

## Полупроводниковая микроэлектроника – 2025 г.

### Часть 2.2. Стремительная эволюция технологий и приборов на основе широкозонных полупроводников



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

**Мировая полупроводниковая отрасль в производстве ШЗП переходит на пластины диаметром 200–300 мм, что приведет к снижению себестоимости, рыночным ценам чипов и росту конкуренции. Компания Onsemi анонсирует высоковольтную вертикальную технологию GaN-on-GaN. Совершенствующаяся технология GaN-on-QST в ближайшие годы изменит мировой рыночный ландшафт в производстве GaN-продукции и в бизнес-моделях развития компаний за счет лишения имеющихся преимуществ IDM-компаний. Технологии и продукция на основе широкозонных полупроводников SiC и GaN развиваются ускоренными темпами, а исследования с новыми материалами AlN, ScAlN переходят на прикладной этап.**

#### Переход на пластины ШЗП большего диаметра – главная стратегия мировых компаний

В части 2.1 этой статьи были рассмотрены основные особенности, перспективы развития мирового рынка и сфер применения изделий из главных в настоящее время ШЗП – карбида кремния и нитрида галлия [1]. В этой статье основное внимание уделяется переходу мировых компаний на пластины большего диаметра как основному способу снижения себестоимости и цены, новым технологиям производства полупроводниковой продукции на основе SiC, GaN и новым перспективным материалам ШЗП.

Переход к производству GaN-чипов на пластинах диаметром 200 мм, а к концу года в некоторых компаниях и на 300 мм является главной тенденцией 2025 г. Еще четыре–пять лет назад превалировало 100-мм производство, а в текущем году контрактные и IDM-компании уже рассматривают 150-мм диаметр пластин как устаревший.

TSMC закрывает свое производство GaN-on-Si на 150-мм пластинах и уходит из этого бизнеса, не являющегося ее главным направлением [2]. С 2015 г. компания являлась главным контрактным производителем силовых чипов по технологии GaN-on-Si на 150-мм пластинах.

Infineon Technologies – вертикально интегрированный производитель GaN-продукции

на пластинах диаметром 200 мм с производственными площадками в Австрии и Малайзии. Компания недавно сообщила о разработке пластин SiC диаметром 300 мм, которые в долгосрочной перспективе приведут к повышению эффективности и снижению себестоимости производства [3]. Начало массового 300-мм производства запланировано на 2026 г. Для производства самих чипов на 300-мм пластинах используется оборудование для кремниевых пластин идентичного диаметра. Главное отличие при переходе на 300 мм – сложный процесс выращивания эпитаксиальных слоев на кремниевой подложке. Именно в этом направлении сосредоточится множество ноу-хау, позволяющих избежать деформации и поломки пластин, обусловленных различием кристаллических решеток кремния и нитрида галлия. Оборудование для MOCVD-эпитаксии GaN-on-Si на пластинах 300 мм отсутствует, и Infineon работает в тесном контакте с его создателями.

Компания Innoscience, крупный IDM-производитель GaN-on-Si, осуществляет крупносерийное производство на своем заводе 200-мм пластин в Китае и является крупнейшим в мире специализированным производством GaN-on-Si с мощностью 10 тыс. пластин в месяц [4].

Компания Transphorm, в настоящее время входящая в состав Renesas, производит чипы GaN-on-Si на заводе 150-мм пластин

в Японии [5]. Ожидается также, что производство 200-мм пластин стартует к 2027 г.

Texas Instruments (TI) имеет 200-мм GaN Fab в Японии, а также 150-мм производственную линию в Далласе (США) [6]. Разрабатывается пилотная линия по производству пластин диаметром 300 мм.

У компании Nexperia имеется GaN- завод 150-мм пластин в Германии, который планируется модернизировать под выпуск 200-мм пластин [7].

Компания XFAB предлагает услуги фабрики для GaN-on-Si D-Mode HEMT в диапазоне 100–650 В на пластинах диаметром 200 мм на своем заводе в Дрездене [8].

Компания Polar Semiconductor, в настоящее время единственный в США коммерческий контрактный завод, специализирующийся на датчиках, силовых и высоковольтных полупроводниках, заявила о покупке лицензии у Renesas и планах по производству чипов GaN-on-Si на 200-мм пластинах [9]. Компания считает GaN-технологии приоритетными, в том числе вследствие их полной совместимости с КМОП-техпроцессами, на которых она также специализируется. Polar не форсирует SiC-техпроцессы из-за высокой конкуренции со стороны китайских компаний.

GlobalFoundries (GF) со своей фабрикой GaN-on-Si в Вермонте (США) является еще одним контрактным производителем, готовым расширить 200-мм производство чи-

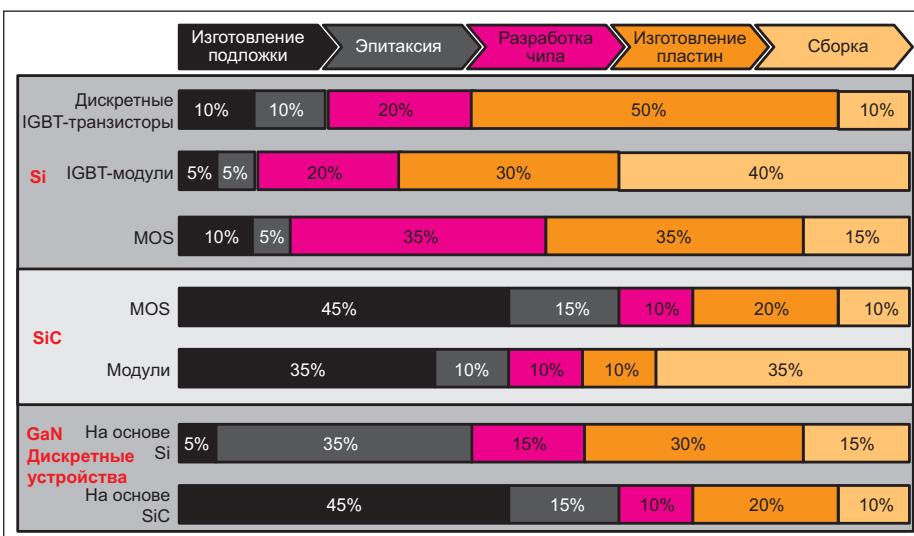


Рис. 1. Структура стоимости процессов создания приборов на основе Si, SiC, GaN

пов GaN в соответствии с политикой США по развитию этой критически важной технологии. GF заключила с TSMC соглашение о лицензировании технологии производства кристаллов GaN-Si HEMT на напряжение 650 и 80 В [10]. GF проведет сертификацию лицензированной технологии GaN на своем производственном предприятии в Берлингтоне. Разработка запланирована на начало 2026 г., а производство начнется позднее в том же году.

Таким образом, в настоящее время нет ни одной крупной IDM- или контрактной компании, которая продолжала бы выпускать пластины только диаметром 150 мм или не готовила переход на 200–300 мм.

