

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА – 2021 г.

ЧАСТЬ 2. SiC и GaN – ОСНОВА НОВОЙ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО

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

Трансформация мирового автомобильного рынка с увеличением производства автомобилей с электрическим приводом в последние годы создала невероятный запрос на развитие в мире электронных компонентов на основе SiC- и GaN-полупроводников с широкой запрещенной зоной, без которых невозможно представить электронику современных и будущих гибридных автомобилей и электромобилей, систем связи, мобильных устройств и космической техники. Этот спрос привел к резкому росту инвестиций в разработку и освоение новых технологий для SiC- и GaN-пластин большего диаметра, чтобы сократить себестоимость производства электронных изделий и продолжить вытеснение классических кремниевых компонентов. А что происходит в России?

АВТОМОБИЛЬНЫЙ И ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЙ СЕГМЕНТЫ – ГЛАВНЫЕ ДРАЙВЕРЫ РАЗВИТИЯ SiC- И GaN-ПОЛУПРОВОДНИКОВ

С каждым годом полупроводниковые приборы на основе SiC и GaN все глубже проникают в нашу жизнь. Минувший 2021 г. позволил им сделать впечатляющий рывок и заложить основу для роста их потребления в ближайшие пять лет и далее. Основным драйвером для этого роста является автомобильный рынок, а точнее, гибридные и электрические

автомобили.

- Европейским и мировым лидером по темпам продаж и перехода к автомобилям с электрическим приводом является Норвегия. Полный отказ от продажи автомобилей с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) в Норвегии запланирован на 2025 г. Однако уже сейчас Норвегия опережает этот график. В начале осени доля продаж электромобилей на первичном рынке в Норве-

гии достигла 80%, а полный отказ от авто с ДВС может состояться уже в 2022 г. [58]. В ноябре доля продаж в стране автомобилей с гибридным- и электроприводом достигла 94,9%. В Норвегии активно строится зарядная и сервисная инфраструктура, а многочисленные налоговые льготы для граждан, покупающих электромобили, стимулируют отказ от автомобилей с ДВС.

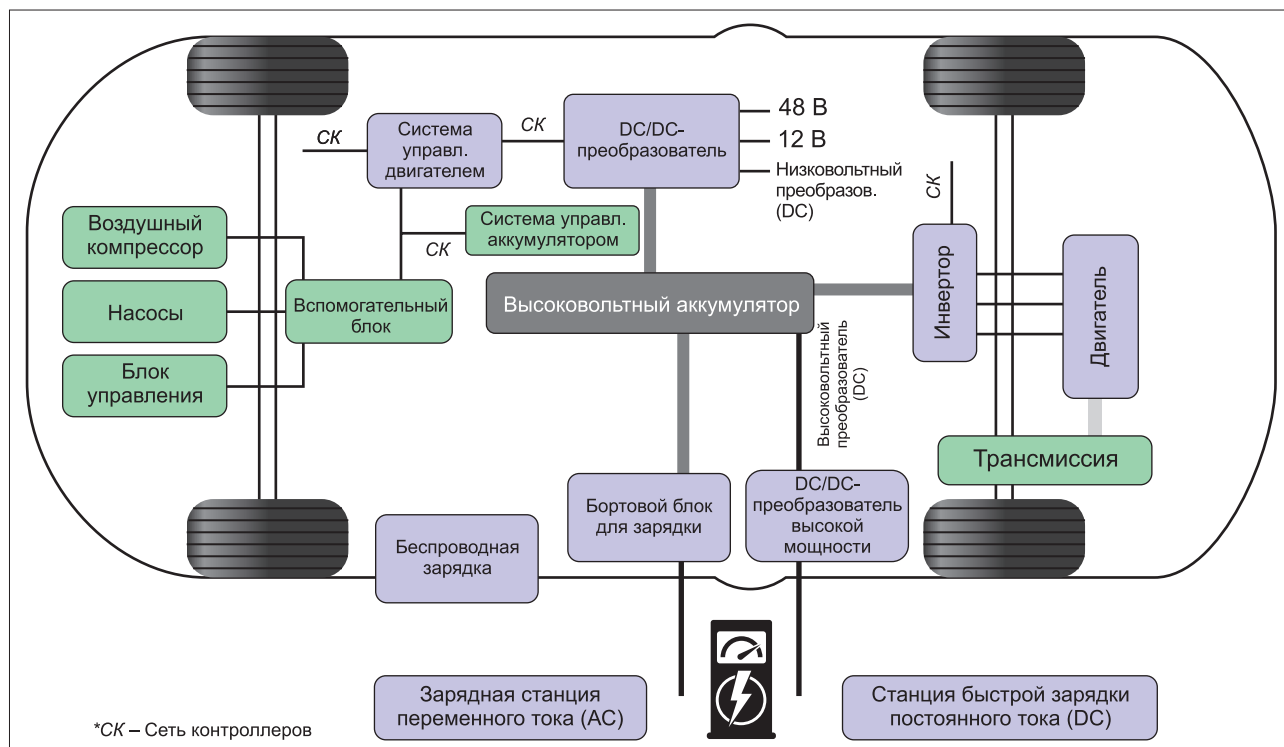


Рис. 7. Основные узлы для применения электронных компонентов на основе SiC и GaN в электромобиле

Электромобилям следующего поколения требуются силовые устройства, способные повысить эффективность автотранспортного средства (с последующим увеличением дальности действия) и скорость зарядки батареи. На рисунке 7 приведены основные узлы автомобиля, где могут применяться электронные компоненты из SiC и GaN [59]. SiC-инверторы оказались ключевым решением, отвечающим этим требованиям. Помимо преобразования входного постоянного тока в переменный, инвертор регулирует уровень подаваемой двигателю мощности в соответствии с потребностями вождения. Роль инвертора повышается с постепенным переходом автомобильного электрического транспорта с 400 на 800 В. Эффективность передачи энергии батареи двигателю у традиционного инвертора составляет 97–98%, а КПД инвертора на основе SiC достигает 99%. Заметим, что повышение эффективности на один или два десятичных знака дает очень значительные преимущества всему транспортному средству. Рисунок 8, на котором сравниваются коммутационные потери при включении Si IGBT и SiC MOSFET, подтверждает, что SiC позволяет снизить потери на 76% по сравнению с кремнием. SiC-инверторы идеально подходят для таких применений, поскольку они выдерживают высокие напряжения и температуры, позволяя уменьшить размер всех других компонентов. При использовании аккумуляторов с напряжением 800 В необходимый ток уменьшается, и можно задействовать кабели меньшего размера, что снижает затраты, вес транспортного средства и сокращает время сборки электрической системы. В итоге улучшается не только дальность, но и эффективность электромобилей. Время зарядки аккумуляторов на 800 В благодаря использованию мощных SiC DC/DC-преобразователей можно сократить до одной пятой части времени, которое требуется аккумуляторам на 400 В. Высокий КПД первых позволяет максимально увеличить количество энергии, передаваемой батареям во время зарядки при незначительных потерях мощности.

