GaN на подложке QST

а также более поздние светодиодные изделия, например микросветодиоды и датчики. Одним из ключевых рынков будут электромобили, а значительная часть финансирования со стороны фонда Mirai Creation, инвестирующего в Qromis, как раз поступает от Toyota Motor Corporation.

Известно несколько разновидностей технологии создания структур GaN-на-QST. На рисунке 9 представлена одна из них на примере подложек диаметром 150 мм. [26]. Процесс начинается с создания QST подложки с буферным слоем кремния, имеющей максимально близкий КТП к GaN, на который методом MOCVD наносится слой GaN толщиной 5 мкм, выступающий в роли затравки и зародышеобразования для выращивания методом HVPE толстого 500-мкм слоя GaN. Затем подложка и затравочный слой GaN удаляются и проводится финишная механическая обработка толстого слоя GaN с получением пластины диаметром 100 мм. Ранее компания Kuma Technology использовала метод HVPE для получения подложек размером 2, 3 и 4 дюйма, но затем расширила возможности технологии

и оборудование для поддержки роста на 150, а сейчас и 200 мм. Скорость роста можно контролировать от 10 до более чем 250 мкм/час без ущерба для чистоты или структурного качества.

При создании высоковольтных структур в типовой технологии транзисторов GaN-на-Si HEMT для увеличения рабочих напряжений как в латеральной, так и вертикальной конструкции

необходимо увеличивать толщину эпитаксиального слоя GaN, что приводит не только к возрастанию дефектов в эпителие, но и к росту механических напряжений, деформации и растрескиванию готовой структуры. Для решения проблемы и создания жесткой структуры GaN-на-Si приходится увеличивать толщину подложки кремния диаметром 200 мм с типовой для стандарта SEMI в 750 мкм до 1 мм. Компания Qromis разработала универсальную технологическую платформу для недорогих продуктов, таких как E-Mode HEMT с напряжением в диапазоне 100–1200 В, горизонтальных и вертикальных устройств питания от 100 В до 1800 В и выше, монолитных микросхем и устройств питания полувентриального и вертикального исполнения, интегральных выпрямителей на пластинах с подложками QST [31]. Данная платформа также предназначена и совместима с КМОП технологией для контрактных фаундри-производителей. Подложки QST состоят из внутреннего поликристаллического слоя из AlN, покрытого SiO₂, и слоем кремния, который выполняет функции зародышеобразования для эпитаксиального наращивания GaN (см. рис. 10). Указанные материалы термически очень