Однако не все проекты фабрик по ШЗП имеют хорошее продолжение. В 2021 г. в связи с изменением бизнес-стратегии компании Onsemi ее завод в Ауденарде (Бельгия) был продан стартапу BelGaN Group, за которым стояли две китайские компании. Этот завод до продажи специализировался на КМОП-технологии 0,35 мкм, производстве ИС и дискретных компонентов на пластинах 150 и 200 мм. У автора этой статьи, посетившего завод Onsemi в 2017 г., он оставил хорошее впечатление. Новые собственники пытались организовать производство компонентов GaN-on-Si для автомобильной промышленности, ЦОД, солнечной энергетики, но вложенных инвестиций оказалось недостаточно – компания BelGaN не смогла привлечь дополнительные средства и в июле 2024 г. обанкротилась [11].

Отдельного интереса заслуживает тайваньская фабрик-компания VIS, которая купила у компании Qromis лицензию на перспективную технологию GaN-on-QST.

На выставке Semicon China 2025 китайская компания SICC представила полный ассортимент подложек из карбида кремния диаметром 300 мм, включая полуизолирующие высокочистые пластины р- и н-типов. Среди

них особое внимание привлекла 300-мм оптическая волноводная пластина SiC, поставив SICC на передний край инноваций в области технологий дополненной реальности и виртуальных дисплеев следующего поколения [12].

Доля SiC-подложки составляет примерно 45% от общей стоимости чипов, а эпитаксии – около 15%, тогда как на проектирование и производство устройств совместными усилиями приходятся оставшиеся 40% (рис. 1) [13]. Для снижения стоимости SiC-приборов мировые компании переходят с пластина диаметром 150 на 200 мм. Этот переход сам по себе не приведет к снижению цены пластины – наоборот, за счет увеличения ее толщины с 350 мкм у 150-мм пластин до 500 мкм у 200-мм и роста проблем с дефектностью на большем диаметре вначале повышает стоимость последней. Однако стоимость единицы площади снижается. Потребуются также технологические, инженерные и инструментальные решения в производстве для достижения приемлемого результата, а также новые подходы на системном уровне. Еще одним решением станут дизайнерские совершенствования по снижению площади чипов за счет эволюционного улучшения проходного сопротивления транзисторов. Однако почти двухкратное увеличение съема с 200-мм пластины при почти одинаковой себестоимости самого процесса изготовления чипов на пластинах разных диаметров является важным стимулом к переходу на больший диаметр. Через эти этапы уже осуществлялся переход с диаметра 100 на 150 мм.

YLE Group прогнозирует, что к 2028 г. доля SiC-пластины в стоимости корпусированного прибора снизится до 24% [14]. Тенденция снижения стоимости единицы площади пластины с эпитаксией при увеличении ее диаметра является универсальным средством сокращения себестоимости при использовании любых материалов (рис. 2) [15].

Высокая стоимость подложек и эпитаксиальных пленок – одна из причин превалирования вертикальных IDM-компаний в бизнесе производства SiC-приборов в 2023–2025 гг. Именно за счет организации сквозного вертикального цикла производства, начиная со слитков, пластины и заканчивая чипами и сборкой, как в 1970–1980 гг., они, в первую очередь, видят возможности снижения себестоимости и цены продукции, а получения основной прибыли за счет продажи готовых приборов и быстрого подстраивания под потребности рынка. По этой причине в этом сегменте мало специализированных контрактных фабрик-производителей чипов. До недавнего времени одним из главных мировых контрактных производителей чипов по SiC-технологии, особенно по РЧ-приборам, как раз являлась американская IDM-компания Cree (ныне Wolfspeed), не выдержавшая ценовой конкуренции с китайскими компаниями. Однако обвал цены пластин из карбида кремния китайскими компаниями способен разрушить эту тенденцию, и вместо преимуществ IDM-компаний могут получить убытки наряду с отменой вертикальной интеграции.

В июне текущего года Сингапурское агентство по науке, технологиям и исследованиям (A\*STAR) представило первую в мире открытую линию в области исследований и разработок по производству изделий из карбида кремния на 200-мм пластинах [16]. Предприятие промышленного класса интегрирует всю цепочку создания SiC-приборов, начиная с выращивания подложки и заканчивая изготовлением устройств и испытаний надежности, а также служит платформой для совместной работы местных компаний по производству силовой электроники. Глобальные лидеры по направлениям уже участвуют в совместном производстве: Centrotherm поставляет высокотемпературное оборудование; ASM – передовые технологии осаждения, включая осаждение атомных слоев, эпитаксию и химическое осаждение из газовой фазы; Soitec разрабатывает технологию SmartSiC вместе с Институтом микроэлектроники A\*STAR. Сервисное меню по новой линии еще до конца не сформировано и будет меняться, но очевидно, что сингапурские власти отчетливо понимают перспективы, роль новой технологии и пыта-

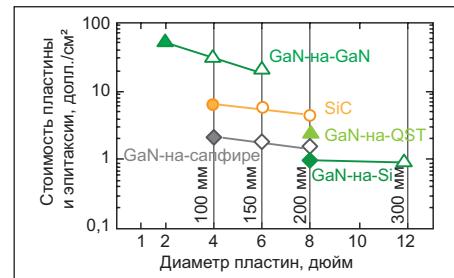


Рис. 2. Структура стоимости эпитаксиальных SiC- и GaN-пластин из расчета на 1 мм<sup>2</sup> в зависимости от типа подложки и диаметра пластин

ются оказать максимальную поддержку местным компаниям.

Китай продолжает активные работы по совершенствованию технологии и оборудования для изготовления пластин из карбида кремния. В сентябре в компании SuperSiC была запущена производственная линия для выпуска SiC-пластин диаметром 300 мм. Важной особенностью линии является то, что она полностью оснащена китайским оборудованием компании Zhejiang Jingsheng Mechanical & Electrical – материнской компании SuperSiC [17], что будет способствовать дальнейшему снижению цены SiC-пластин и новым банкротствам на рынке среди зарубежных конкурентов. Им станет еще сложнее противостоять ценовому давлению китайских компаний.

В начале октября компания Imec заявила о запуске нового направления программы, посвященного разработке технологии GaN на пластинах диаметром 300 мм для низковольтных и высоковольтных силовых электронных приложений [18]. Ее первоначальными партнерами являются компании AIXTRON, GlobalFoundries, KLA Corporation, Synopsys и Veeco – специализированные поставщики технологического, метрологического оборудования, программных средств для проектирования силовых полупроводников и контрактных услуг. Переход на 300-мм пластины позволит не только увеличить производственные мощности, но и создать более эффективную, экономичную и компактную силовую электронику для применения в процессорах, графических процессорах, автомобильных технологиях, солнечной энергетике, телекоммуникациях и центрах обработки данных. К концу 2025 г. в чистом помещении Imec планируется установить все 300-мм производственное оборудование. В рамках программы сначала будет создана базовая технологическая платформа p-GaN HEMT для низковольтных приложений (100 В и выше) по технологии GaN-on-Si с использованием кремниевых 300-мм пластин. В дальнейшем планируется работа по высоковольтным приложениям. Для приложений с напряжением 650 В и выше будут использоваться 300-мм пластины GaN-on-QST.

В ходе этих разработок исследования Imec направлены на контроль прогиба пластины и обеспечение механической прочности – критически важных аспектов для надежной обработки GaN-пластин большого диаметра.

