

Полупроводниковая микроэлектроника – 2025 г.

Часть 2.1. Китай обваливает мировые цены широкозонных полупроводников, приводит лидеров рынка к банкротству и вынуждает их менять стратегии развития



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

Мировой рынок широкозонных полупроводников (ШЗП) демонстрирует высокие темпы роста и перспективы. В ближайшие годы карбид кремния и нитрид галлия как представители ШЗП начнут конкурировать между собой за применение в автомобильном секторе и центрах обработки данных (ЦОД), став основными катализаторами роста рынка для нитрида галлия. Китай интенсивно осваивает и развивает этот рынок, создает жесткую ценовую конкуренцию не только по продукции на основе ШЗП, но и в сферах ее применения, в том числе в электромобилях. Резкое снижение мировых цен китайскими компаниями приводит к банкротству компании Wolfspeed – мирового лидера производства SiC-изделий, уходу компании TSMC с рынка контрактного GaN-фаундри-бизнеса, а Renesas – к отказу от развития SiC-технологии.

Мировой рынок ШЗП временно корректируется

Мировой рынок широкозонных полупроводников продолжает оставаться одним из самых динамичных в силовой электронике. Временное замедление продаж электромобилей, начавшееся в 2024 г., сдерживает спрос как на устройства, так и на пластины карбида кремния, что вызывает осторожную переоценку среди лидеров рынка. В краткосрочной перспективе ожидается влияние этого фактора на объемы выручки, что заставит компании пересмотреть стратегии капитальных и эксплуатационных расходов, включая запасы и расширение мощностей.

По прогнозу Yole Group, рынок SiC-устройств достигнет 10,3 млрд долл. к 2030 г., а среднегодовой темп роста составит 20,3% за 2024–2030 гг. (рис. 1) [1]. Несмотря на краткосрочное замедление, ожидается, что сегмент автомобилестроения и мобильности сохранит около 70% спроса на SiC-устройства

в течение следующих пяти лет. Запуск большего количества моделей электромобилей с внутренним питанием на 800 В приводит к более широкому внедрению электронных SiC-блоков, чем с моделями на 400 В, росту потребности в силовых полупроводниках на 1200 В и снижению доли изделий на 600 В (рис. 2) [2]. Кроме того, в промышленные приложения, начиная с зарядных устройств для электромобилей и заканчивая фотовольтаикой и мощными ЦОД, также все чаще интегрируют SiC-приборы. По состоянию на 2025 г. среди производителей доминирует бизнес-модель IDM, объединяющая дизайн, производство пластин и сборку в соответствии со строгими требованиями клиентов автомобильной отрасли. Поскольку внутренне управляемые мощности по производству полупроводниковых пластин становятся стратегическим приоритетом для поддержания исследований, разработок и смягчения геополитической неопределенности, передовые компании интегрируют их в свою структуру.

Yole Group прогнозирует, что сегмент силовых GaN-приборов вырастет с 260 млн долл. в 2023 г. до 2,5 млрд долл. к 2029 г. со среднегодовыми темпами роста 44%, поскольку их использование расширяется от потребительских источников питания до гибридных и электрических бортовых преобразователей OBC и DC/DC, а также ЦОД (рис. 3) [3]. По прогнозам Yole Group, к 2029 г. выручка от использования GaN в автомобильном и мобильном сегментах превысит 750 млн долл. К 2035 г. GaN-изделия также могут найти применение в инверторах электромобилей, а также в промышленном и энергетическом сегментах. Ожидается, что GaN-компоненты будут широко использоваться в электромобилях, где GaN-приборы играют важную роль в снижении системных затрат, веса, объема и потерь мощности.

Сегмент RF GaN-полупроводников вырастет с 1,1 млрд долл. в 2023 г. до 1,9 млрд долл. в 2029 г., чему будет способствовать развитие телекоммуникационной инфраструк-



Рис. 1. Рост мирового рынка SiC с 2024 по 2030 гг.

туры, спутниковой связи и многого другого. GaN-продукция выигрывает от растущего спроса на базовые станции 5G, которые требуют высокой мощности и высокой частоты. К другим областям применения относятся промышленность, радиочастотная энергетика, мобильные спутниковые системы, гражданские радары, а также контрольно-измерительные приборы.

Yole Group прогнозирует, что доля силовой ШЗП-продукции на общем мировом рынке силовой электроники к 2028 г. вырастет до 30% за счет снижения потребности и вытеснения изделий на основе кремния (рис. 4) [4].

Конкуренция SiC и GaN

Долгосрочные перспективы развития SiC не ограничиваются увеличением спроса, вызванным переходом электромобилей с напряжения 400 на 800 В. Рост предложения силовых устройств на основе SiC, обусловленный выходом на рынок новых мощностей, также позволит расширить использование этой технологии в других областях, например в мощных зарядных устройствах для электромобилей, солнечных батареях, а также в промышленных приложениях, включая электроприводы, железные дороги и ветряные турбины (рис. 5) [5].

В отличие от SiC, технология использования нитрида галлия изначально разрабатывалась для потребительских устройств, а не для автомобильных приложений. Первые приборы появились в 2010 г., создав небольшой рынок для быстрых зарядных устройств для смартфонов. Рынки потребительских приложений начали расти примерно в 2018–2019 гг., достигнув 260 млн долл. к 2023 г.