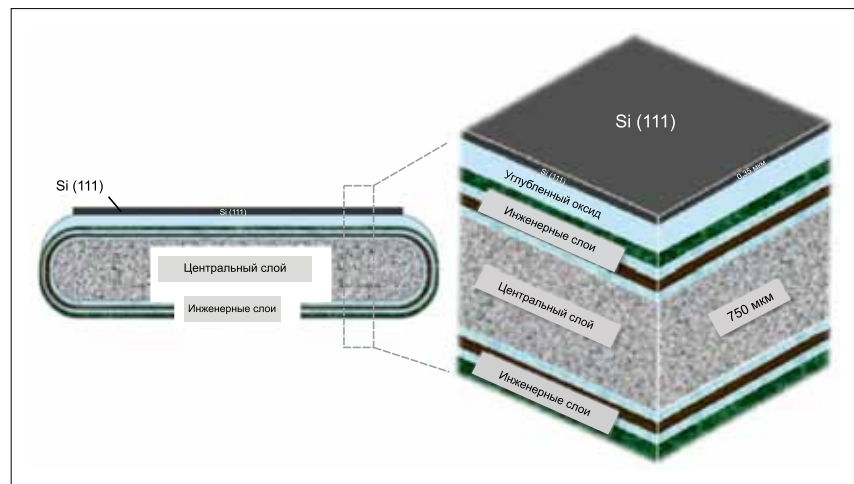


Рис. 10. Структура QST подложки

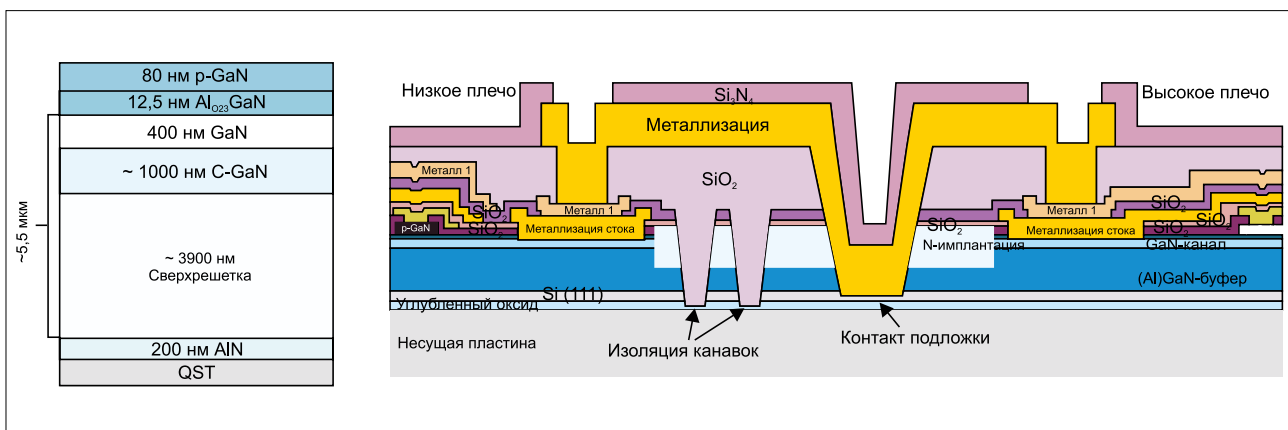


Рис. 11. Полумостовая 650-В ИС на основе подложки технологии GaN-на-QST

хорошо согласуются, что обеспечивает хорошее бездефектное совершенство эпитаксиальных слоев на основе GaN, а его толщина может достигать при этом более 100 мкм. Изготовленные на совместимой КМОП платформе компании VIS транзисторы GaN-на-QST HEMT 1200 В показали напряжения пробоя более 2400 В. Были получены полностью функциональные 200-мм силовые микросхемы со встроенными драйверами и GaN HEMT, полумостом и полумостом со встроенными драйверами. На рисунке 11 показано поперечное сечение монолитной структуры эпитаксии GaN-на-QST на 650 В и микросхемы полумоста с верхним и нижним плечом с транзисторами HEMT с trench-изоляцией и минимальной утечкой при 650 В.

В рамках программы сотрудничества между Imec и AIXTRON был выполнен эпитаксиальный рост MOCVD в коммерческом планетарном реакторе AIXTRON G5 + C GaN с толщиной более 8 мкм на 200-мм подложках QST с использованием дрейфового слоя толщиной 5 мкм для изготовления полувертикальных и вертикальных устройств. Вертикальные архитектуры устройств имеют несколько преимуществ по сравнению с латеральными устройствами при работе с высоким напряжением. Во-первых, электрические поля являются вертикальными и находятся внутри объема, а не на поверхности как в латеральных, и тем самым повышают надежность и стабильность устройств и делают их более устойчивыми к лавинному пробоя. И, наконец, площадь латеральных приборов становится непомерно большой при больших напряжениях из-за увеличенного расстояния между затвором и стоком, тогда как для вертикальных устройств напряжение пробоя определяет толщина слоя дрейфовой области.