### Onsemi анонсирует вертикальную технологию GaN-on-GaN

Американская компания Onsemi около шести лет назад резко изменила стратегию развития и продала свои заводы в Бельгии, Японии, США по выпуску интегральных микросхем по техпроцессам от 130 нм, чтобы заняться технологиями и продукцией на основе карбида кремния. Компания инвестиро-

вала более 2 млрд долл. в SiC-производство в Чехии, в пять раз увеличила производство SiC-пластин на своем заводе в шт. Нью-Гемпшир и является одним из пяти главных мировых IDM-производителей продукции на карбиде кремния. В течение этого периода Onsemi не анонсировала проведение разработок по нитриду галлия. В 2024 г. Onsemi приобрела в шт. Нью-Йорк бывшую фабрику компании NexGen Power Systems – одного из разработчиков вертикальных приборов GaN-on-GaN, не добившегося большого прорыва, в первую очередь, вследствие неконкурентной цены. В конце октября текущего года Onsemi представила новую технологию vGaN вертикальных транзисторов GaN-on-GaN, ориентированную на производство продукции свыше 1200 В [19]. О перспективах вертикальной технологии автор этой статьи писал ранее [20]. Этот процесс позволяет создать приборы с напряжением до 10 кВ, но пока имеет ограничения по диаметру пластин и их стоимости. В то же время структуры GaN-on-GaN лишены дефектности и недостаточной механической прочности структур GaN-on-Si, обусловленных различием параметров решеток GaN и Si. Onsemi сообщает, что размеры ее изделий vGaN в три раза меньше, чем у аналогов GaN-on-Si, а ее клиенты уже получили образцы изделий для оценки. По информации компании, технология защищена 130 патентами.

Никаких спецификаций, параметров изделий, а также диаметра пластин, на которых они изготовлены, Onsemi не приводит, но, вероятно, они базируются на продукции NexGen. Их экономические показатели пока также неизвестны. Главным недостатком изделий GaN-on-GaN является небольшой диаметр пластин 50–100 мм и связанные с этим высокая стоимость чипов. Прорыв будет совершен, если Onsemi удастся перейти хотя бы на 150-мм пластины.

Основными сферами применения продукции на основе GaN-on-GaN станут 800-В преобразователи для ЦОД ИИ, компактные инверторы и преобразователи для электромобилей, солнечной и ветровой энергетики, промышленной автоматизации, а также для авиакосмической и оборонной отраслей. Если технические и особенно экономические параметры vGaN-продукции окажутся конкурентными, то Onsemi станет первым крупным мировым производителем вертикальных изделий GaN-on-GaN.

Однако время появления и форма анонса вызывают у автора статьи некоторые вопросы:

- почему заявление сделано было именно сейчас;
- почему анонсирован только техпроцесс и, к тому же, только в общем виде, хотя его основные особенности давно известны;
- почему не представлены параметры, цены и технические описания приборов;
- когда планируется выпуск продукции?

Можно предположить, что ответом на эти вопросы являются возникшие проблемы после широкой экспансии Китая по снижению цен на карбид кремния и желание Onsemi быстро обозначить наличие еще одного направления перспективных широкозонных полупроводников. Именно карбид кремния является в настоящее время для Onsemi главным материалом, который, однако, находится под давлением рынка. Проблемы с Wolfspeed из-за обвала цен на карбид кремния китайскими компаниями всем известны, а информация по экономике vGaN-продукции на текущий момент едва ли является поводом для оптимизма. И это понятно, поскольку они находятся только на начальном этапе эволюции и освоения. В текущих условиях китайской экспансии и тарифных войн именно Onsemi может оказаться следующей компанией, которая повторит путь Wolfspeed, потеряв рынок продукции на карбиде кремния. Истории этих двух компаний по изменению стратегии с продажей других активов ради перехода на карбид кремния очень схожи. Наличие альтернативных и пока не освоенных Китаем изделий на GaN-on-GaN является для Onsemi очень важным, чтобы успокоить рынок и инвесторов. Компания решила не делать ставку на технологию и продукцию на GaN-on-Si в сегменте с высокой конкуренцией, а совершенствовать перспективную для высоковольтных приборов технологию GaN-on-GaN.

### TSMC будет использовать 300-мм SiC-пластины для ИИ и 3D

Всего через два месяца после объявления о выходе TSMC с рынка услуг GaN-фаундри компания сообщила об изменении стратегии и применении широкозонного карбида кремния в новой роли. Исключительные тепловые и механические свойства SiC открывают новые возможности в области современных корпусов микросхем, особенно в условиях растущих требований к теплопередаче в области ИИ и 3D-архитектуры [21]. Ускорители ИИ и стеки 2,5D/3D-микросхем становятся все более плотными, а отвод тепла – критически важным ограничением. Подложки SiC, теплопроводность которых достигает 500 Вт/(м·К), значительно превышают показатели такой традиционной керамики, как оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ) или сапфир, используемых в корпусах микросхем. За счет высоких термомеханических характеристик SiC компания стремится создать масштабируемую платформу для корпусирования приборов нового поколения. Высокая теплопроводность, механическая прочность и устойчивость к термическим нагрузкам, а также химическая стабильность в сурьных условиях делают SiC идеальным материалом для интенсивных тепловых потоков в конструкциях 2,5D- и 3D-микросхем.

TSMC оценивает проводящий SiC n-типа в качестве термической подложки и полуизолирующий SiC как потенциальный интерпозер в конструкциях на базе чиплетов. Компания планирует применение с этими целями 300-мм SiC-пластин, а с учетом первостепенной важности тепловых параметров для корпусов и TSV-интерпозеров требования к структурной дефектности пластин снижаются в сравнении с требованиями к производству транзисторов и диодов.

TSMC не просто улучшает рассеивание тепла – она формирует дифференциированную платформу для искусственного интеллекта и высокопроизводительных вычислений, позиционируя SiC как краеугольный камень будущей компоновки микросхем.

### Совершенствование технологии GaN-on-QST

Производственные мощности GaN развиваются у дочерней компании TSMC Vanguard International Semiconductor Corporation (VIS), специализирующей на новой более сложной и дорогостоящей технологии GaN-on-QST, которая используется на 200-и 300-мм пластинах. Китай пока не имеет доступа к ней, что дает VIS очевидные преимущества. VIS работает в тесном контакте с компанией Qromis – разработчиком технологии GaN-on-QST и мировым инновационным технологическим лидером Imec, что гарантирует ей высокий уровень новой перспективной технологии. VIS предлагает технологию Gen 1 GaN-on-QST E-Mode 650 V на 200-мм пластинах и разрабатывает процесс GaN-on-QST E-Mode 1200 V, которые будут представлены в 2026 г.

Эта технология является самой перспективной среди процессов производства GaN-приборов. Ее отличает максимальная универсальность для создания латеральных, вертикальных высоковольтных силовых транзисторов, а также интегральных микросхем силовой электроники. При производстве чипов она полностью совместима с оборудованием и технологией 200-и 300-мм линий КМОП ИС. По этой технологии уже выпускаются GaN-транзисторы 650 V E-Mode и драйверы на пластинах диаметром 200 мм. Подробнее о ней см. [22].