Чтобы обеспечить рост рынка GaN до многомиллиардных объемов, поставщики стремятся выйти на более дорогие рынки за рам-

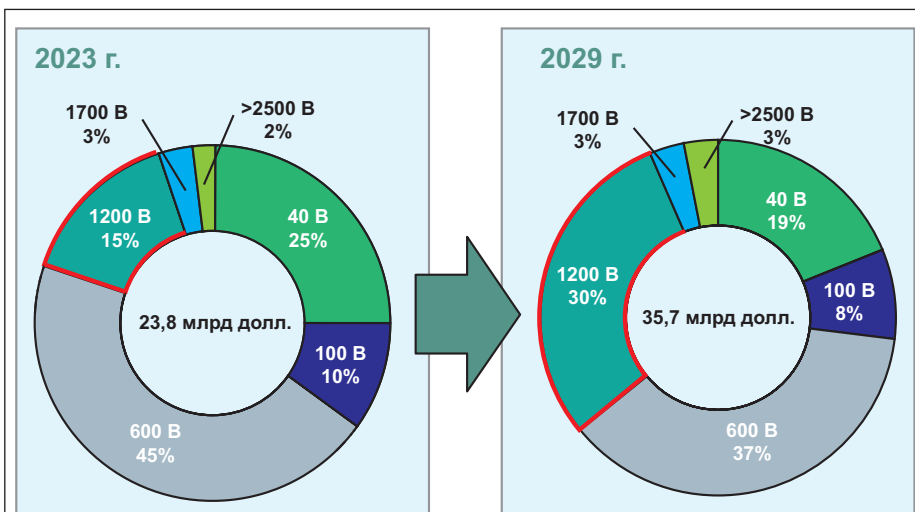


Рис. 2. Доли мирового рынка силовых электронных SiC-блоков по типам напряжения в 2023 и 2029 гг.

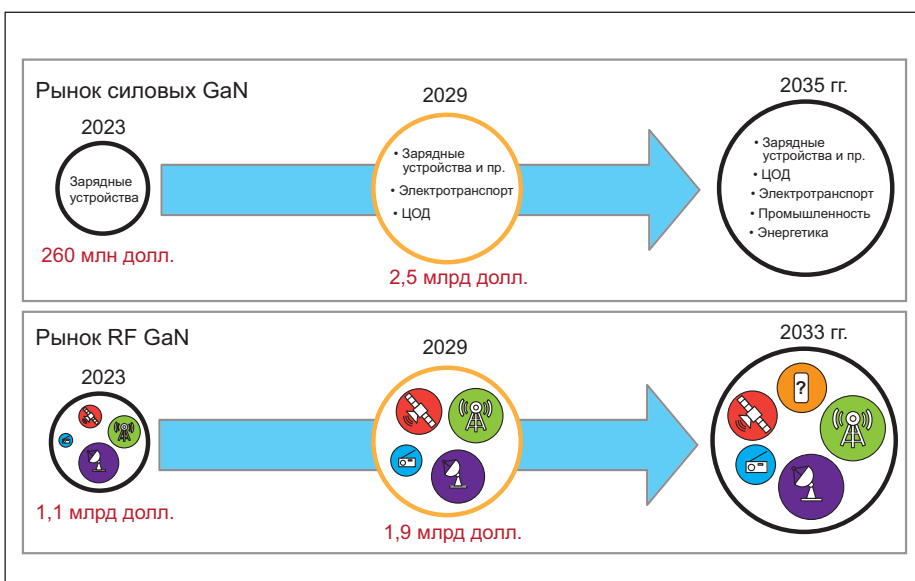


Рис. 3. Рост мирового рынка силовых GaN- и RF GaN-компонентов с 2023 по 2029 гг.

ки потребительских приложений мощностью менее 2 кВт. Эти новые возможности включают в себя мощные автомобильные и промышленные приложения.

Ожидается, что основным применением GaN-транзисторов станут бортовые зарядные устройства для электромобилей и подключаемых гибридных автомобилей мощностью менее 11 кВт [6]. Дополнительная выгода от перехода с кремниевых DC/DC-преобразователей на GaN-преобразователи не оправдывает их широкого внедрения, особенно при мощности менее 3 кВт.

GaN-транзисторам будет непросто добиться коммерческого успеха в сегменте главных инверторов с напряжением 400 В. SiC и кремний уже хорошо зарекомендовали себя, а силовые модули на основе GaN, обеспечивающие работу на уровнях мощности свыше 50 кВт, пока недоступны. Для 800-В систем GaN-транзисторы на 1200 В пока не представлены на рынке, тогда как 650-В GaN-транзисторы имеют потенциал для выхода на рынок инверторов с многоуровневой топологией питания. Исходя из всех приведенных выше соображений, не следует ожидать

начала внедрения GaN-транзисторов в главные инверторы ранее 2029 г. В настоящее время крупные производители автомобильной и промышленной техники все еще разрабатывают GaN-технологии, что обусловлено ее уникальными преимуществами, включая более высокую эффективность по сравнению с кремнием и SiC. На текущем этапе GaN, как правило, оптимизируется в диапазоне низких мощностей, а его внедрение в приложения с более высокой мощностью находится на стадии разработки. Однако ситуация может измениться в пользу GaN в сравнении с SiC для применения в высоковольтных и более мощных электронных блоках, включая автомобильные, после выхода на рынок GaN-транзисторов напряжением 1200 В и выше.