Именно сферы автомобильного применения ускорили совершенствование карбидкремниевых электронных компонентов, которое несколько притормозило в последние годы из-за их высокой стоимости, а также позволили создать хорошую рыночную основу для использования нитрида галлия. Компания YOLE прогнозирует рост мирового рынка для SiC к 2026 г. до 4 млрд долл., из которых около 60%, или более 2,5 млрд долл., придется

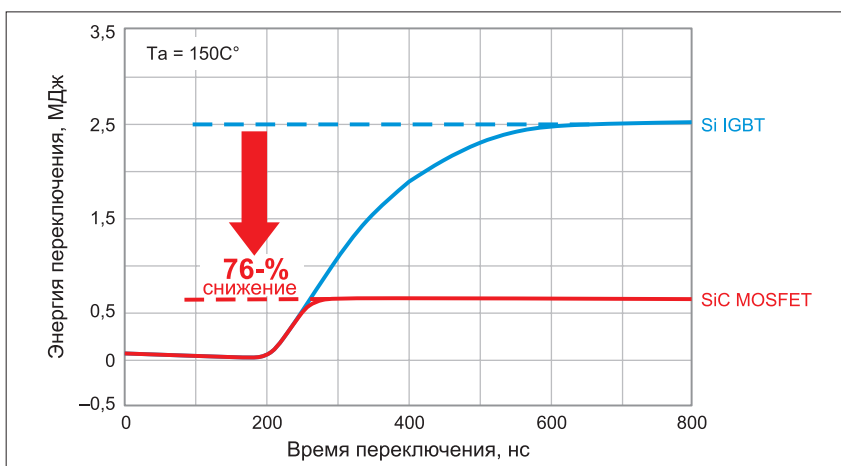


Рис. 8. Потери Si IGBT в сравнении с SiC MOSFET

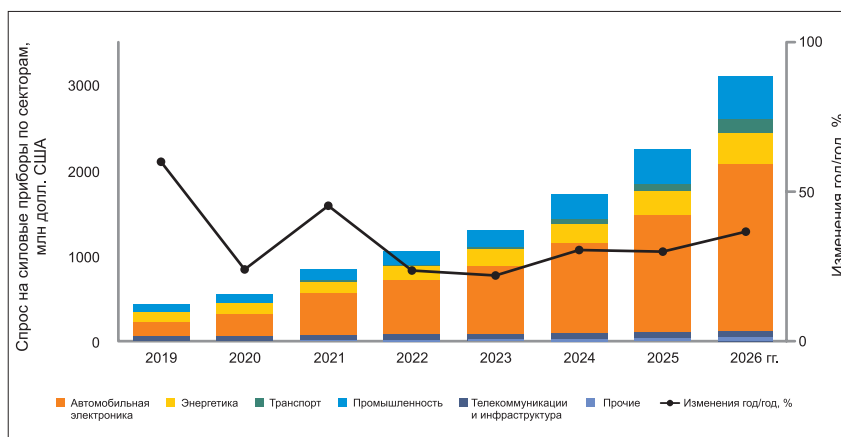


Рис. 9. Мировой рынок SiC-приборов в 2019–2026 гг. по данным от компании Yole

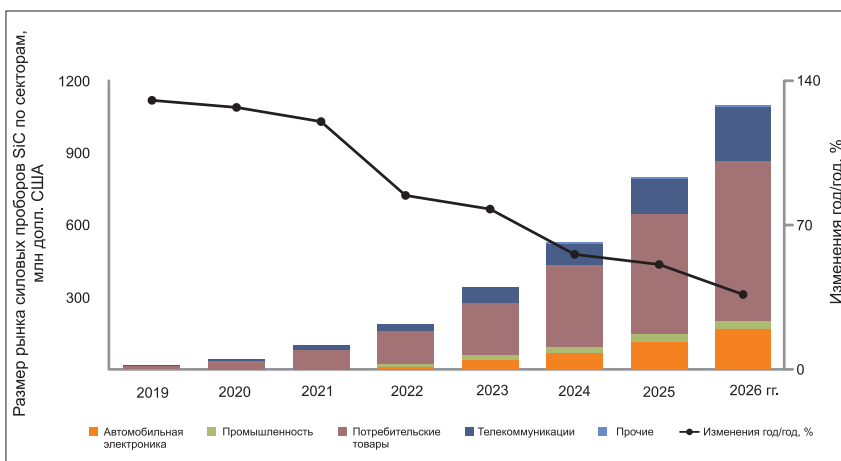


Рис. 10. Мировой рынок GaN-приборов изделий в 2019–2026 гг. по данным от компании Yole

на автомобильный рынок (см. рис. 9) [60]. Изделия на основе GaN начали развиваться на 10 лет позже, чем SiC. Их рыночные объемы достигнут 1 млрд долл. к 2026 г., а автомобильное применение станет вторым по значению после потребительского сегмента (см. рис. 10). Зарядные устройства, преобразователи напряжения, инверторы, усилители и другие устройства составляют основную сферу применения GaN-компонентов для потребительской, промышленной, транспортной, солнечной, мобильной электроники и систем связи. Системы управления

питанием, инверторы, зарядные устройства, электроприводы с использованием SiC- и GaN-полупроводников – то, без чего нельзя представить легковые и грузовые гибридные и электромобили. Нет ни одного серьезного мирового автопроизводителя, не намеревающихся в своих текущих и перспективных планах увеличить выпуск автомобилей с электрическим приводом, что подтвердили результаты 2021 г., а переход на применение электронных блоков и модулей с использованием SiC и GaN стал массовым [61].

Компания Tesla положила начало

рынку силовых устройств на основе SiC в 2017 г., став первым автопроизводителем, который использовал SiC MOSFET в своей модели 3. Полученное от STMicroelectronics устройство было интегрировано с основным инвертором собственной конструкции. Этому примеру последовали другие автопроизводители – компании Hyundai, BYD, General Motors.