Одной из первых компаний, которая не только освоила, но и совершенствует эту технологию для транзисторов на 650 и 1200 В является европейский центр Imec [23–24]. Он предоставляет контрактные фабнди-услуги по процессам GaN-on-Si и GaN-on-QST. Швейцарская фаблесс-компания NovaWave AG, пользуясь этими технологиями Imec, выпустила на рынок не только первые в мире диоды Шоттки на основе GaN, но и 650 V GaN-on-QST E-Mode HEMT-транзисторы и микросхемы драйверов для Si/SiC MOSFET, IGBT, GaN HEMT [25].

На структурах GaN-on-QST другими учеными были созданы и исследованы НЕМТ-транзисторы на 1800 и более 2000 В [26–27]. Такие результаты теперь не достигаются на процессе GaN-on-Si. Отличительной особенностью GaN-on-QST является возможность использования в качестве базового слоя для эпитаксии GaN не только кремния, но и SiC и GaN. Сам процесс производства чипов совместим с классической КМОП-технологией и оборудованием традиционных фабрик.

VIS приобрела у компании Qromis лицензию на технологию GaN-on-QST и запустила массовое производство приборов 0.35  $\mu$ m 650 V GaN-on-QST на 200-мм пластинах [28]. Кроме того, она уже имеет 200-мм производственную линию для выпуска GaN-on-Si HEMT. VIS имеет пять заводов по выпуску 8-дюймовых пластин на Тайване и в Сингапуре с ежемесячной производительностью около 262 тыс. пластин в 2022 г. Компания Shin-Etsu в Японии также лицензировала технологию GaN-on-QST для производства 200-мм пластин [29] и представила на выставке SEMICON TAIWAN 2024 в Тайбэе первые 300-мм пластины GaN-on-QST с эпитаксиальными слоями [30], а компания Kuma Technologies в Северной Каролине также производит 200-мм пластины GaN-on-QST [31].

Лицензии от Qromis и Imec позволили компании VIS быстро развиться с нуля, сохранив низкие затраты на исследования и разработки за счет внедрения QST-подложки, совместимой с нитридом галлия, соответствующей стандартам SEMI и подходящей для заводов по КМОП-производству. В ближайшие годы VIS с техпроцессом GaN-on-QST может стать главным мировым и пока единственным в мире крупным контрактным производителем силовых латеральных и вертикальных GaN-транзисторов с напряжением до и свыше 1000 В и интегральных микросхем по этой перспективной технологии на пластинах диаметром 300 мм. Ее освоение позволит развернуть в обратную сторону тенденцию получения преимуществ вертикальными IDM-компаниями, работающими по сквозному циклу производства, и дать некоторые преимущества в заказах фаблесс-компаниям, не отягощенным большими расходами на производство пластин и чипов.

К такому заключению пришел Джем Баскери (Cem Basceri), генеральный директор и соучредитель компании Qromis: «Миф о том, что GaN-on-QST является сложной и дорогостоящей технологией, порожден недостатком сведений о ней [32]. QST во многом схожа с традиционной технологией SOI (кремний-на-изолиторе) в отношении производства и стоимости. В процессе изготовления подложек QST используются стандартные энергоэффективные и недорогие полупроводниковые технологические

инструменты и материалы на традиционных КМОП-фабриках, благодаря чему выход годных превышает 98%, а время технологического цикла меньше недели. Разница в стоимости между QST и, например, кремниевыми подложками компенсируется за счет эффективной и недорогой эпитаксии GaN. Дополнительное преимущество по стоимости в сравнении с технологией GaN-on-Si реализуется при той же стоимости устройства за счет большей производительности, а также за счет использования всех других преимуществ передовых производственных платформ 200 мм и 300 мм».

«Мы думаем на десятилетия вперед, в том числе о переходе на 300-мм пластины, технологии вертикальной GaN-структуры и о новых гибридных стеках материалов даже для применений, не связанных с GaN. Технология нового поколения Gen 3 QST с интерфейсом GaN, созданная на основе подложек Gen 2 QST с интерфейсом SiC, представляет собой полностью согласованное решение для GaN по тепловым характеристикам и структуре решетки. Эта инновационная интерфейсная технология от компании Shin-Etsu Chemical и все ее схожие разновидности полностью защищены патентами Qromis», – заявил Баскери.

Кроме того, он считает, что «вертикально интегрированные компании решат некоторые имеющиеся критические пробелы в использовании GaN-технологии. В то же время нельзя полагаться только на работу этих IDM-компаний, исключив контрактные заводы по изготовлению GaN-чипов, так как это ограничит возможности всей отрасли и замедлит ее развитие».

Изделия GaN-on-QST 650 V HEMT, обладающие хорошей эффективностью, найдут применение на станциях быстрой зарядки и в центрах ИИ. Ожидается также, что высоковольтные транзисторы на 1200 В по этому техпроцессу начнут постепенно конкурировать с аналогичными SiC-изделиями во всех сферах, начиная с автомобильной промышленности и заканчивая солнечной энергетикой.

### Новые материалы, технологии и приборы ШЗП и СШЗП

#### GaN HEMT для Венеры

Широкозонные и сверхширокозонные (СШЗП) полупроводники незаменимы для работы электронных приборов в экстремальных условиях, особенно при повышенных радиационных воздействиях и высоких температурах [33]. Обычные кремниевые схемы разрушаются при температуре выше 350 °C, но крайне важна возможность получать информацию от датчиков в высокотемпературных средах, находящихся, например, внутри реактивного двигателя или в глубокой нефтяной скважине. Карбид кремния позволяет повысить температуру до 600 °C, но нитрид