За последний год изменился взгляд на то, что станет следующим крупным применением после сегмента потребительского рынка. В связи с появлением ИИ как «следующей большой технологии» наблюдается большой интерес к использованию GaN для повышения эффективности на быстрорастущем рынке ЦОД с использованием ИИ. Каждый

графический процессор потребляет 1 кВт, что соответствует уровню мощности, который способен обеспечить GaN. Системы электропитания серверов различаются по уровню напряжения. В них используются блоки питания (БП) на 400 В переменного тока, на 400 В постоянного тока и с напряжением 48 В. Технология GaN подходит для применения во всех этих блоках. Помимо двух основных диапазонов напряжения – 650 и 400 В, которые могут использоваться с блоком питания, она также работает в меньшем диапазоне напряжения 200 В, что соответствует требованиям к 48-В шине постоянного тока ЦОД.

Одно из главных преимуществ GaN – высокая эффективность, которая повысит рентабельность ЦОД за счет снижения эксплуатационных расходов. Поскольку технология уже готова, ключевой вопрос заключается в следующем: когда крупные производители систем решат приобрести GaN в больших объемах? Поставщики устройств стремятся убедить их в том, что можно достичь паритета цен с кремниевыми устройствами, повысив при этом эффективность приложений.

Yole Group прогнозирует, что центры обработки данных станут одним из важнейших рынков для GaN. После внедрения технологии рост будет быстрым, чему способствует значительный спрос со стороны ИИ. Согласно прогнозу на 2029 г., в результате первоначальный рост рынка может составить почти 2 млрд долл. Достижимые преимущества применения GaN в ЦОД ИИ рассмотрены ниже. В долгосрочной перспективе имеется потенциал для использования GaN в промышленных приложениях, а также в автомобильной отрасли. Однако потребительские приложения по-прежнему будут играть важную роль.

Китай вынуждает мировые компании менять стратегии развития

Еще одним из подтверждений влияния мировой рыночной неопределенности и геополитической нестабильности на полупроводниковую отрасль являются проблемы у американской компании Wolfspeed. Всего пару лет назад ее относили к мировым флагманам перспективного направления разработки и производства силовых полупроводников на основе карбида кремния. Бурное развитие автотранспорта с электрическим приводом сулило компании блестящие перспективы.

Wolfspeed, которая ранее продала свой бизнес по производству светодиодов и СВЧ-приборов, чтобы сосредоточить усилия на силовой SiC-электронике, считается флагманом на быстро развивающемся рынке SiC-полупроводников. Компания стала пионером в производстве 1-, 2-, 4- и 6-дюймовых SiC-пластин, и первой компанией, открывшей фабрику по производству 8-дюймовых

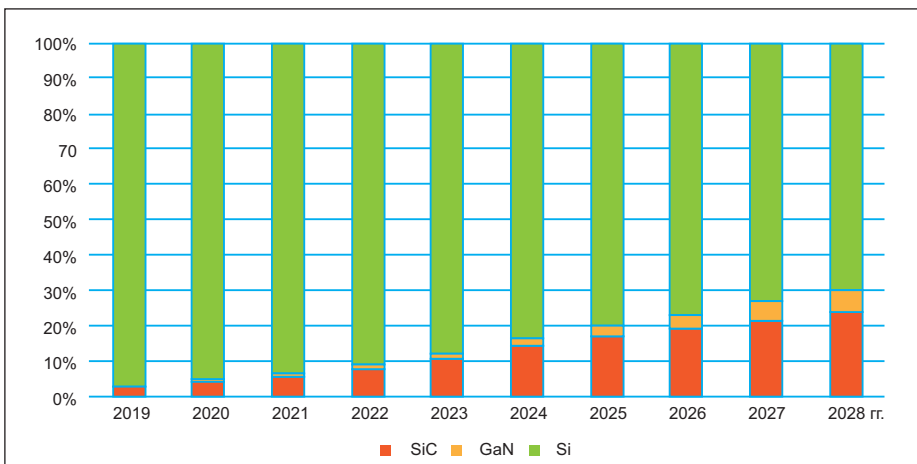


Рис. 4. Рост доли изделий на основе SiC, GaN в сравнении с изделиями на кремнии в 2019–2028 гг.