Китайская компания Geely Automobile недавно заявила о сотрудничестве с японской ROHM в создании тяговых преобразователей на основе SiC для своих электромобилей, а NIO, как китайский ответ компании Tesla, также внедрит в свои автомобили систему электропривода на основе карбида кремния. В то же время автопроизводитель и производитель полупроводников BYD разрабатывают SiC-модули для всей своей линейки электромобилей. В прошлом году китайский производитель электрических автобусов Yutong сообщил, что будет использовать силовые SiC-модули производства StarPower China в силовых агрегатах автобусов. Прежде в модулях использовались SiC-устройства от Wolfspeed.

Hyundai интегрирует в свои электромобили силовой модуль Infineon на основе SiC для аккумуляторных платформ на 800 В. В Японии Toyota использует бустерные силовые SiC-модули от Denso в своих электромобилях Mirai. GM недавно подписала контракт с Wolfspeed на поставку SiC для силовой электроники электромобилей. В июне Renault и STMicroelectronics объединили усилия для разработки SiC- и GaN-устройств для электро- и гибридных автомобилей. Вскоре ожидаются новые заявления от компаний Daimler, Audi и Volkswagen. Мы перечислили некоторые новости за минувший 2021 г., а с 2022 г. эти работы станут еще более интенсивными.

Попутно решается и острый вопрос стоимости. На уровне компонентов кремниевые IGBT намного дешевле их эквивалентных изделий на SiC, и потому в ближайшее время не исчезнут из систем электропитания. Однако OEM-производители считают, что внедрение SiC-устройств с высокой плотностью мощности в конструкцию инвертора сокращает расходы на системном уровне благодаря экономии места и веса в результате использования меньшего количества компонентов.

После нескольких лет разработки компания Bosch, мировой лидер автомобильной электроники, приступила к массовому изготовлению силовых полупроводников из карбида кремния для производителей автомобилей

по всему миру [62]. «... У полупроводников из карбида кремния светлое будущее. Мы хотим стать мировым лидером в производстве SiC-чипов для электромобилей», – заявил Харальд Крёгер (Harald Kroeger), член правления Robert Bosch. Два года назад компания заявила, что продолжит разработку SiC-чипов и начнет их производство. С этой целью компания Bosch разработала собственные очень сложные производственные процессы для изготовления SiC-компонентов с начала 2021 г., которые пока будут служить в качестве образцов для проверки потребителями. По словам Крёгера списки заказов заполнены благодаря буму на электромобили. В будущем Bosch намеревается расширить свои производственные мощности по силовым SiC-полупроводникам до сотен миллионов компонентов. Имея это в виду, компания начала расширять производство на своем заводе в Ройтлингене. Параллельно ведется работа над более эффективными SiC-чипами 2-го поколения, которые должны быть готовы к серийному производству к 2022 г. Bosch получает поддержку в разработке этих инновационных производственных процессов изготовления SiC-полупроводников от Федерального министерства экономики и энергетики Германии (BMW i) в рамках программы «Важный проект микроэлектроники общих европейских интересов (IPCEI)».

Главным образом, GaN по-прежнему применяется в потребительском сегменте, в частности, в устройствах быстрой зарядки для мобильных устройств (смартфоны, планшеты, ноутбуки и т.д.). Ожидается, что в течение ближайших двух лет не менее 50% зарядных устройств в комплекте к указанным изделиям, выпускаемых OEM-производителями, будут использовать компоненты с GaN [63]. На вторичном рынке эта доля может оказаться еще выше. Рынок устройств беспроводной связи, с которого начиналось использование GaN, остается одним из основных.

В автомобильном секторе основная ниша для GaN – бортовые зарядные устройства и DC/DC-преобразователи [64]. Канадская компания GaN Systems поставляет свои устройства американскому стартапу электромобилей Canoo для бортовых зарядных устройств, а также сотрудничает с канадским поставщиком электромоторов FTEX для интеграции силовых устройств GaN на 650 В в системы для электронных скутеров. Компания GaN Systems с темпами роста в 485% заняла 266-е место в рейтинге Deloitte Technology Fast 500 самых быстрорастущих компаний Северной Америки в 2021 г. среди компаний в области технологий, теле-

коммуникаций, биологических наук, финансовых технологий и энергетики. Она также заняла 1-е место в Северной Америке по темпам роста в полупроводниковом секторе [65].

GaN Systems заявила о новом раунде финансирования и роста капитала в размере 150 млн долл. для ускорения инноваций и внедрения GaN-технологии в автомобильных, потребительских, промышленных и корпоративных сегментах [66]. Этот раунд возглавила компания Fidelity. К ней присоединились стратегические инвесторы, в т.ч. производитель силовых агрегатов Vitesco Technologies, а также BMW i Ventures. GaN Systems сообщает в пресс-релизе, что будет использовать инвестиции для быстрого проникновения GaN на рынок по мере перехода глобальных компаний силовой электроники с устаревших кремниевых устройств на небольшие недорогие и эффективные системы электропитания. Vitesco Technologies, являющаяся ведущим стратегическим партнером в этом раунде, заявила о широком стратегическом партнерстве с GaN Systems, чтобы реализовать GaN-решения на платформе электромобилей. Стратегическое партнерство последовало за недавним объявлением о стратегическом соглашении GaN Systems с BMW на 100 млн долл. на поставку силовых устройств на основе GaN для ее электромобилей:

«Мы стоим особняком среди конкурентов, поставляющих в настоящее время продукцию клиентам в автомобильной, потребительской, промышленной отраслях и ЦОД, как единственная компания, которая выпускает силовые GaN-транзисторы. Наши отношения с лидерами отрасли и портфель инвестиций в 8 млрд долл. свидетельствуют о том, что мы прошли точку перехода на GaN-технологии и настало время ускорить инвестиции в этот бизнес», – заявил Джим Уитхэм (Jim Witham), генеральный директор GaN Systems. В марте 2021 г. он также заявил, что компания поставила клиентам 20-миллионный GaN-транзистор, а емкость заказов в 2021 г. выросла в 40 раз. Это привело к тому, что цена на маломощные GaN-транзисторы при больших объемах заказа упала до цены кремниевых аналогов ниже 1 долл. и цены будут снижаться и далее [67].

Американская компания Transphorm объединилась с поставщиком автомобилей Marelli, чтобы предоставить устройства для бортовой зарядки и DC/DC-преобразования.