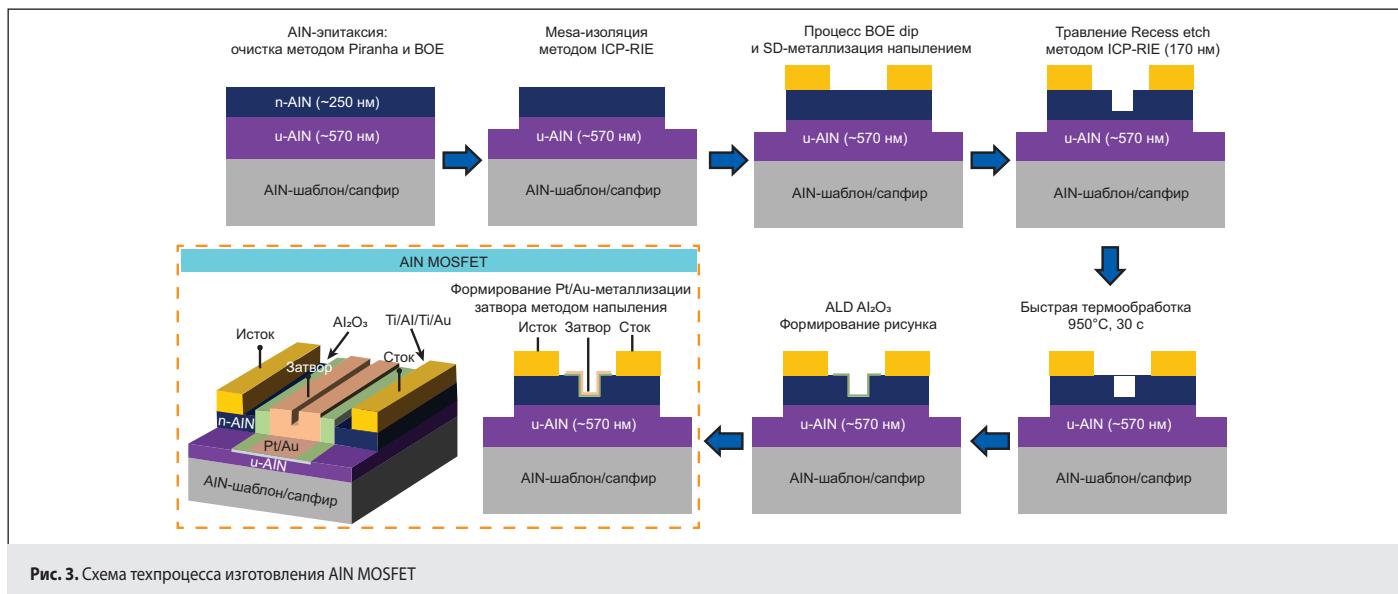


Рис. 3. Схема техпроцесса изготовления AlN MOSFET

галлия обладает уникальными свойствами, которые делают его более функциональным при высоких температурах. Исследователи из Университета шт. Пенсильвания разработали чип из нитрида галлия, способный работать при 800°C [34]. Структура GaN HEMT включает в себя пленку из AlGaN поверх слоя нитрида галлия. Экспериментальный транзистор HEMT из нитрида галлия при 800°C оставался работоспособным в течение часа. За это время он продемонстрировал хорошие рабочие характеристики, включая малые токи утечки. Чтобы заставить GaN HEMT работать при 800°C, потребовались некоторые изменения в его структуре для минимизации тока утечки, который проявляется даже тогда, когда транзистор должен быть выключен. Такая высокая работоспособность GaN HEMT была достигнута за счет использования барьера из силицида тантала для защиты компонентов устройства от воздействия окружающей среды и предотвращения соприкосновения внешнего слоя металла по бокам устройства со слоем 2DEG, что в еще большей мере увеличило бы ток утечки и нестабильность транзистора. Помимо минимизации тока утечки, одной из функций барьера из силицида тантала является предотвращение потенциальной реакции титана в устройстве с пленкой AlGaN, которая может разрушить слой 2DEG. Несмотря на возможные проблемы с долговечностью, созданный чип расширяет границы работоспособности электроники, например, на поверхности Венеры. Уровень 800°C важен и для гиперзвуковых летательных аппаратов и оружия. Чип может появиться на рынке уже в ближайшее время, поскольку поставщиков подобных решений крайне мало, а спрос на них уже сформировался.

#### Соединения AlN и ScAlN

В [33] был отмечен высокий потенциал приборов на основе соединений нитрида алюминия (AlN), обладающих самыми уни-

версальными и интересными свойствами среди СШЗП с разносторонними вариантами применения.

В текущем году появился первый MOSFET на основе AlN [35]. Техпроцесс создания и поперечное сечение этого МОП-транзистора показано на рис. 3. Изначально разработчики AlN-MOSFET сосредоточили свои усилия на улучшении контактного сопротивления n-легированного AlN. Металлические слои из Ti/AI/Ti/Au были нанесены распылением на выращенный методом MOCVD слой AlN. Контакты были отожжены в среде азота при 750–950°C.

Все контакты показали неомическое поведение, что указывает на барьер между n-AlN и металлом. Анализ квазилинейной области при напряжениях выше 10 В показал, что отжиг при 950°C дал наименьшее удельное контактное сопротивление 0,148 Ом·см<sup>2</sup> при сопротивлении слоя 16,5 МОм/кв. Это условие использовалось при формировании контакта исток/сток МОП-транзистора. Устройства изначально изолируются посредством плазменного травления. После металлизации истока/стока и отжига верхний слой n-AlN толщиной 250 нм подвергается локальному травлению на 170 нм, а также наносится и структурируется затворный диэлектрик из оксида алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) толщиной 30 нм. В конечном итоге формируется затворный металл Pt/Au. Длина затвора МОП-транзистора равна 20 мкм, ширина канала – 400 мкм, а ширина выемки затвора – 10 мкм.

Еще одним способом повышения универсальности нитрида алюминия является его легирование скандием [36]. Легированный скандием нитрид алюминия (ScAlN) стал перспективным альтернативным барьерным материалом благодаря значительно усиленной спонтанной и пьезоэлектрической поляризации, что приводит к увеличению двумерной плотности электронного газа на гетерогранице.

ScAlN не только обладает исключительной термической стабильностью, но и поддерживает благоприятную подвижность электронов несмотря на высокую поляризацию, обеспечивая работоспособный баланс между удержанием заряда и переносом носителей. Эти характеристики делают ScAlN/GaN HEMT сильными кандидатами для мощных и высокочастотных приложений следующего поколения, включая связь 6G, космическую электронику и квантовые вычисления. Ключевые свойства материала, к которым относятся параметры решетки, запрещенная зона, диэлектрическая проницаемость и поляризация, можно настраивать, регулируя состав Sc. Включение Sc в AlN вызывает искажение решетки и переход от прямой к непрямой запрещенной зоне. Запрещенная зона остается прямой до  $x = 0,25$  в Sc<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>. При более высоком содержании Sc запрещенная зона переходит в непрямую с небольшими отклонениями от теоретических прогнозов. Помимо регулировки запрещенной зоны, включение Sc увеличивает диэлектрическую проницаемость, что позиционирует ScAlN как перспективный диэлектрик с высоким коэффициентом  $k$  и делает его пригодным для КМОП-технологии на основе нитридов благодаря его потенциалу для улучшенного управления транзисторным затвором. Включение Sc в еще большей степени усиливает спонтанную и пьезоэлектрическую поляризацию, создавая уникальную синергию, которая сочетает в себе устойчивость к окружающей среде с сильным удержанием носителей. В совокупности эти свойства делают HEMT на основе ScAlN многообещающими кандидатами для использования в электронике следующего поколения на требовательных платформах, например, в авиакосмических системах и средах с высоким уровнем радиации.

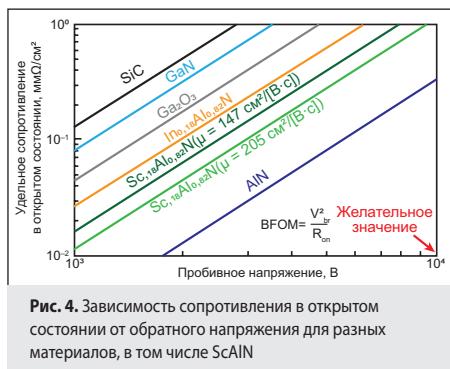


Рис. 4. Зависимость сопротивления в открытом состоянии от обратного напряжения для разных материалов, в том числе ScAlN

На рис. 4 показано, что  $Sc_{0,18}Al_{0,82}N$  имеет самый высокий показатель достоинств Балиги (BFOM) среди  $Al_{0,82}In_{0,18}N$ ,  $Ga_2O_3$ ,  $GaN$  и  $SiC$ . Обладая подвижностью электронов  $147-205\text{ cm}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , его BFOM ( $62,6-87,3\text{ ГВт/см}^2$ ) в пять–семь раз выше, чем у  $GaN$ , и в 8–11 раз выше, чем у  $SiC$ , что делает его многообещающим кандидатом для высоковольтной силовой электроники.