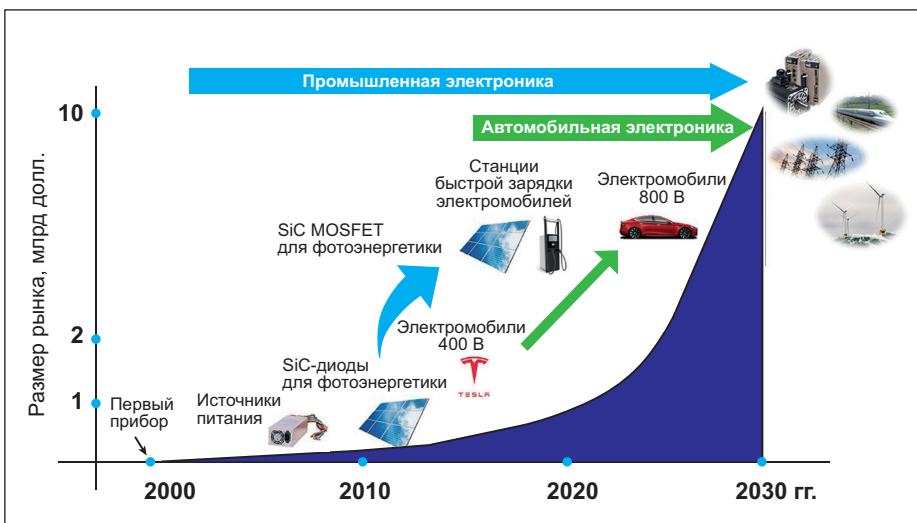


Рис. 5. Рост мирового рынка и сфер применения SiC-продукции в 2000–2030 гг.

этих пластин в США в 2022 г. Фактически, Wolfspeed в настоящее время является главной компанией, производящей SiC-чипы на 8-дюймовых пластинах в больших объемах. Wolfspeed работала по схеме вертикальной интеграции с производством по полному сквозному циклу, включающему изготовление исходных пластин, эпитаксиальное наращивание, разработку, выпуск, сборку чипов и их продажи. Компания также превратилась в главного мирового поставщика исходных пластин для мировых производителей SiC-приборов.

Новость о банкротстве Wolfspeed стала шоком в полупроводниковом мире, и на то есть несколько причин.

Первой чисто рыночной причиной является влияние Китая не только на снижение цен на электромобили, но и на мировые цены эпитаксиальных пластин и электронных приборов на основе карбида кремния, являющиеся основой для автомобилей с электрическим приводом. Китайские производители электромобилей настолько уверенно подхватили мировую тенденцию перехода с автомобилей на ДВС к электромобилям, что цены на них начали резко снижаться. Неконкурентоспособными стали не только европейские, американские и японские автомобильные гранды, но и мировой лидер – компания Tesla. Появление большого количества поддерживаемых государством китайских поставщиков SiC-подложек привело к значительному расширению мощностей и снижению цен на 30% в 2024 г. Бизнес Wolfspeed по производству подложек из карбида кремния служил главным источником доходов. Исследование TrendForce показало, что в 2024 г. Wolfspeed занимала в этом сегменте 1-е место с долей 33,7% на мировом рынке, но китайские конкуренты TanKeBlue и SICC быстро окрепли: они захватили 17,3 и 17,1% рынка, заняли 2-е и 3-е места, соответственно, и резко снизили цены на пластины [7].

Второй причиной банкротства Wolfspeed являются ошибки компании в финансовом планировании. Прогнозы продаж оказались слишком оптимистичными, а роль Wolfspeed в мировом распределении рынка – преувеличенной. Однако это стало ясно только в результате агрессивного давления китайских производителей электромобилей, SiC-материалов и приборов. На начальной стадии план компании выглядел амбициозным и смелым. В апреле 2022 г. Wolfspeed открыла в штате Нью-Йорк первый и самый большой в мире завод по производству 200-мм SiC-пластин. В июле 2023 г. Wolfspeed заключила 10-летнее соглашение с компанией Renesas на поставку 150-и 200-мм исходных и эпитаксиальных пластин SiC. Первоначальный депозит Renesas в размере 2 млрд долл. имел цель увеличить в 10 раз производство SiC-пластин в Wolfspeed. В 2021 г. европейская компания STMicroelectronics расширила до 800 млн долл. свое соглашение с Wolfspeed на поставку 150-мм SiC-пластин. Кроме того, было

подписано соглашение о поставке пластин для Infineon. Перспективы американской компании выглядели очень впечатляюще, пока ее не приземлили китайские производители электромобилей и пластин.

Недавно компания сократила прогноз выручки на 2026 г. до 850 млн долл., что значительно ниже ожиданий аналитиков в 958,7 млн долл. [8]. Wolfspeed должна была получить финансирование в размере 750 млн долл. в соответствии с «Законом о чипах». Однако выплата была отложена из-за административных изменений, что в еще большей степени ухудшило финансовое положение компании. Акции Wolfspeed резко упали, потеряв более 90% своей стоимости в прошлом году, и продолжили снижаться, что отражает опасения инвесторов по поводу ее финансовой стабильности.

Третьей, политически ангажированной и не очень осведомленной в США причиной является тарифная война, затеянная Дональдом Трампом. Отмена льгот для электромобилей и повышение пошлин, которое должно было работать в обе стороны как для экспорта, так и импорта, подорвало и без того пошатнувшиеся позиции Wolfspeed как мирового поставщика пластин и SiC-приборов.

Wolfspeed имеет долг в размере около 6,5 млрд долл., включая приоритетный обеспеченный кредит в размере 1,5 млрд долл. от Apollo Global Management. Несмотря на то, что у компании имеется около 1,33 млрд долл. наличными и эквивалентами, текущая долговая нагрузка, сопровождаемая падением акций и отсутствием эффективных и быстрых способов выхода из кризиса, только усугубила ситуацию. Дополнительной проблемой является то, что японская компания Renesas, являющаяся основным заказчиком пластин, отказалась от своих планов, заодно распустив команду специалистов, которой предстояло заниматься выпуском SiC-решений на предприятии в Такасаки. Это значит, что Wolfspeed лишается главного долгосрочного покупателя пластин в лице Renesas, задолженность перед которой составляет 2,062 млрд долл. Проблема задолженности была частично решена достигнутым между двумя компаниями соглашением о реструктуризации, согласно которому Renesas получит обыкновенные акции, эквивалентные 38,7% выпущенных акций Wolfspeed [10].