Компании Infineon и Panasonic подписали соглашение о разработке 2-го поколения Gen2 650-V GaN-на-Si HEMT-транзисторов на пластинах диаметром

200 мм [68]. Как и совместно разработанные устройства Gen1 (известные как CoolGaN от Infineon и X-GaN от Panasonic), 2-е поколение будет основано на транзисторной структуре GaN-на-Si с нормально выключенным состоянием. Устройства упростят использование и повысят соотношение цена/качество, в частности, приложений с импульсными источниками питания высокой и малой мощности, с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) и электроприводных систем. Ожидается, что новая технология в сочетании с надежной структурой транзистора с инжекцией затвора со встроенным гибридным стоком (HD-GIT) сделает эти компоненты одними из самых надежных в долгосрочной перспективе. Вывод на рынок новых 650-В GaN-приборов Gen2 запланирован на первую половину 2023 г.

Ожидается, что STMicroelectronics будет поставлять Renault свои устройства, которые еще не прошли квалификацию для электромобилей. Компания EPC, в настоящее время поставляющая низковольтные устройства на основе GaN для автомобильной промышленности, работает с французской компанией Brightloop над созданием преобразователей питания для внедорожных и коммерческих автомобилей.

Компания STMicroelectronics представила 3-е поколение SiC MOSFET Gen 3 STPOWER [69] с расширенным диапазоном напряжения 650–1700 В с использованием одной из самых передовых технологических платформ, обладающей превосходными коммутационными характеристиками в сочетании с очень низким сопротивлением с открытым каналом из расчета на единицу площади.

Основными особенностями SiC MOSFET STPOWER являются:

- устройства автомобильного класса (AG);
- возможность работы при очень высоких температурах ($T_{jmax} = 200^{\circ}\text{C}$);
- очень высокая частота коммутации и очень малые коммутационные потери;
- низкое сопротивление в открытом состоянии;
- управление затвором совместимо с существующими ИС;
- очень быстрый и надежный внутренний диод.

По утверждению руководства ST, компания намерена довести продажи SiC-приборов в 2024 г. до 1 млрд долл. [70].

Нитрид-галлиевые электронные компоненты крайне перспективны для военного и космического применения. Полевые транзисторы на основе GaN благодаря своей природной радиационной стойкости, замечательной

устойчивости к гамма-излучению, воздействию одиночных импульсов (SEE) и высокой энергоэффективности уже доказали свои преимущества в системах, работающих в условиях глубокого космоса. Наступило время для создания интегрированных решений с использованием GaN для повышения энергоэффективности. Американская компания Cobham Advanced Electronic Solutions (CAES) недавно представила первый в отрасли одноступенчатый изолированный радиационно-стойкий DC/DC-преобразователь на основе GaN для полезной нагрузки спутников с высокой пропускной способностью. Новое семейство изделий серии SCD51028XXX включает в себя самые эффективные в отрасли модули преобразования энергии [71].

В этом новом одноступенчатом изолированном преобразователе на основе GaN напряжение питания 28-В шины преобразуется непосредственно в точке нагрузки, что исключает использование нескольких каскадов, понижающих напряжение до 0,8 В. В отличие от двухкаскадных преобразователей, общий КПД которых обычно составляет 80%, одноступенчатый преобразователь CAES использует преимущества GaN-технологии, повышая КПД до 90% не только при полной, но и при 50-% нагрузке. Эти преобразователи с малыми массогабаритными показателями способны работать в параллельном режиме с токами выше 50 А из расчета на каждый преобразователь, не испытывая трудностей с терморегулированием в условиях низких и высоких космических орбит. Следующим этапом совершенствования преобразователей CAES станет серия с более высоким напряжением питания 100 В, что соответствует запросам космической отрасли.

В прошлом году компания Texas Instruments также провела квалификацию своих 650-В GaN-приборов для автомобильных приложений. В феврале 2020 г. компания Nexperia разработала конструкцию инвертора электромобиля на основе GaN. Израильская компания VisiC Technologies в партнерстве с немецким поставщиком автомобилей ZF разработала компоненты на основе GaN для приводов на 400 В.

Все эти примеры убедительно свидетельствуют о том, что OEM-производители серьезно относятся к электронике на основе полупроводников с широкой запрещенной зоной и перспективам GaN-технологии. Дополнительным подтверждением этого являются продолжившиеся в минувшем году покупки крупными компаниями разработчиков электронных компонентов на основе GaN и SiC и произво-

дителей самих материалов. В феврале компания Renesas сообщила о приобретении британского разработчика GaN-электроники Dialog Semiconductor за 4,9 млрд евро. В августе эта сделка была завершена [72]. В это же время третий по размерам в Южной Корее холдинг SK Holdings приобрел за 24 млн долл. 33,6% акций южнокорейского разработчика силовых SiC-изделий Yes Power Technix [73], а в ноябре крупный американский производитель СВЧ-изделий Qorvo анонсировал покупку американского разработчика силовых SiC-приборов UnitedSiC [74]. Заметим, что для SK Holdings и Qorvo профиль приобретенных компаний является новым направлением в каталоге продукции. Крупнейший мировой полупроводниковый производитель OnSemi в августе анонсировал приобретение за 415 млн долл. компании GT Advanced Technologies (GTAT) – производителя карбида кремния для пластин диаметром 150 и 200 мм [75].

Приведенные примеры союзов полупроводниковых компаний с производителями автомобильных устройств с финансированием последними исследований, разработки, промышленного выпуска электронной продукции наглядно демонстрируют ее перспективу и гарантируют рост применения. Следует также учесть, что если в автомобиле с ДВС применяются примерно 300 полупроводниковых изделий, то в электромобиле – 3000, т.е. в 10 раз больше [76]. И это одна из самых динамичных сфер использования полупроводниковых компонентов всех типов.

Выпуск электромобилей стал настолько привлекательным в мире, а электроника в них стала настолько доминирующей, что компания Sony, которая ранее использовала электромобиль BMW для демонстрации своих оптических датчиков и мультимедийных компонентов, в начале 2022 г. заявила о планах серийного выпуска собственного электромобиля, создав с этой целью подразделение Sony Mobility [77].