Кроме того,  $ScAlN$  отличается от таких стандартных барьерных материалов, как  $AlGaN$  и  $InAlN$ , благодаря собственному сегнетоэлектричеству, которое обеспечивает энергонезависимое управление пороговым напряжением и реконфигурируемую функциональность устройств. Эти характеристики позиционируют НЕМТ на основе  $ScAlN$  как универсальную платформу для передовых технологий, включая бесприводную связь 6G, спутниковые системы, радиолокационные приложения и высокоеффективную силовую электронику.

### Карбид кремния с алмазным обогащением

Coherent Corp., мировой лидер в области инженерных материалов, заявил о выпуске революционного керамического композита на основе карбида кремния ( $SiC$ ) с алмазным обогащением, предназначенного для решения тепловых задач передовых центров обработки данных с искусственным интеллектом и систем высокопроизводительных вычислений [37]. Изотропная теплопроводность запатентованного материала из карбида алмаза и кремния от Coherent превышает  $800\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , и у него вдвое лучший показатель по сравнению с медью, что является текущим отраслевым эталоном. Он также близко соответствует коэффициенту теплового расширения кремния, что делает его идеальным для прямой интеграции с полупроводниковыми устройствами. Поскольку на охлаждение приходится до 50% энергопотребления ЦОД, материал обеспечивает более надежную работу, более продолжительный срок службы компонентов и значительно меньшие затраты на охлаждение. Этот композит, разработанный для обеспечения долговечности и универсальности, устойчив к коррозии, электроизоляции

и механически устойчив в широком диапазоне температур. Он полностью совместим с системами прямого жидкостного охлаждения, легко интегрируется в современные серверные архитектуры и встраиваемые системы охлаждения. К основным областям применения относятся прямое распределение тепла на чипе, подложки для полупроводниковых устройств и другие передовые решения, где материалы на основе меди не годятся.

### Арсенид бора (BAs)

Постоянный рост мощностей электронных устройств и проблема отвода тепла становятся с каждым годом все более важными и сложными, особенно в отношении устройств без принудительного водяного и вентиляторного охлаждения. По этим причинам исследованиям и новым материалам для теплоотвода в электронике уделяется большое внимание.

Исследования арсенида бора (BAs) до 2013 г. были редки, однако с тех пор как в 2013 г. было теоретически предсказано, что теплопроводность BAs составляет  $2200\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  при комнатной температуре, стало широко исследоваться выращивание монокристаллов BAs. Ученые из Хьюстонского университета сделали новаторское открытие в области теплопроводности, опровергнув существующую теорию о том, что арсенид бора не может конкурировать с алмазом по теплопроводности [38]. Были выращены кристаллы BAs с большим количеством дефектов и теплопроводностью  $200-400\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Последующие усилия были сосредоточены на выращивании крупных кристаллов BAs для исследования широкого ряда приложений, использующих высокую теплопроводность. Было отмечено, что кристаллы, показывающие теплопроводность при комнатной температуре  $1200\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , все еще имели высокую концентрацию точечных дефектов, включая Si, C, O и т. д. Это предполагает возможность того, что собственная теплопроводность BAs при комнатной температуре могла бы превышать  $1200\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , если можно было бы снизить концентрацию точечных дефектов. С использованием частично очищенного As удалось вырастить монокристаллы BAs с гораздо меньшим содержанием примесей. Величина экспериментально измеренной теплопроводности составила около  $2100\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , что открывает новую эпоху в исследованиях BAs и ускоряет рост кристаллов большего размера для разных применений.

### Инновация Hexagem

Снижение дефектности выращиваемых эпитаксиальных слоев  $GaN$  является одной из ключевых задач, особенно для структур  $GaN$ -on- $Si$ . Ее значение увели-

чивается с ростом толщины слоев  $GaN$ , необходимых для высоковольтных и особенно вертикальных структур и изделий, а также при увеличении диаметра пластин. Решение этой задачи позволяет не только повысить надежность  $GaN$ -компонентов, но и увеличить выход годных, а также снизить себестоимость их производства. Университеты и стартапы скандинавских стран Европы давно и успешно работают в этом направлении. Одним из них является Hexagem – шведский стартап, выделившийся из Лундского университета в 2015 г. и получивший финансирование от европейских и шведских инвесторов. Компания использует свою запатентованную технологию коалесценции  $GaN$  для снижения плотности дефектов и получения толстых слоев  $GaN$  на кремнии, что необходимо для создания вертикальных устройств с напряжением 1200 В в энергетических приложениях.

Основная инновация Hexagem заключается в уникальном подходе к выращиванию пластин  $GaN$ -on- $Si$  [39]. Традиционный рост  $GaN$  на кремнии часто сталкивается с проблемами из-за несоответствия решетки и различий в коэффициентах теплового расширения, что приводит к накоплению дефектов. Запатентованная Hexagem технология  $GaN$ -on- $Si$  значительно уменьшает кристаллические дефекты, снижая плотность дислокаций по сравнению с отраслевым стандартом в  $100\text{ млн}/\text{см}^2$  всего до  $10\text{ млн}/\text{см}^2$ . Их процесс полностью совместим со стандартным производством полупроводников и решает давние проблемы роста  $GaN$  на кремнии, а именно образование дефектов, расщекивание пластин и термическое несоответствие.

Метод включает в себя селективный эпитаксиальный рост свободных от дислокаций нанопроволок  $GaN$  на структурированном буферном слое нитрида кремния (рис. 5):

- селективный эпитаксиальный рост способствует выращиванию  $GaN$  в определенных областях с использованием субстрата, который обеспечивает заданную ориентацию кристаллов;
- нанопроволоки  $GaN$  без дислокаций: выращивание  $GaN$  в виде нанопроволок без этих дефектов улучшает его структурные и электронные качества;
- буферный слой из нитрида кремния с рисунком: этот слой находится между кремнием и  $GaN$ , помогая контролировать, где и как растет  $GaN$ . Рисунок, в основном, управляет размещением нанопроволок.

Как только эти крошечные вертикальные нанопроволоки сформированы, к их сторонам добавляется материал, увеличивающий их толщину (рост боковой стенки), что позволяет им объединяться в толстую непрерывную пленку  $GaN$  с улучшенной структурной целостностью. В результате создаются

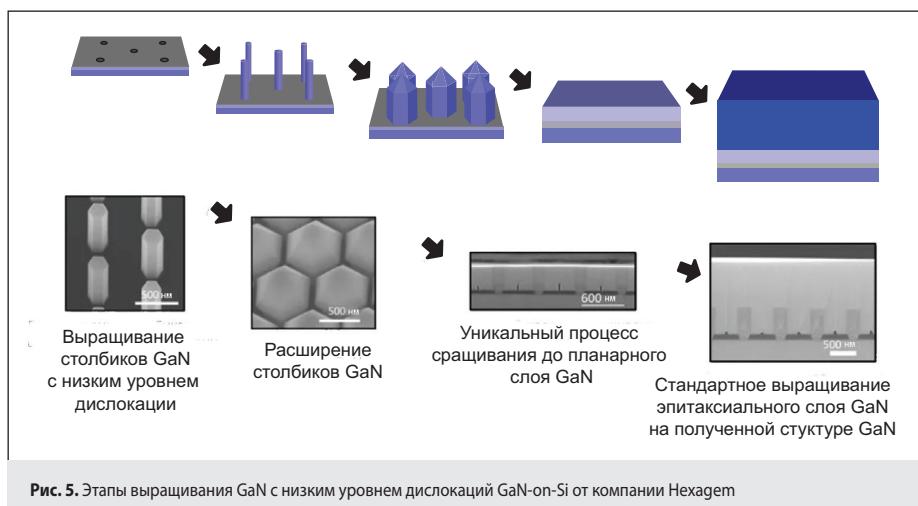


Рис. 5. Этапы выращивания GaN с низким уровнем дислокаций GaN-on-Si от компании Hexagem

слои без трещин толщиной более 10 мкм, что значительно превышает типичные для промышленности 2–4 мкм.