Таким образом, созданная и освоенная в производстве новая технология GaN-на-QST дает целую серию преимуществ

в сравнении с существующими на рынке

- позволяет реализовать универсальную латеральную, полувертикальную, вертикальную архитектуру для мощных транзисторов HEMT и силовых ИС;
- создает технологическую платформу для приборов на 1200 В и выше, что безусловно составит конкуренцию доминирующим в этой области IGBT и SiC-транзисторам;
- снижает уровень дефектности в эпитаксиальных слоях на основе GaN за счет их максимальной совместимости с QST-подложкой и повышает выход годных;
- открывает возможности быстрого перехода к пластинам диаметром 300 мм, что сложно реализовать для технологии GaN-на-Si и нереально в ближайшем будущем для GaN-на-GaN;
- обладает совместимостью с базовой промышленной КМОП-технологией, что крайне важно для контрактного фаундри-производства и снижения себестоимости.

НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ СОЗДАНИЯ КМОП-ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

В настоящее время более 90% всех интегральных микросхем на мировом рынке используют КМОП-технологии для создания не только цифровых логических, но и аналоговых ИС. Комплементарная пара *p*- и *n*-канальных транзисторов является основой этой технологии и до недавнего времени ее интеграция в один чип являлась основным препятствием для нитрида галлия с целью перехода к созданию сложных микросхем на его основе. Создание такой надежной комплементарной технологической платформы обозначалось как важный шаг в переходе от простых микросхем управления питанием (драйверов) GaN HEMT-транзисторов к высокопроиз-

водительным сложным логическим GaN-микросхемам.

В последние годы нитрид галлия стал главным кандидатом на замену кремния в устройствах беспроводной связи и преобразования энергии. К преимуществам GaN-приборов относятся их компактные размеры, более высокая удельная мощность и эффективность, а также улучшенное управление температурным режимом. GaN-приборы получили широкое распространение в беспроводных базовых станциях 5G и сверхкомпактных быстрых зарядных устройствах для мобильных устройств. Вскоре GaN-приборы найдут массовое применение в системах для центров обработки данных, автономного вождения, электромобилей, дронов и роботов. Однако, чтобы полностью раскрыть потенциал GaN в приложениях по преобразованию энергии, требуется универсальная, но надежная технологическая платформа, которая объединяет переключатели питания и периферийные функциональные блоки.

Команде профессора Кевина Дж. Чена из Гонконгского университета науки и технологий (HKUST) удалось сделать очень важный шаг к реализации этой цели по разработке КМОП-совместимой GaN-технологии [32–33]. Работа их схемы была аналогична работе с кремниевыми КМОП-транзисторами *p*- и *n*-типа. Однако комплементарные логические схемы GaN были основаны на МОП *p*-FET, на полевом транзисторе с гетеропереходом *n*-типа (*n*-HFET) с электродом затвора *p*-GaN. Ключевым свойством этих приборов было то, что они работали в *E*-режиме с блокировкой тока при потенциале затвора 0 В, т. е. в «нормально выключенном» режиме. Исследователи использовали коммерческий GaN на кремниевых пластинах, выращенных методом MOCVD. Структура слоев на пластине *p*-Si представляла собой переход/буфер GaN толщиной 4 мкм, буфер из AlGaN толщиной 12 нм и *p*-GaN – 85 нм (см. рис. 12). Измерения