УВЕЛИЧЕНИЕ ДИАМЕТРА SiC- И GaN-ПЛАСТИН – ОСНОВНОЙ СПОСОБ СНИЖЕНИЯ СТОИМОСТИ ЭК

Еще одним подтверждением того, что этот прогресс не замедлится, являются усилия по снижению стоимости изделий на основе SiC. Со стороны производственного процесса, одной из самых сложных проблем до сих пор был переход от 100- к 150-мм пластинам. С одной стороны, увеличение размера пластины позволяет резко снизить удельную стоимость компонентов а, с другой, создает серьезные проблемы, связанные с устранени-

ем дефектов и повышением надежности изделия. Переход SiC-пластин со 100 на 150 мм не обошелся без проблем, связанных с трудностью сохранения того же качества и выхода годных. Основная проблема при производстве SiC-компонентов связана с характеристиками материала. Из-за почти алмазоподобной твердости карбидокремниевые кристаллы требуют для роста и обработки более высокой температуры, больше энергии и больше времени. Кроме того, наиболее широко используемая кристаллическая структура 4H-SiC характеризуется высокой прозрачностью и высоким показателем преломления, что затрудняет проверку материала на наличие поверхностных дефектов, которые в дальнейшем могут повлиять на эпитаксиальный рост или выход годных. Основными дефектами, которые могут возникнуть при изготовлении SiC-подложек, являются дефекты упаковки кристаллов, микротрещины, ямки, царапины, пятна и поверхностные частицы. Эти факторы, отрицательно влияющие на характеристики SiC-приборов, чаще проявляются на пластинах диаметром 150 мм, чем на пластинах 100 мм. Поскольку SiC является очень хрупким и третьим по твердости композитным материалом в мире, при его производстве возникают сложные проблемы, связанные со временем цикла и себестоимостью.

Можно с уверенностью предсказать, что переход на 200-мм пластины повлечет за собой серьезные проблемы. Фактически, необходимо будет гарантировать такое же качество подложки при неизбежно более высокой плотности дефектов. Однако именно переход на больший диаметр пластин является главным способом снижения себестоимости полупроводниковых изделий из материалов всех типов. В последний раз это наглядно продемонстрировал GaN-на-кремнии за счет довольно

быстрого перехода на пластины диаметром 200 мм, что значительно повлияло на совершенствование изделий, выполненных по данной технологии. По этой причине передовые мировые компании вкладывают значительные инвестиции в подготовку производства для перехода на 200-мм SiC-пластины.

В июле 2021 г. компания STMicroelectronics заявила о запуске производства первых в мире 200-мм SiC-пластин для создания изделий для автомобильной и потребительской электроники [78]. Отличительной особенностью этих пластин является низкий уровень дефектности, достигнутый благодаря ноу-хау и опыту выращивания SiC-слитков в приобретенной ST в 2019 г. шведской компании Norstel. В настоящее время ST производит SiC-пластины на двух 150-мм линиях на заводах в Катании (Италия) и Анг Мо Кио (Сингапур). Это достижение является частью запланированного перехода ST на более современное и экономичное массовое производство 200-мм SiC-пластин. Переход выполняется в рамках текущего плана компании по строительству нового производства SiC-подложек и обеспечению более 40% SiC-пластин собственными силами к 2024 г. Пока же ST, будучи не в состоянии самостоятельно обеспечить свою текущую и резко возросшую потребность в SiC-пластинах диаметром 150 мм, подписывает соглашение с Cree (ныне Wolfspeed) об увеличении до 800 млн долл. стоимости контракта на поставку SiC-пластин в течение нескольких ближайших лет [79]. Cree является ведущим мировым производителем и поставщиком пластин и SiC-эпиструктур для СВЧ- и силовой электроники. В 2019 г. Cree сообщила об инвестициях в размере 1 млрд долл. в расширение производства 150-мм SiC-пластин и создание производства 200-мм подложек с целью увеличить производительность в 30 раз [80].

По последней информации, Wolfspeed начнет производство силовых SiC-полупроводников на своей новой 200-мм фабрике Mohawk Valley в Марси (шт. Нью Йорк) в начале 2022 г. [81].

Однако разворачивание и наращивание промышленного производства 200-мм SiC-пластин является технически сложным процессом и требует нескольких лет. Как заявляет издание TrendForce, в ближайшие годы поставка SiC-пластин станет самым узким местом для производства электронных компонентов для растущего автомобильного рынка. Таким образом, 150-мм SiC-пластины останутся основными для этого рынка, и потребность в них будет расти очень высокими темпами (см. рис. 11) [82]. Главным станет применение SiC-электроники для зарядных устройств на 800 В, где произойдет полная замена силовых IGBT SiC-модулями.

Французская компания Soitec, мировой лидер в производстве полупроводниковых материалов, которая владеет более чем 3500 патентами и имеет заводы, центры исследования и проектирования, офисы в Европе, Азии, США, купила компанию NOVAsiC, специализирующуюся на шлифовке, полировке и реставрации для повторного использования пластин из карбида кремния [83]. Аккумулирование мирового опыта Soitec с инновациями NOVAsiC позволит решить вопрос многократного использования дорогих SiC-пластин, что особенно важно для подложек большого диаметра.

Компания Applied Materials, флагман мирового полупроводникового машиностроения, представила два новых вида оборудования для карбидокремниевых производств, позволяющего производителям перейти на использование 200-мм пластин [84]. В системе химико-механической планаризации (CMP) Mirra Durum объединены операции полировки, контролируемого удаления материала, очистки и сушки пластин. Утверждается, что новая система позволила в 50 раз уменьшить шероховатости на поверхности готовой пластины по сравнению с механически шлифованными SiC-пластинами и в три раза снизить шероховатости по сравнению с системами пакетной CMP. Система «горячей» ионной имплантации VIISta 900 3D, рассчитанная на SiC-пластины диаметрами 150 и 200 мм, позволяет легировать полупроводниковый кристалл с минимальным повреждением кристаллической решетки, что сокращает удельное сопротивление более чем в 40 раз по сравнению с имплантацией при комнатной температуре.