Материал GaN добавляется в виде паста путем осаждения из газовой фазы металлоорганического химического вещества. Во время роста боковины адсорбируемые атомы галлия диффундируют сквозь боковые стенки нанопроволоки, а азот (часто активный азот из плазмы или аммиака) вступает в реакцию с галлием с образованием GaN на боковых поверхностях. Нанопроволоки расширяются в радиальном направлении и утолщаются, пока в конечном итоге не образуют непрерывную пленку. Толщина 10 мкм имеет важное значение для устройств с вертикальными архитектурами, поскольку повышает их производительность, эффективность и плотность. Таким образом, инновации Hexagem позволяют создать альтернативу SiC в существующих высоковольтных приложениях, прокладывая путь к силовой электронике следующего поколения.

### Navitas Semiconductor переходит на модель бизнеса Fab-Lite и запускает новаторские изделия

Переход IDM-компаний к сквозной вертикальной интеграции полного цикла производства SiC-продукции повлиял и на модели бизнеса фаблесс-компаний. Navitas Semiconductor является мировым фаблесс-лидером по ШЗП-изделиям из нитрида галлия и карбида кремния. Прежде Navitas размещала заказы по производству GaN-чипов в сторонних компаниях в Техасе и на Тайване. При этом изготовление эпитаксиальных структур SiC и GaN-on-Si, а также последующее производство кристаллов на них выполнялось в разных компаниях. Navitas Semiconductor планирует воспользоваться тем фактом, что 40 заводов по производству микросхем в США, которые в настоящее время производят кремниевые чипы на устаревших 150-или 200-мм пластинах, можно модернизировать для производства

кристаллов из нитрида галлия и карбида кремния. Переход от исключительно аутсорсинга производства в Техасе и Тайване к более широкому кругу партнеров по изготовлению продукции предполагает меньшие инвестиции. К тому же, некоторые процессы могут выполняться собственными силами.

Navitas меняет бизнес-модель, переходя на стратегию «легких активов» (Fab-Lite), или использование внутреннего производства, которым станет эпитаксиальное наращивание SiC на подложке. С помощью такой стратегии компания планирует контролировать стоимость этой важной и дорогой составляющей цены чипов и приборов [40]. Ожидается, что первый эпитаксиальный реактор Aixtron G10-SiC для пластин размером 6 и 8 дюймов будет полностью квалифицирован и запущен в производство в Navitas в следующем году.

Обычно фаблесс-компании такое не практикуют. Однако Navitas не планирует приобретать и модернизировать существующие заводы производства чипов и намеревается диверсифицировать этот сервис в США и Азии. При этом сборка и тестирование будут выполняться и в Китае, и за его пределами, в первую очередь на Филиппинах, Тайване и в Таиланде.

В предыдущие годы Navitas одной из первых в мире выпустила монолитные GaN ИС с драйвером и мощным выходным транзистором в одном чипе, а теперь представила новую

технологию и продукцию – так называемые двунаправленные силовые ИС GaN [41].

Более 70% современных высоковольтных преобразователей мощности используют двухкаскадную топологию. Типовой AC/DC-преобразователь состоит из входного каскада коррекции коэффициента мощности и последующего DC/DC-каскада с громоздкими буферными конденсаторами звена постоянного тока. Системы на основе таких преобразователей достаточно велики, имеют высокие потери и стоимость. Двунаправленный GaNFast объединяет два каскада в один высокоскоростной и высокоэффективный, исключая использование конденсаторов большого размера и входных дросселей (рис. 6).

Области применения GaNFast разнообразны: бортовые зарядные устройства для электромобилей, солнечные инверторы, накопители энергии и электроприводы.

### Выводы

1. Быстрый переход мировых компаний на SiC-пластины диаметром 200 мм и на 200–300-мм GaN-пластины стал не только главным способом снижения себестоимости производства, цены и способствующим росту потребности в этой продукции на мировом рынке, но и важным фактором конкуренции среди мировых производителей. В 2026 г. 300-мм GaN- и SiC-пластины утратят свою эксклюзивность, став привычным решением на мировом рынке.
2. Мировые производители ШЗП полагают, что бизнес-модель вертикальных IDM-компаний лучше, чем контрактная фандри- и фаблесс-модели, поскольку позволяет гибче управлять ценой продукции, тесно скоординировать производство с разработкой, применением и быстро подстраиваться под требования нового рынка и клиентов. Однако эта модель не спасла от банкротства IDM-компанию Wolfspeed, а обвал цен на пластины из карбида кремния китайскими компаниями может поставить под сомнение эти решения уже в 2026 г.
3. Onsemi первой из крупных IDM-компаний анонсирует вертикальную техноло-



Рис. 6. Двунаправленный переключатель GaNFast Navitas заменяет четыре кремниевых MOSFET

- гию и продукцию GaN-on-GaN для создания высоковольтных приборов свыше 1200 В с широким спектром применения, но не называет конкретных сроков вывода этой продукции на рынок и их экономических показателей.
4. Технология GaN-on-QST стремительно эволюционирует, являясь наиболее перспективной и универсальной среди промышленно осваиваемых GaN-техпроцессов на пластинах диаметром 200–300 мм. Ее освоение может нивелировать преимущества вертикальных IDM-компаний, работающих по сквозному циклу производства, и обеспечить хорошие перспективы фаблесс-компаниям, не отягощенным большими расходами на собственное производство пластин и чипов.
5. Продолжается эволюция по созданию новых ШЗП- и СШЗП-материалов, позволяющих улучшить статические, динамические, температурные параметры изделий и создать новые сферы их применения.
6. Высокая теплопроводность карбида кремния и композитов на его основе открывает новые области применения для корпусов полупроводников, интерпазеров и систем охлаждения ЦОД, искусственного интеллекта. Еще один широкозонный полупроводник – монокристаллический арсенид бора – имеет рекордную теплопроводность, превышающую алмаз, обещая открытие новой эпохи теплопроводящих материалов.
7. Инновационные методы и технологии снижения структурной дефектности пластин ШЗП большего диаметра позволяют увеличить выход годных, повысить качество пластин и снизить цены приборов на основе ШЗП.