Поданное компанией заявление о банкротстве не означает прекращение ее деятельности. Очевидно, изменится структура соб-

ственности и управления компании, и она будет поглощена кредиторами. Однако ее история в очередной раз демонстрирует, как амбициозные рыночные планы в условиях геополитической неопределенности очень быстро разрушают фундамент стабильности даже флагманов перспективной продукции. В конце сентября Wolfspeed заявила, что успешно завершила процесс финансовой реструктуризации, сократила общий долг примерно на 70%, срок погашения был продлен до 2030 г. В заявлении также сообщается, что компания поддерживает ликвидность на уровне, которого достаточно для продолжения поставок клиентам SiC-продукции [11].

Резкое увеличение присутствия Китая на рынке силовых широкозонных полупроводников начинает ощущаться и заметно влиять на цены еще в одном сегменте материалов и приборов на основе нитрида галлия. В отличие от мировых компаний других стран, Китай не стал ускоренно профилировать производство пластин диаметром 100 мм и приборов на их основе – в этой сфере использовались мировые достижения для развития технологии на 150-и особенно 200-мм пластинах. В результате цены упали. Многие компании оказались не готовы к этому, что затронуло интересы даже глобального мирового производителя – компании TSMC. Тайваньский гигант с 2015 г. был одним из главных мировых контрактных производителей чипов по технологии GaN-on-Si на 150-мм пластинах. В июле TSMC выступила с заявлением о постепенном выходе из этого бизнеса в течение двух лет. Это шокирующее для многих заявление будет иметь последствия для данного сегмента рынка. Имеется несколько причин, объясняющих такое решение TSMC.

Азиатские СМИ сразу сообщили, что ключевым фактором является жесткая ценовая конкуренция со стороны китайских производителей электромобилей и электронных компонентов.

С точки зрения TSMC, доходность GaN-бизнеса относительно мала. Несмотря на рост рынка, GaN-технологии силовой электроники не являются главным направлением деятельности компании, в отличие от нанометровых технологий сверхбольших интегральных микросхем. Очевидно, компания считает, что конкуренция со стороны китайских компаний и относительно небольшой размер рынка перевесят потенциал роста GaN.

В то время как TSMC продолжает производить чипы GaN на 150-мм линиях, отрасль быстро переходит на 200-мм пластины, что снижает стратегическую перспективу TSMC по производству GaN-продукции. Кроме того, некоторые IDM-компании переходят на 300-мм GaN-пластины. В частности, Infineon Technologies заявила, что ее клиенты получают образцы GaN-изделий, изготов-

ленных на основе 300-мм пластин, уже в IV кв. 2025 г. Переход TSMC на использование пластин диаметром 200 и 300 мм и модернизация линии потребуют дополнительных капитальных затрат, а они в настоящее время направляются на строительство новых фабрик в США, Европе, Японии и на Тайване.

Vanguard International Semiconductor Corporation (VIS) – дочерняя компания TSMC – активно развивает контрактные услуги по GaN-технологиям на пластинах большого диаметра, что мы обсудим ниже.

Многие полагают, что вертикально интегрированная модель GaN-бизнеса в настоящее время лучше контрактной модели, поскольку позволяет тесно скоординировать производство с дизайном и применением, быстро подстраиваясь под требования нового рынка. Компания TSMC учитывает это обстоятельство.

По сложившейся ситуации на мировом рынке ШЗП можно сделать несколько более глобальных выводов.

1. Китай давно перестал быть только дешевой мировой фабрикой, выпускающей нишевую продукцию по заказам компаний, размещенных на его территории и вне ее. За последние 20 лет страна приобрела самостоятельный мощный экономический, производственный и научный потенциал, позволяющий влиять на мировую экономику в самых разных отраслях. Китай является мировым лидером в области выданных патентов за последние 25 лет по развитию нанотехнологий: из 1,07 млн выданных в мире с 2000 по 2025 гг. патентов в сфере нанотехнологий на долю Китая пришлось более 464 тыс. соответствующих патентов, что составляет 43% от их общего числа. Эта величина превышает совокупный показатель США, Японии и Республики Корея [12]. Данная сфера нанотехнологий в основном охватывает такие направления, как полупроводниковые приборы, каталитическая химия, биомедицина и новые материалы. В сочетании с возможностью государственного субсидирования этих отраслей у китайских компаний имеется возможность подорвать экономические основы формирования себестоимости и цены любой, в том числе новой и перспективной продукции. Ситуация с выпуском китайских дешевых электромобилей и комплектующих для них показывает, что пострадавшими могут оказаться мировые производители целых отраслей промышленности в разных странах. Вероятно, следующим направлением, на которое распространится китайская ценовая экспансия, станет банкротство мировых полупроводниковых компаний, особенно тайваньских, выпускающих продукцию по зрелым технологиям более 22 нм. В этом направлении Китай при господдержке быстро наращивает

свои возможности и проводит агрессивную ценовую политику.