Не осталась в стороне от этих тенденций и европейская компания

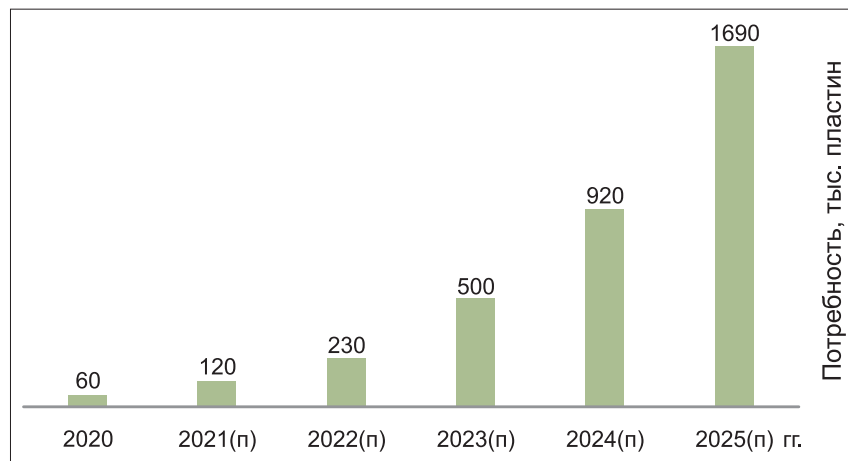


Рис. 11. Мировая потребность в 150-мм SiC-пластинах за период 2020–2025 гг.; (n) – прогноз

AIXTRON – мировой лидер в разработке и производстве оборудования для MOCVD- и CVD-осаждения компандных соединений. В рамках европейской программы «TRANSFORM – Trusted European SiC Value Chain for a Greener Economy» с привлечением 34 наиболее известных экспертов по карбидокремниевой технологии из семи стран Евросоюза запланирована разработка нескольких методов SiC-осаждения, в т. ч. на пластины диаметром 200 мм [85].

Несмотря на то, что спустя 10 лет после появления SiC-компонентов начали совершенствоваться приборы и технологии на основе GaN, карбидокремниевые изделия отстают по максимальному диаметру используемых пластин. Разработка техпроцесса многослойной GaN-эпитаксии на кремниевых пластинах диаметром 200 мм состоялась раньше, чем у изделий на карбидокремниевой подложке такого же диаметра. Это дало мощный импульс развитию силовых GaN-полупроводников. Следующим очевидным шагом должна была стать разработка техпроцесса эпитаксиального наращивания GaN на кремниевых пластинах диаметром 300 мм. В сентябре 2021 года китайская компания Enkris Semiconductor представила серию многослойных эпитаксиальных GaN-структур на кремниевых 300-мм пластинах для производства HEMT-транзисторов на 200, 650 и 1200 В [86]. По информации Enkris, у полученных эпитруктур – равномерная толщина, низкая дефектность, а деформация пластин не превышает 50 мкм. По заверению Enkris, «благодаря оптимизированному слою зародышеобразования AlN можно изготавливать HEMT-эпитруктуры на основе GaN без трещин; эти структуры удовлетворяют требованиям по току утечки на подложках кремния до 300 мм». Несмотря на проблемы, связанные с процессом эпитаксии, управ-

лением деформацией и контролем дефектов при переходе на пластины размером 300 мм, обеспечивается превосходное качество и электрические характеристики структур AlGaIn-GaN HEMT-транзисторов. Это, безусловно, будет стимулировать разработку мощных интегральных схем для создания систем-на-кристалле и дальнейшего снижения стоимости силовых устройств на основе GaN». Применение 300-мм пластин GaN-на-кремнии обеспечивает их совместимость с КМОП-технологией производства на современных производственных линиях.

Переход на пластины 300 мм позволит значительно снизить себестоимость производства GaN-изделий и их цены на рынке, что станет мощным импульсом для замены кремниевых компонентов в более широких областях применения.

Весь упомянутый комплекс инвестиций в производство изделий на основе SiC и GaN при бурно растущем рыночном спросе и для обеспечения окупаемости гарантируют их ускоренное развитие и применение в ближайшие годы.

СЛЕДУЮЩИЙ ЭТАП ЭВОЛЮЦИИ GaN – РАЗРАБОТКА И ОСВОЕНИЕ ЭК НА 1000–10000 В

В настоящее время все высоковольтные силовые приборы с рабочим напряжением выше 1000 В, создаваемые по кремниевым (MOSFET, IGBT, FRD) и SiC-технологиям, имеют вертикальную архитектуру чипов, когда электрически активная зона протекания тока направлена не вдоль поверхности (как при латеральной конструкции), а в вертикальной плоскости кристалла. При латеральной конструкции поверхностный электрический пробой является серьезной проблемой, требующей специальных методов пассивации. Кроме того, ее не удастся до конца решить при высоких напряжениях. Латеральная

конструкция транзисторов на основе GaN является основной для СВЧ- и низковольтных (до 650 В) электронных компонентов, создаваемых по этой технологии (см. рис. 12а). Таким образом, вертикальная архитектура считается основной для высоковольтных GaN-изделий. Главным преимуществом полупроводников с широкой запрещенной зоной и нитрида галлия является то, что их напряженность электрического пробоя почти на порядок превышает аналогичный параметр кремния и близка к SiC, а по возможностям достижения высоких обратных напряжений пробоя GaN даже теоретически превосходит SiC [87].

В отличие от латеральной конструкции, с которой начиналось производство вначале СВЧ, а затем и силовых HEMT до 650 В, вертикальная архитектура пока не находится на такой стадии проработки. Только несколько компаний в мире выпускает изделия с использованием вертикальной GaN-технологии. И одной из наиболее известных является американская Nexgen Power Systems с головным офисом в Калифорнии [88]. Odyssey Semiconductor, вторая компания из США, оптимистично заявляет, что с 2022 г. начнет производство транзисторов с вертикальной структурой, рассчитанных на напряжение 1200–1500 В, а в перспективе – до 10 кВ [89]. Алекс Бехфар (Alex Behfar), генеральный директор Odyssey Semiconductor, надеется на то, что «компания внесет свой вклад в диапазон частот и напряжений, недоступный для карбида кремния из-за емкости и некоторых других проблем. В ближайшее время мы предоставим устройства для промышленных двигателей и солнечных батарей. Мы намерены улучшить электронику для электромобилей за счет меньшего веса и устройств с высокой производительностью. В долгосрочной перспективе будут обеспечены такие функции как зарядка на ходу».