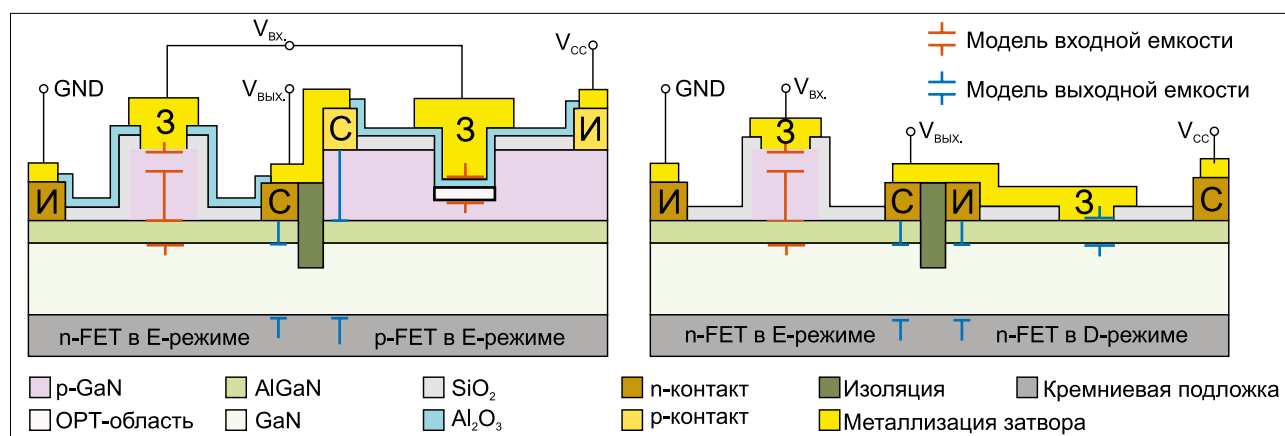


Рис. 12. Структура интегрального логического инвертора на основе GaN *n*- и *p*-FET

методом Холла показали концентрацию дырок $1,23 \times 10^{13}/\text{см}^2$ с подвижностью $10,2 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Значения подвижности находились в рабочем диапазоне материала, специально разработанного для создания *p*-FET ($\sim 15 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$), а не готового изделия, предназначенного для силовых приложений GaN *n*-FET.

Первым этапом изготовления было неполное удаление *p*-GaN с помощью плазменного травления с частичным сохранением его в областях затвора *p*-GaN *n*-FET и *p*-FET. Затем на поверхность нанесли пассивирующий слой SiO_2 толщиной 70 нм. Омические контакты исток/сток *n*-FET были сформированы путем открытия окон в пассивации и напыления Ti-Al-Ni-Au с последующим быстрым термическим отжигом (RTA) при 850°C в течение 30 с. Омические контакты *p*-FET состояли из Ni-Au, отожженных при 550°C в кислороде в течение 10 мин. Канал *p*-FET был образован реактивным ионным травлением канавки в установке с индуктивно-связанной плазмой (ICP); при этом остался 30-нм материал *p*-GaN для канала. Обеспечение работы *p*-FET в режиме усиления было реализовано в результате обработки поверхности *p*-канала кислородной плазмой в течение 1 мин. путем истощения дырок за счет смещения максимума валентной зоны от уровня Ферми с образованием кислородных комплексов с пассивированием и легированием магнием.

Изоляция затвора *p*-FET состояла из оксида алюминия Al_2O_3 толщиной 20 нм. Плазменная обработка привела к скрытому *p*-каналу, который отводит дырки от диэлектрической поверхности затвора, уменьшая рассеяние носителей и увеличивающее электрическое сопротивление. Изоляция создавалась путем имплантации ионов фтора, а не мезатравления, что позволило избежать утечки тока через боковые стенки. Электроды затвора и контактные площадки зондов состояли из Ni-Au. Металл затвора *p*-GaN *n*-FET образует контакт Шоттки. Чтобы сбалансировать производительность *n*- и *p*-FET для дополнительной логики, ширина *p*-FET была примерно в 10 раз больше, чем у *n*-FET, ширина *n*-FET была 10 мкм, а *p*-FET – 100 мкм.

В базовой схеме инвертора с дополнительной логикой выходное состояние 1 равнялось напряжению питания, а состояние 0 – земляному потенциалу. При напряжении питания 3–5 В резкий переход из состояния 1 в 0 происходит, когда входное напряжение достигает примерно половины напряжения питания. Однако при 2 В имеется промежуточное состояние, когда оба полевых транзистора выключены и напряжение на входе равно примерно 1 В. Прирост

напряжения в переходной области при питании 5 В достигал 80 В/В.