2. Тарифная политика президента США Дональда Трампа не только внесла полную неопределенность в правила и закономерности глобальной мировой экономики и отношения даже среди вчерашних союзников, но и наносит большой вред самим американским компаниям. Многие из них с началом тарифных ограничений испытывают большие проблемы даже по десятилетиями нарабатанным рынкам сбыта и поставщикам материалов. Примером служит американская компания Boeing, поставленная на грань выживания после начала тарифной войны Дональда Трампа и отказа Китая как самого крупного покупателя от закупки Boeing в пользу Airbus.
3. В [13] отмечается политическая зашоренность Дональда Трампа, его нацеленность на отмену всех решений предыдущей администрации Байдена, в том числе рациональных, предвидятся разногласия с Илоном Маском, а также проблемы у основных американских бенефициаров развития электромобилей (Tesla) и электронных компонентов на основе карбида кремния (Onsemi, Wolfspeed). Все эти события произошли быстрее, чем можно было ожидать, а с учетом противостояния между Китаем и США они не сулят американским компаниям ничего хорошего. Таким образом, на рынке следует ждать новых банкротств.
4. Неопределенность на мировом рынке в сочетании с деглобализацией, регионализацией и тарифными войнами в отдельных отраслях промышленности и среди мировых компаний приведет к намного более быстрому, глубокому и резкому провалу, чем это было прежде.

Эффективность автомобильных SiC-инверторов близка к пределу. Что дальше?

Внедрение SiC-технологии привело к заметным улучшениям по сравнению с более ранними технологиями, к которым относятся и кремниевые IGBT. Например, в электромобилях переход на SiC MOSFET повысил эффективность инвертора примерно с 94 до более чем 97,5%. В настоящее время КПД инверторов в системах на основе SiC приближается к 99%. Эти достижения позволили уменьшить размер батареи и потери энергии, что привело к более эффективным конструкциям и использованию накопленной энергии. Последние поколения SiC MOSFET позволяют еще повысить эффективность всего примерно на 0,1% даже при значительных проектных усилиях. В связи с этим возникают вопросы о том, как совершенствовать эти приборы. Специалисты Onsemi полагают, что более широкие воз-

можности теперь заключаются в оптимизации на системном уровне [14]. Повышение эффективности преобразования энергии даже на 1% обеспечит существенные преимущества при масштабном применении, позволив уменьшить энергопотребление в ЦОД или увеличить запас хода в электромобилях. Основные усилия должны быть направлены на совершенствование инверторов и двигателей на системном уровне, а эффективность инверторов можно повысить с помощью SiC JFET или их комбинации с SiC MOSFET. Другим решением на более дальнюю перспективу может стать переход с SiC на высоковольтные GaN-транзисторы по технологиям GaN-on-GaN, GaN-on-QST, когда эти технологии достигнут промышленной зрелости.

NVIDIA и ее партнеры создают новую архитектуру 800-В питания на основе GaN для ЦОД ИИ

Экспоненциальный рост рабочих нагрузок ИИ приводит к увеличению энергопотребления центров обработки данных. Традиционное распределение питания 54 В в стойке, предназначенное для стоек киловаттной мощностью, не годится для стоек мегаваттного масштаба в современных центрах искусственного интеллекта. Компания NVIDIA является лидером по переходу на инфраструктуру электропитания ЦОД с напряжением 800 В DC для поддержки ИТ-стоек мощностью 1 МВт и выше, запланированных к выпуску в 2027 г., и работает с поставщиками полупроводниковых приборов на основе кремния, карбида кремния, нитрида галлия [15]. Более 10 компаний являются участниками этого проекта: Analog Devices, Infineon, Innoscience, MPS, Navitas, Onsemi, Renesas, ROHM, STMicroelectronics, Texas Instruments.

Благодаря прямому входному напряжению 800 В вычислительные стойки могут эффективно управлять подачей питания, не полагаясь на интегрированные каскады преобразования переменного тока в постоянный. Эти стойки принимают два провода 800 В и используют DC/DC-преобразование для управления устройствами графического процессора (рис. 6). Отказ от преобразующих элементов переменного тока в постоянный на уровне стойки освобождает ценное пространство, позволяя увеличить вычислительные ресурсы, использовать конфигурации с более высокой плотностью и повысить эффективность охлаждения. По сравнению с традиционным AC/DC-преобразованием, которым требуются дополнительные модули питания, прямое входное напряжение 800 В упрощает конструкцию и повышает производительность.