*В Части 3 этой статьи рассматриваются итоги развития мирового полупроводникового рынка в 2025 г. по основным типам продукции, особенности развития мировых регионов и возможность достижения ими самообеспечения.*

## Литература

1. Боднарь Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2025 г. Часть 2.1. Китай обваливает мировые цены широкозонных полупроводников, приводит лидеров рынка к банкротству и вынуждает их менять стратегии развития. Электронные компоненты. 2025. №11.
2. TSMC to Phase out Its Gallium Nitride Business. The Taipei Times. July 04. 2025 // [www.taipeitimes.com](http://www.taipeitimes.com).
3. Infineon Advances on 300-Millimeter GaN Manufacturing Roadmap as Leading Integrated Device Manufacturer (IDM). Infineon Technologies AG. July 02. 2025 // [www.infineon.com](http://www.infineon.com).
4. 8-inch GaN-on-Si Process Technology. Innoscience // [www.innoscience.com](http://www.innoscience.com).
5. Gallium Nitride (GaN) Power Discretes. Renesas // [www.renesas.com](http://www.renesas.com).
6. Gallium nitride (GaN) power stages. Texas Instruments // [www.ti.com](http://www.ti.com).
7. Nexperia Manufacturing Locations. Nexperia // [www.nexperia.com](http://www.nexperia.com).
8. X-FAB Expands GaN-on-Si Foundry Services with dMode Technology for High-Power Applications. Power Electronics News. September 2. 2025 // [www.powerelectronicsnews.com](http://www.powerelectronicsnews.com).
9. Polar Signs Agreement with Renesas to License GaN-on-Si Technology and Onshore Commercial Fabrication of Advanced Devices on 200mm Wafers. Polar Semiconductor. April 16. 2025 // [www.polarsemi.com](http://www.polarsemi.com).
10. GlobalFoundries Licenses GaN Technology from TSMC to Accelerate U. S. GlobalFoundries (GF). November 10. 2025 // [www.gf.com](http://www.gf.com).
11. Flemish Semiconductor Firm BelGaN Files for Bankruptcy. Evertiq. August 02. 2024 // [www.evertiq.com](http://www.evertiq.com).
12. SICC Ushers in the 300mm Era and Leads the Way in SiC Optical Waveguide Wafers. SICC Co., Ltd. March 04. 2025 // [www.sicc.cc](http://www.sicc.cc).
13. State of the Semiconductor Industry 2024. PwC // [www.pwc.com](http://www.pwc.com).
14. Power SiC 2023 Technology Trends. Yole Group. August 2023 // [www.yolegroup.com](http://www.yolegroup.com).
15. From Lateral and Vertical GaN Power Devices to Power ICs: Present and Future. Fraunhofer Institute for Applied Solid-State Physics IAF. January 24. 2025 // [www.iaf.fraunhofer.de](http://www.iaf.fraunhofer.de).
16. Can Singapore's 8-Inch Fab Thrive Amid a Global SiC Investment Surge? Power Electronics News. August 14. 2025 // [www.powerelectronicsnews.com](http://www.powerelectronicsnews.com).
17. From 8-Inch to 12-Inch: China Unveils the World's First Fully Localized SiC Production Line. Technovedas. October 10. 2025 // [www.technovedas.com](http://www.technovedas.com).
18. Imec Launches 300 mm GaN Program to Develop Advanced Power Devices and Reduce Manufacturing Cost. Imec. October 6. 2025 // [www.imec-int.com](http://www.imec-int.com).
19. Onsemi Powering Next Leap Forward in Electrification. Introducing Vertical GaN. Onsemi. 2025 // [www.onsemi.com](http://www.onsemi.com).
20. Боднарь Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2021 г. Часть 2. SiC и GaN – основа новой силовой электроники настоящего и будущего. Электронные компоненты. 2022. №1.
21. TSMC's SiC Substrate Strategy: Scaling Thermal Performance for AI and 3D Packaging. Power Electronics News. September 17. 2025 // [www.powerelectronicsnews.com](http://www.powerelectronicsnews.com).
22. Боднарь Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2022 г. Часть 2. Широкозонные полупроводники – мировые фавориты в новых производствах и научных разработках. Электронные компоненты. 2023. №1.
23. Imec and Qromis Present High Performance p-GaN HEMTs on 200mm CTE-matched Substrates. Imec. April 6. 2018 // [www.imec-int.com](http://www.imec-int.com).
24. Imec and AIXTRON Demonstrate 200 mm GaN Epitaxy on AIX G5+ C for 1200V Applications with Breakdown in Excess of 1800V. Imec. April 29. 2021 // [www.imec-int.com](http://www.imec-int.com).
25. GaN-on-QST Technology & Products. NovaWave AG // [www.novawave-power.com](http://www.novawave-power.com).
26. 1,200-V p-GaN HEMTs on 200-mm Engineered Substrate: QST. Powerelectronicsnews. April 24. 2025 // [www.powerelectronicsnews.com](http://www.powerelectronicsnews.com).
27. Demonstration of High Voltage (>2KV) GaN-on-QST power MIS-HEMTs with the Stable Dynamic On-resistance up to 1650 V. 2023 IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia (WiPDA Asia). 27–29 August. 2023.
28. VIS 0.35  $\mu$ m 650 V GaN Process Enters Mass Production. Vanguard International Semiconductor Corporation (VIS). November 22. 2022 // [www.vis.com.tw](http://www.vis.com.tw).
29. Shin-Etsu licenses Qromis GaN technology. EENews Europe. January 23. 2020 // [www.eenewseurope.com](http://www.eenewseurope.com).
30. Shin-Etsu Chemical to Develop a QSTTM Substrate for 300-mm GaN. Shin-Etsu Chemical Co. September 03. 2024 // [www.shinetsu.co.jp](http://www.shinetsu.co.jp).
31. 200-mm HVPE GaN on QST Template. Kuma Technologies // [www.kymatech.com](http://www.kymatech.com).
32. GaN Power Electronics: Why Vanguard Is Shifting to High Gears While TSMC Recalibrates. Powerelectronicsnews. July 30. 2025 // [www.powerelectronicsnews.com](http://www.powerelectronicsnews.com).
33. Боднарь Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2024 г. Часть 3. Сверхширокозонные полупроводники как новый класс и этап развития полупроводниковых материалов и приборов. Электронные компоненты. 2024. №11.
34. Semiconductor Rivalry Rages on in High-Temperature Chips. Gallium Nitride Transistors reach 800 °C. IEEE Spectrum. August 11. 2025 // [www.spectrum.ieee.org](http://www.spectrum.ieee.org).
35. First AlN MOSFET Showcases Promises and Challenges. Power Electronics News. January 27. 2025 // [www.powerelectronicsnews.com](http://www.powerelectronicsnews.com).
36. ScAlN-based HEMTs: Challenges and Opportunities. APL Electronic Devices 1. 021507 (2025).
37. Coherent Introduces Breakthrough Diamond-Silicon Carbide Material for Next Generation Thermal Management in AI and High-Performance Computing. Coherent Corp. June 12. 2025 // [www.coherent.com](http://www.coherent.com).
38. Thermal Conductivity of Boron Arsenide above 2100 W per Meter per Kelvin at Room Temperature. Materials Today. October 10. 2025 // [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
39. Hexagem: Pioneering GaN Innovation within the Nordic Ecosystem. Power Electronics News. October 23. 2025 // [www.powerelectronicsnews.com](http://www.powerelectronicsnews.com).
40. Investor Day 2023. Navitas Semiconductor. December 12. 2023 // [www.navitassemi.com](http://www.navitassemi.com).
41. First Production-Released 650 V Bi-Directional Power ICs with Dual-Channel Isolated GaN Driver. Navitas Semiconductor // [www.navitassemi.com](http://www.navitassemi.com).