По мнению авторов проекта, у этого инвертора имеется однозначно наиболее важная особенность КМОП-схем, а именно низкое рассеивание мощности в статическом состоянии. Тем самым по энергоэффективности инвертор превосходит другие логические схемы, например резисторно-транзисторную логику или логику с прямой связью на полевых транзисторах (DCFL).

Напряжение питания 5 В обычно является типовым для схем логического управления силовых электронных GaN-систем. Было установлено, что запас по шуму составляет 2,1 В для низкого уровня и 2,6 В – для высокого. Исследователи утверждают, что поскольку оба запаса по шуму достаточно велики, дополнительные логические GaN-устройства обладают высокой устойчивостью к электромагнитным помехам, создаваемым высокочастотными силовыми ключами. Исследователи также подвергли схему инвертора воздействию повышенной температуры 200°C , и схема сохранила превосходные свойства комплементарного логического GaN-инвертора, к которым относятся работа в широком диапазоне напряжения питания, широкий запас по шуму и резкий переход логического состояния. Даже при 350°C запас по шуму составил 1,83 В, а коэффициент усиления по напряжению достиг 18,10 В/В. Известно, что кремниевые схемы страдают от таких проблем деградации выше 125°C как защелкивание и другие неисправности из-за тепловых утечек.

Производительность *p*-FET была ограничивающим фактором для непрерывного переключения до 2 МГц. Исследователи надеются, что дальнейшая оптимизация травления и окисления выемки канала приведет к созданию устройств с производительностью в несколько МГц.

Были изготовлены более сложные схемы, например вентили И–НЕ, ИЛИ–НЕ и КМОП-переключатель. Исследователи утверждают, что «демонстрация полного набора элементарных дополнительных логических элементов указывает на то, что эта технология является возможным подходом к созданию сложных комбинационных дополнительных логических схем GaN».

Дальнейшие возможности многоступенчатой интеграции были представлены в виде схемы защелки и кольцевого генератора. Защелка состояла из инверторов с перекрестной связью, что давало 1-бит хранилище памяти. Исследователи комментируют: «Возможность хранения данных позволяет реализовать блоки

памяти (например, статическую оперативную память) и последовательные логические схемы. Таким образом, становится возможным создавать устройства с конечным числом состояний или микропроцессоры с использованием GaN».

Авторы статьи показывают, как эти схемы позволяют снизить энергопотребление блока логического управления в преобразовательных системах питания на 20–30%. Профессор Чен поясняет: «Мы проанализировали теоретическое ограничение скорости и энергоэффективности технологии GaN КМОП на основе свойств материала GaN и доступных технологий изготовления на 8-дюймовых линиях. Мы обнаружили, что задержка одноступенчатого логического элемента даже при относительно пессимистичной оценке может оказаться меньше 1 нс за счет оптимизации процесса и уменьшения масштаба устройства для схем GaN КМОП на коммерческих платформах». Профессор Чен заключает: «Благодаря КМОП-схемам на основе GaN, реализующим такие периферийные устройства как контроллер, драйвер и датчики, рассеиваемая мощность логических блоков можно существенно снизить более чем на 3 порядка. В результате общую потребляемую мощность блока логического управления в энергосистеме можно уменьшить на 20–30%. Ожидается, что уменьшение размеров и оптимизация структуры затворов *p*-FET в еще большей мере улучшит производительность и ускорит темпы коммерциализации логических схем GaN КМОП».