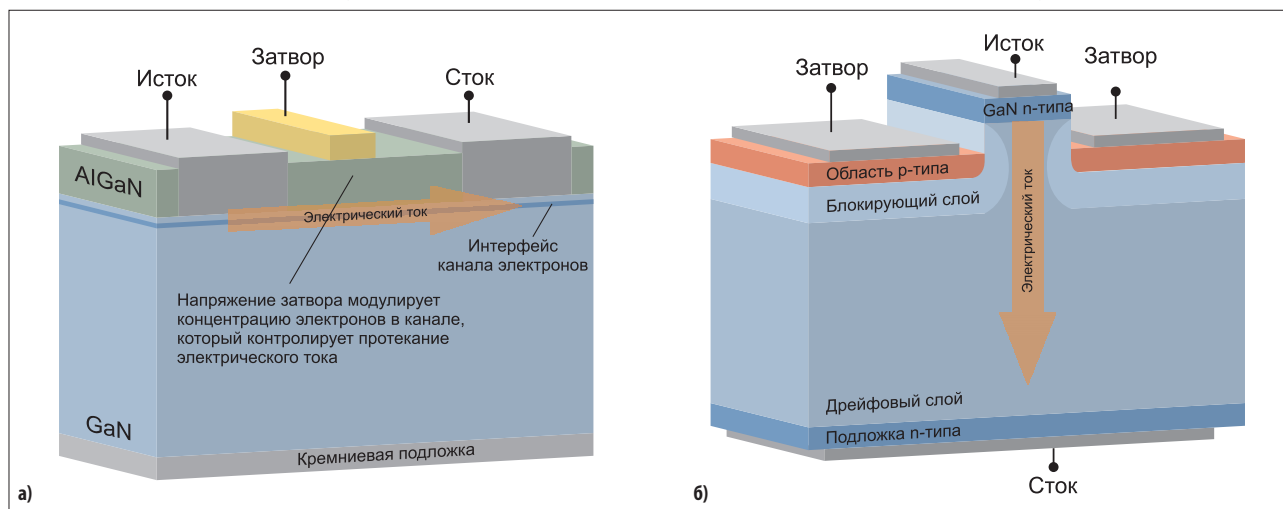


Рис. 12. а) латеральный транзистор GaN-на-Si; б) полностью вертикальный транзистор GaN-на-GaN

Существуют два технологических подхода для реализации вертикальной конструкции. В первом из них, который представляют Nexgen и Odyssey, применяется структура GaN-на-GaN, в которой подложкой служит нитрид-галлиевая пластина с нанесенным слоем GaN (см. рис. 126). За счет применения однотипного материала подложки и эпителки с максимально близкими параметрами кристаллической решетки уменьшается дефектность и внутренние напряжения в конечной структуре. Однако такая технология является более дорогой в сравнении с GaN-на-Si и пока ограничена максимальным диаметром пластин в 100 мм, в отличие от 200 мм для последней.

Во втором подходе вертикальная архитектура создается в структуре GaN-на-Si, два примера которой показаны на рисунке 13а–б [90–91]. В полностью вертикальной структуре, как и в случае с GaN-на-GaN, исток и затвор находятся на лицевой поверхности чипа, а сток – на нижней (см. рис. 13а). В квазивертикальной структуре все три контакта выведены на лицевую сторону, но контакт к стоку формируется путем травления верхнего эпитаксиального слоя и нанесения верхней металлизации на n-GaN (см. рис. 13б). Однако обе последние конструкции пока не получили окончательного технологического и промышленного завершения и еще находятся на стадии исследований и разработки. Основным их преимуществом является меньшая себестоимость

изготовления за счет уже промышленно освоенной технологии GaN-на-Si на пластинах 200 мм для низковольтных приборов и реальных перспектив перехода на пластины 300 мм. Очевидно, что между этими решениями и развернется противостояние за возможность составить конкуренцию SiC-компонентам в области напряжений до 10 кВ.

Вертикальные транзисторы имеют несколько важных преимуществ перед латеральными: они являются трехмерными устройствами; для повышения обратного напряжения толщина GaN увеличивается, а для повышения тока увеличивается площадь чипа. В латеральных транзисторах с этой целью повышаются топологические размеры для более высокого напряжения и большей площади чипа для увеличения тока. В любом случае увеличивается площадь. В конечном итоге, при равнозначном токе и обратном напряжении площадь чипов латеральных транзисторов может в несколько раз превысить площадь кристаллов с вертикальной конструкцией. Вторым важным преимуществом вертикальной архитектуры является более высокая устойчивость к вторичному пробое и скачкам напряжения. Устройства обладают эффектом самозащиты – в случае скачка напряжения на них или тока через них работа продолжается в обычном режиме. Третьим преимуществом является то, что вертикальные устройства на основе GaN предназначены для проведения тока через дрейфовый слой, который нахо-

дится внутри объема транзистора. Следовательно, не существует механизма динамического изменения сопротивления $R_{DS(ON)}$, которое создается зарядами, захваченными из-за примесей на поверхности раздела, что наблюдается в латеральных устройствах.

Однако не все разделяют оптимизм в отношении перспектив вертикальных GaN-транзисторов. В фаундрии-компаниях UMC признают, что, исходя из физических законов, вертикальные силовые устройства всегда в состоянии обеспечить более высокую выходную мощность, чем латеральные приборы. Однако объемные GaN-подложки по-прежнему дороги, а размер пластины ограничен 4 дюймами. Поскольку фаундрии-компания уже выпускают конкурентоспособные силовые устройства с использованием 6- и 8-дюймовых технологических процессов, вариант с пластинами меньшего диаметра станет шагом назад. Из-за вертикальной транспортировки носителей необходимо контролировать качество и минимизировать дефекты в эпителке и подложке, иначе надежность устройств будет низкой. Если же размер пластин является одним из определяющих факторов для контрактных производителей чипов, то проблема дефектности возникает при использовании материалов всех типов, включая Si, SiC, GaN-на-Si, GaN-на-SiC, особенно с повышением диаметра пластин. И ее течением времени решают.

Имеются и другие вопросы. «... Подложки из GaN дороже, чем подложки из SiC, а проводимость электронов в вертикальном направлении в GaN примерно такая же, как у SiC. Поперечная подвижность электронов в GaN в три раза лучше по сравнению с SiC, но подвижность в вертикальном направлении такая же. Кроме того, SiC в три раза эффективнее по теплопроводности. Эти недостатки практически не оставляют шансов для выбора GaN-компонентов с вертикальной структурой», – считает Алекс Лидоу (Alex Lidow), исполнительный директор компании EPC из США, которая является одним из мировых лидеров по силовым латеральным приборам на основе GaN-на-Si.

Однако именно на вертикальную конструкцию на основе технологии GaN-на-Si сделан упор в европейской программе YESvGaN. Евросоюз – один из главных мировых автопроизводителей, заинтересованный в производстве электронных компонентов на 600–1200 В и более для электромобилей. Важнейшая роль среди этих компаний отводится разработке и организации выпуска высоковольтных вертикальных GaN-транзисторов. В 2021 г. была принята трехлетняя программа YESvGaN по их созданию с бюджетом около 27 млн евро [92].