Китайская компания Innoscience, один из ведущих мировых производителей GaN-продукции, заявила о стратегическом сотрудничестве с NVIDIA по внедрению

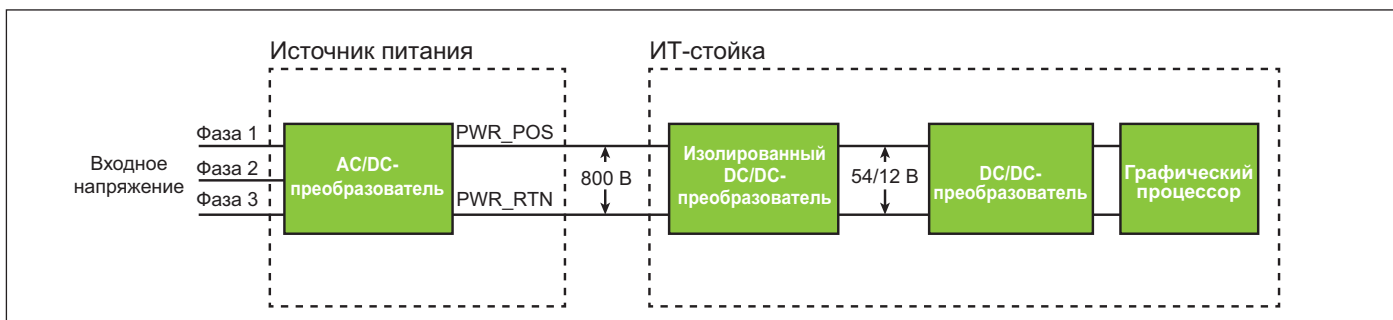


Рис. 6. Распределение питания 800 В DC в ИТ-стойках и преобразование в 12-В питание для графических процессоров ЦОД

передовой архитектуры питания 800 В DC в ЦОД с искусственным интеллектом [16]. Как и при переходе электромобилей с 400 на 800 В, повышение напряжения стоек с 48 до 800 В в ЦОД снижает ток в 16 раз, значительно сокращая потери мощности и минимизируя использование меди [17]. Устаревшие 48-В системы ИИ сталкиваются с серьезными проблемами – ограниченной эффективностью, чрезмерным потреблением меди и большими расходами на отвод тепла, превышающими 45% от общей мощности. В будущих кластерах ИИ, например в стойках с более чем 500 графическими процессорами, не останется места для вычислительных блоков, если использовать блоки питания старых конструкций. Архитектура с напряжением 800 В DC является решением, способным обеспечить переход от киловатт к мегаваттам.

Для удовлетворения требований к плотности мощности 800 В DC частота коммутации источника питания должна возрасти почти до 1 МГц, что уменьшит размеры магнитных компонентов и конденсаторов. Типовое значение частоты коммутации существующих стоечных источников питания достигает 300 кГц, а ее увеличение до 1 МГц позволяет уменьшить размер магнитного сердечника примерно на 50%.

3-е поколение GaN-приборов от Innoscience имеет решающие преимущества

1. По сравнению с SiC-приборами на стороне 800-В входа, GaN-приборы от Innoscience снижают потери драйвера на 80% и потери переключения на 50% в течение каждого полупериода коммутации, уменьшая на 10% общие потери мощности.
2. На стороне 54-В выхода требуется всего 16 устройств Inno GaN для достижения тех же потерь проводимости, что и при использовании 32 кремниевых MOSFET, что удваивает плотность мощности и сокращает потери на управляющем напряжении на 90%.
3. По сравнению с кремниевыми полевыми транзисторами в существующей архитектуре стойки, каскад преобразова-

ния мощности низкого напряжения при 800 В DC позволяет на 70% уменьшить коммутационные потери с использованием GaN-приборов и на 40% повысить выходную мощность при том же объеме (повышенная плотность мощности).

4. Низковольтный силовой каскад на основе GaN масштабируется для поддержки более мощных графических процессоров и обеспечивает лучший динамический отклик, а также снижает стоимость конденсатора на плате.

Архитектура 800 В DC имеет значительные преимущества в эффективности системы, рассеивании тепла и надежности, способствуя увеличению вычислительной мощности ИИ в 100–1000 раз, а ЦОД ИИ получают возможность скачкообразно повысить мощность с киловатт до мегаватт в ближайшие годы.

Компания Power Integrations (PI) предлагает решения и технологии PowiGaN для данной задачи. В новом документе этой компании представлены подробные сведения об этой архитектуре и конструкции стоек мегаваттного масштаба [18]. В частности, в нем описываются преимущества в производительности 1250-В PowiGaN NEMT, их надежность и способность соответствовать требованиям к плотности мощности и эффективности (>98%), предъявляемым к 800-В DC архитектурам. Кроме того, в документе показано, что одиночный PowiGaN-ключ на 1250 В обеспечивает более высокую плотность мощности и эффективность, чем многослойные 650-В транзисторы на основе GaN и конкурирующие 1200-В SiC-приборы. Интегральные схемы InnoMux 2-EP от PI могут стать решением для вспомогательных источников питания в ЦОД с напряжением 800 В DC. Коммутатор PowiGaN на 1700 В, встроенный в устройство InnoMux-2, поддерживает входное напряжение 1000 В DC, а его режим коммутации при нулевом напряжении (ZVS) обеспечивает КПД системы более 90,3% при напряжении 12 В в архитектуре с жидкостным охлаждением и безвентиляторным питанием 800 В DC. Power Integrations доказывает, что более низкий заряд и емкость GaN-компонентов на практике дают выигрыш в эффективности на высоких частотах. Добротность 1250-В PowiGaN примерно в три раза лучше, чем у 1200-В SiC MOSFET-

транзисторов с тем же $R_{DS(on)}$. SiC MOSFET не работают на частотах выше 250 кГц, а GaN-приборы могут функционировать на частотах выше 1 МГц с гораздо меньшим временем ожидания.