Выполненные исследования и полученные результаты, по мнению автора настоящей статьи, означают очень серьезный прорыв для дальнейшей коммерциализации и быстрого поэтапного перехода к производству от простого к сложному для широкого круга аналоговых и логических микросхем особенно в устройствах, где быстродействие, частота и энергоэффективность являются ключевыми факторами. Однако не стоит ожидать быстрой замены кремния в сложных БИС, где он остается доминирующим материалом из-за цены, а также более простой и проработанной технологии. Нет сомнений, что теперь эстафету подхватят другие специалисты и компании, а быстрое развитие КМОП-технологии с использованием GaN и ее применение ускорится.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многие специалисты по прикладным применениям новых изделий на основе широкозонных полупроводников еще не успели изучить и оценить все их практические преимущества, а про-

изводители уже предлагают новые усовершенствованные генерации приборов. Американская компания EPC, один из пионеров в разработке GaN-транзисторов, начала выпуск изделий eGaN нового поколения с удвоенной удельной мощностью в сравнении с этими изделиями предыдущих поколений [34]. Сопротивление $R_{DS(ON)}$ крошечного транзистора EPC2619 размером $1,5 \times 2,5$ мм составляет всего 4 мОм. Максимальное значение результата умножения $R_{DS(ON)}$ на площадь EPC2619 составляет 15 мОм·мм², что в пять раз меньше, чем у кремниевых 80-В MOSFET.

Это изделие предназначено для ряда приложений, связанных с электроприводом двигателя. К этим приложениям, например, относятся преобразование 28/48 В для электровелосипедов, электросамокатов и электроинструментов; преобразование постоянного тока высокой плотности; солнечные оптимизаторы; синхронное выпрямление 12/20 В для зарядных устройств, адаптеров и блоков питания телевизоров.

Типичное значение $R_{DS(ON)} Q_{OSS}$, отражающее потери мощности в приложениях с жесткой коммутацией, в 10 раз лучше, чем у кремниевых 80-В МОП-транзисторов. Это позволяет использовать частоты переключения, которые в 10 раз выше, чем у кремниевых МОП-транзисторов, без потери эффективности, обеспечив, таким образом, самую высокую плотность мощности. Транзистор EPC2619 можно считать идеальным для высокочастотных понижающих, повышающе-понижающих и повышающих преобразователей в приложениях с жесткой коммутацией 24–48 В.

Типичное значение $R_{DS(ON)} Q_{OSS}$, отражающее потери мощности в приложениях с программным переключением, составляет 87 мОм·нКл, что в два раза лучше, чем у кремниевых 80-В МОП-транзисторов. Таким образом, EPC2619 отлично подходит для приложений с программным переключением, к которым относится полное мостовое первичное выпрямление для DCX DC/DC-преобразователей на основе LLC.

«Это всего лишь первое изделие нового поколения дискретных транзисторов и интегральных схем от компании EPC. С запуском EPC2619 можно считать, что силовые GaN-приборы нашей компании продолжают следовать закону Мура», – заметил Алекс Лидоу, генеральный директор и соучредитель EPC.

Похоже, однако, что при таких темпах закон Мура не будет успевать за практикой.

ВЫВОДЫ

1. Стремительный мировой рост производства транспорта с электрическим приводом и быстрых зарядных устройств вызвал многократное повышение спроса на широкозонные полупроводники, применяемые во всех узлах электромобилей и в потребительской электронике. По прогнозам, рынок ШЗП к 2032 г. достигнет 15 млрд долл. и станет одним из самых динамичных среди сегментов полупроводниковой микроэлектроники.
2. Россия, несмотря на хорошую еще советскую школу фундаментального материаловедения, никак не представлена на мировом рынке широкозонных полупроводников. В ближайшие годы нет возможностей изменить это положение к лучшему.
3. В 2022 г. продолжилась мировая консолидация производственных активов и расширение производственных мощностей по выпуску полупроводниковых приборов на основе SiC и GaN, а также самих пластин. Переход на SiC-пластины диаметром 200 мм стал устойчивым явлением, а применение 300-мм GaN-пластин состоится в ближайшем будущем.
4. Признавая большие перспективы ШЗП, США распространили санкции в отношении Китая на все, что связано с этим направлением технологий и изделий, тем самым приравняв их к суперсовременным кремниевым нанометровым технологиям.
5. После вызванного пандемией дефицита электронных компонентов мировые автогиганты и производители компонентов для автомобильной электроники нарастили усилия по самостоятельной разработке этих компонентов, включая ШЗП, с прямым выходом на контрактных производителей чипов.
6. Рост выпуска ШЗП, переход на повышенный диаметр пластин и совершенствование технологий позволят устойчиво снизить себестоимость и цены продукции, что в еще большей мере повысит их конкурентоспособность в сравнении с кремнием.
7. Для минимизации расходов, снижения себестоимости продукции и повышения доходности крупные мировые компании стали применять для ШЗП вертикальную производственную интеграцию с собственным производством по всему циклу создания продукции, начиная с выращивания слитков, изготовления подложек, эпитаксии и заканчивая изготовлением чипов и корпусированием.

8. Разработка универсальной технологии Qromis Substrate Technology (QST) на композитной подложке с близкими коэффициентами теплового расширения с эпитаксиальными слоями на основе GaN открывает хорошие перспективы для производства латеральных, полувертикальных, вертикальных GaN HEMT свыше 1200 В, микросхем управления с повышенным выходом годных за счет снижения структурных дефектов на пластинах диаметром 200 и 300 мм. Переход на 300-мм пластины по технологии QST ожидается с 2025 г.
9. В ближайшие годы будет расширяться разработка и выпуск транзисторов GaN HEMT на 1200 В и более по технологиям, которые начнут конкурировать с кремниевыми IGBT и SiC MOSFET, предназначенных для высоковольтной аппаратуры малой и средней мощности.
10. Революционная разработка КМОП-совместимой технологии на основе GaN HEMT с *p*- и *n*-канальными транзисторами открывает широкие возможности для создания не только аналоговых, но и цифровых логических микросхем, включая микропроцессоры, и ячеек памяти с меньшим энергопотреблением на 20–30%, что являлось главным препятствием для нитрида галлия в этой сфере. Этой технологии предстоит коммерциализация и эволюционный путь от простых к сложным изделиям, но перспективы у нее очень хорошие.
11. Широкозонные полупроводники уверенно теснят кремний в силовой электронике, но постепенно будут все больше проникать в остальные сферы типового применения продукции на его основе. В отличие от нитрида галлия, карбид кремния обладает меньшей универсальностью для создания электронных изделий, и сферой его применения останется силовая и высоковольтная электроника. GaN обладает прекрасными динамическими параметрами и кроме ВЧ-электроники, где он уже успешно вытесняет кремний, а также силовой электроники, где GaN составляет конкуренцию кремнию и карбиду кремния, он будет постепенно вытеснять кремний не только из систем преобразования энергии, но и из сложных быстродействующих логических микросхем с пониженным потреблением, особенно в сфере мобильной электроники. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Боднар Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2017 г. Часть 3. Новые материалы для посткремниевой эпохи – уже настоящее, а не будущее. Электронные компоненты. 2018. № 1.
2. Боднар Д. Нитрид галлия – премьер среди новых материалов полупроводниковой микроэлектроники. Компоненты и технологии. 2018. № 4.
3. Боднар Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2018 г. Электронные компоненты. 2019. № 1.
4. Боднар Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2019 г. Часть 1. Мировая политика ставит барьеры мировой экономике. Электронные компоненты. 2019. № 12.
5. Боднар Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2020 г. Часть 4. Широкозонные полупроводники как главный инструмент повышения энергоэффективности электроники. Электронные компоненты. 2021. № 3.
6. Боднар Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2021 г. Часть 2. SiC и GaN – основа новой силовой электроники настоящего и будущего. Электронные компоненты. 2022. № 1.
7. Power SiC 2022. Market and Technology Report. YOLE Development//www.yole.fr.
8. SiC device market growing at 34% CAGR from \$1.09bn in 2021 to \$6.3bn in 2027. Semiconductor Today. April 4. 2022//www.semiconductor-today.com.