Очевидно, что именно GaN-устройства захватят эту сферу применения и рынок их потребления резко вырастет, стимулируя рост их производства не только для новых ЦОД, но и для модернизации уже существующих центров.

Выводы

1. Мировой рынок широкозонных полупроводников на основе SiC и GaN продолжает расти, несмотря на снижение продаж электромобилей, и в прогнозах до 2030 г. остается одним из самых динамичных среди сегментов силовой электроники.
2. Китай стремительно увеличивает производство электромобилей и электронных компонентов на основе SiC и GaN, проводит агрессивную политику по снижению цен и становится лидером производства соответствующих изделий на мировом рынке.
3. Американская компания Wolfspeed стала первой крупной жертвой ценовой экспансии Китая на мировом рынке электромобилей и ШЗП и, не выдержав конкуренции, подала заявление о банкротстве. По этой же причине японская компания Renesas отказалась от намерений организовать у себя производство силовой электроники на основе карбида кремния и закрыла проект. Компания TSMC изменила стратегию в области ШЗП и отказывается от бизнеса GaN-фаундри на пластинах диаметром 150 мм.
4. Китай давно перестал быть только дешевой мировой фабрикой, выпускающей продукцию по заказам мировых компаний. За последние 20 лет страна приобрела мощный экономический, производственный и научный потенциал, позволяющий ей влиять на мировую экономику в самых разных отраслях. В сфере ШЗП Китай способен за счет снижения цен и роста производства доводить до банкротства мировые компании и вынуждать их менять стратегию долгосрочного развития.

5. Тарифная политика Дональда Трампа пока не только не дает каких-либо ощутимых дивидендов и преимуществ компаниям США, но и приводит к ухудшению их позиций на мировом рынке, а также наносит вред самой стране.
6. Геополитическая нестабильность и турбулентность создают мировую рыночную неопределенность, которые в сочетании с мировой деглобализацией и регионализацией в отдельных отраслях промышленности приведут к намного более быстрому и глубокому провалу, чем это было прежде. Любой из них может стать катализатором нового мирового экономического кризиса.
7. Разрабатываемая новая архитектура питания напряжением 800 В постоянного тока для центров обработки данных искусственного интеллекта, планируемая к внедрению с 2027 г., способна значительно повысить их эффективность и снизить энергопотребление, высокий уровень которого ныне является большой проблемой ЦОД. Это формирует хороший рынок нового промышленного применения силовых и интегрированных GaN-устройств. ■

В Части 2.2 этой статьи рассматриваются главные тенденции мирового развития материалов, технологий и изделий на основе широкозонных полупроводников.

Литература

1. Power SiC: Market & Applications. Yole Group. May 2025 // www.yolegroup.com.
2. Status of the Power Electronic Industry 2024. Market and Technology. Yole Group 2024 // www.yolegroup.com.
3. From Power to RF: GaN's Journey to a US\$4.35B Market by 2029. Yole Group. June 2024 // www.yolegroup.com.
4. Power SiC/GaN Market Update. Yole Group. 2023 // www.yolegroup.com.
5. Power SiC – Markets and Applications 2024. Yole Group // www.yolegroup.com.
6. The Growth of Wide Bandgap Power Devices. Compound Semiconductor. March 10. 2025 // www.compoundsemiconductor.net.
7. Global SiC Substrate Revenue Declines 9% in 2024; Long-Term Demand Remains Strong as 8-Inch Roadmap Gains Momentum. TrendForce. May 12. 2025 // www.trendforce.com.
8. Wolfspeed Sees 2026 Revenue Below Estimates; Shares Slump. Reuters. May 9. 2025 // www.reuters.com.
9. Renesas Reportedly Abandons SiC Production Plan Amid Chinese Price War, Wolfspeed Uncertainty. TrendForce. June 03. 2025 // www.trendforce.com.
10. Wolfspeed Takes Proactive Step to Strengthen Financial Foundation Anticipating Scalable, Profitable Growth. Wolfspeed. June 22. 2025 // www.investor.wolfspeed.com.
11. Wolfspeed Successfully Completes Financial Restructuring, Emerges as Financially Stronger Company Well Positioned in Silicon Carbide Market. Wolfspeed Inc. September 29. 2025 // www.investor.wolfspeed.com.
12. White Paper Names China as World Leader in Nanotechnology Development. National Center for Nanoscience and Technology. September 01. 2025 // www.english.nanoctr.cas.cn.
13. Боднарь Д. Станет ли Дональд Трамп слоном в мировой полупроводниковой лавке? Электронные компоненты. 2025. №3.
14. Shifting the Innovation Focus in Power Semiconductors. Power Electronics News. August 8. 2025 // www.powerelectronicsnews.com.
15. NVIDIA 800 VDC Architecture Will Power the Next Generation of AI Factories. May 20. 2025 // www.developer.nvidia.com.
16. Innoscience Collaborating with NVIDIA on 800VDC Power Architecture for AI Data Centers. Semiconductor Today. August 1. 2025 // www.semiconductor-today.com.
17. Innoscience Supports 800 VDC Power Architecture with an All-GaN Power Solution, Enabling the AI Factories of the Future. Innoscience. October 13. 2025 // www.innosci-ence.com.
18. Power Integrations Reveals GaN Technology for NVIDIA's Next-Gen AI Data Centers. October 13. 2025 // www.powerelectronics-news.com.