9. Aggressively Sought by Automakers, Market for Automotive SiC Power Components to Exceed US\$1 Billion in 2022, Says TrendForce. July 14. 2022//www.trendforce.
10. The SiC story is only at its beginning. PGC Consultancy//www.pgconsultancy.com.
11. Power GaN 2022. Market and Technology Report. YOLE Development//www.yole.fr.
12. Compound Semiconductor Market Monitor 2022. YOLE Development//www.yole.fr.
13. GaN & SiC Power Semiconductor Market to Hit \$15 Bn by 2032. Global Market Insights Inc. October 26. 2022//www.globenewswire.com.
14. Japan's Denso pushes EV efficiency with new power semiconductors. Nikkei Asia. July 24. 2022//asia.nikkei.com.
15. Automakers Accelerating Internalization of Automotive Chips. BusinessKorea. July 18. 2022//www.businesskorea.co.kr.
16. Japan startup to mass-produce new parts that increase EV range. Nikkei Asia. August 24. 2022//asia.nikkei.com.
17. Chip maker Wolfspeed to build new U.S. factory to meet surging EV demand. Reuters. September 09. 2022//www.reuters.com.
18. STMicroelectronics to build integrated Silicon Carbide substrate manufacturing facility in Italy. STMicroelectronics. October 05. 2022//www.st.com.
19. Onsemi Expands its Silicon Carbide Fab in the Czech Republic. Onsemi. September 21. 2022//www.onsemi.com.
20. Onsemi Celebrates Expansion of Silicon Carbide Production Facility in New Hampshire. Onsemi. August 11. 2022//www.onsemi.com.
21. Onsemi Divests Wafer Manufacturing Sites as Part of Fab-Liter Strategy. Onsemi. February 28. 2022//www.onsemi.com.
22. Navitas Semiconductor, Industry-Leader in Gallium Nitride Power ICs, Announces Acquisition of GeneSiC Semiconductor, Silicon Carbide Pioneer. Navitas Semiconductor. August 15. 2022//navitassemi.com.
23. Morand's eTechnology promises 72-second electric vehicle charging. Inceptiv Mind. November 23. 2022//www.inceptivemind.com.
24. Taking Stock of SiC, Part 1: a review of SiC cost competitiveness and a roadmap to lower costs. PGC Consultancy. October 19. 2021//www.pgconsultancy.com.
25. The Economics Favor Vertical GaN. Odyssey Semiconductor. August 09. 2022//www.odysseysemi.com.
26. Towards Manufacturing Large Area GaN Substrates from QST Seeds. CS Mantech//csmantech.org.
27. GaN Wide Bandgap Semiconductor Enabling 1200V and Beyond Power Switches, Now Commercially Available for 200 MM Large Scale Manufacturing. Markets Insider. June 09. 2021//markets.businessinsider.com.
28. www.qromis.com.
29. Qromis: Ready for Business. Compound Semiconductor. February 24. 2020//compoundsemiconductor.net.
30. GaN breakthrough at 1200V takes on SiC. EENews Europe. April 29. 2021//www.eenewseurope.com.
31. Propelling the Power Electronics Revolution: 200 mm Diameter, 100 V to 1800 V and beyond GaN-on-QST High Volume Device Manufacturing Platform. CS MANTECH Conference. May 9–12. 2022//csmantech.org.
32. HKUST Researchers Develop Technology to Extend the Horizon of Wide-Bandgap Semiconductor Gallium Nitride Electronics. The Hong Kong University of Science and Technology. August 20. 2021//hkust.edu.hk.
33. On the operating speed and energy efficiency of GaN-based monolithic complementary logic circuits for integrated power conversion systems. Fundamental Research. 2021. № 1.
34. EPC Launches a New Generation of eGaN Technology that Doubles Performance. Efficient Power Conversion Corporation. November 15. 2022//epc-co.com.