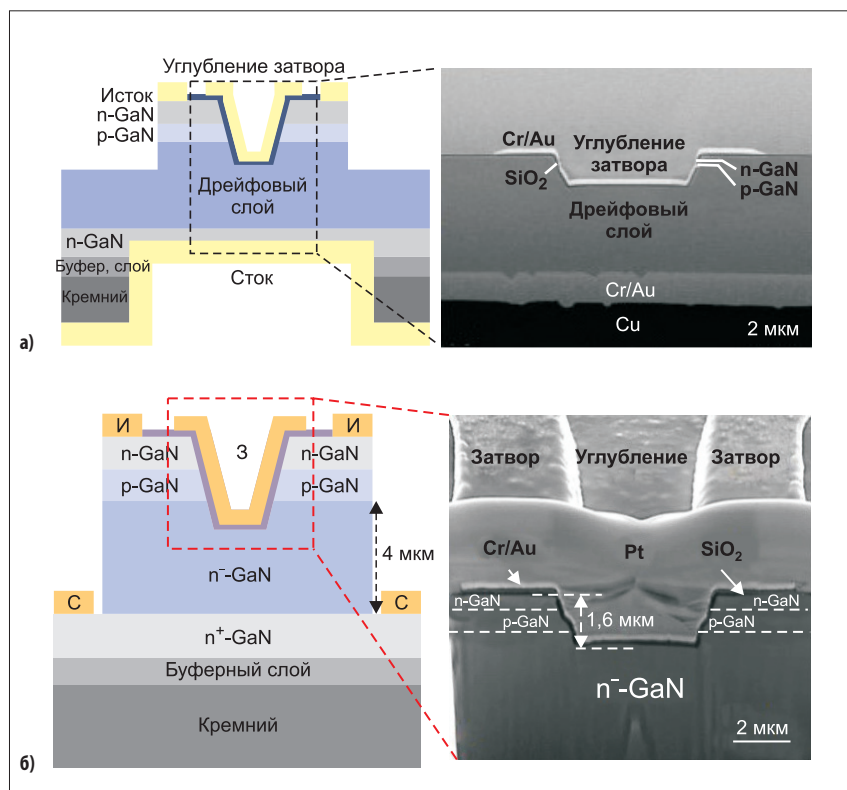


Рис. 13. а) полностью вертикальный; б) квазивертикальный MOSFET GaN-на-Si

Ее участниками стали 22 европейские компании и институты, среди которых AIXTRON, Fraunhofer, XFAB, STMicroelectronics и др. Координатором программы является ведущий производитель автоэлектроники – компания Robert Bosch.

Заметим, что в Европе уже действует программа UltimateGaN с бюджетом 48 млн евро по разработке и совершенствованию технологии GaN-изделий, координируемая крупнейшей европейской полупроводниковой компанией Infineon [93]. Это лишний раз подтверждает, насколько важным является направление GaN-электроники для европейских компаний.

Программа YESvGaN нацелена на реализацию новой технологии недорогих силовых транзисторов с широкой запрещенной зоной для создания высокоэффективных силовых электронных систем для электромобилей, промышленных приводов, ВИЭ и ЦОД. Во многих приложениях, где требуются силовые транзисторы с высоким номинальным напряжением и током (600–1200 В, 100 А), в настоящее время применяется технология кремниевых IGBT из-за их меньшей стоимости. Их КПД ниже по сравнению с решениями на полупроводниках с широкой запрещенной зоной. В рамках этой программы запланирована разработка вертикального мембранного транзистора на подложке кремния или искусственного сапфира диаметром до 300 мм с напряжением до 1200 В по цене, конкурентоспособной с кремниевыми IGBT. Энергоэффективность системы повысится за счет снижения потерь до 50% и увеличения удельной мощности до 15% в сравнении с кремниевой технологией [94]. Вертикальная мембранная архитектура сочетает в себе превосходные характеристики GaN как материала силового транзистора с преимуществами вертикальной архитектуры в отношении устойчивости по току и напряжению и по цене, конкурентоспособной в сравнении с кремниевыми IGBT. С этой целью рассматривается вся производственно-сбытовая цепочка, начиная с подложки, эпитаксии, технологического процесса, технологии межсоединений и заканчивая применением в соответствующих силовых электронных системах. Программа YESvGaN объединяет соответствующие компетенции в цепочке создания стоимости в консорциум крупных компаний, малых и средних предприятий, а также институтов из семи европейских стран.

SiC- и GaN-ЭЛЕКТРОНИКА В РОССИИ

При разработке новых направлений развития электронных компонентов,

особенно на основе новых материалов, существует несколько основных этапов их эволюции. На первом из них публикуются научные и прикладные статьи с результатами исследования новых материалов и их преимуществ для создания электроники нового класса. Такие исследования, как правило, ведутся в университетских или отраслевых центрах.

На втором этапе возникают стартапы, очень часто создаваемые на базе научных школ как в самих исследовательских центрах, так и вне их. Именно на этом этапе создаются и исследуются реальные пилотные электронные приборы, и выполняются их первичные практические испытания. Данный этап является индикатором перспективы практического применения новых изделий и технологий. Стадия, когда стартапы предоставляют свои изделия для испытаний потенциальным потребителям, является важнейшей для перспектив промышленного применения изделий. Однако интервал между этими этапами может оказаться большим, поскольку именно в это время должна быть доказана практическая ценность исследований и перспектива их применения.

На третьем этапе успешные стартапы с привлечением венчурного капитала, собственных или сторонних инвестиций приступают к мелкосерийному или промышленному производству новых изделий для формирования рынка, или это делают скупившие их компании большего размера. На данном этапе происходит расширение участников рынка не только за счет создателей, но и потребителей продукции.

На четвертом этапе, когда рыночные перспективы изделий уже подтверждены, начинаются широкомасштабные исследования, внедрение новых методов и технологий снижения себестоимости производства и цены новой продукции, а объемы производства быстро увеличиваются. Данный этап практически не прекращается никогда за все время жизни этих изделий. Именно на нем в настоящее время находится эволюция электронных изделий с широкой запрещенной зоной на основе SiC и GaN. Это начало распространения в геометрической прогрессии данной продукции на рынке. Но так происходит разработка и совершенствование электронных компонентов в мировой электронике.

В СССР за счет наличия хорошей научной школы на первом этапе мы не только составляли конкуренцию зарубежным центрам по пионерским исследованиям, но и часто опережали их. По компаундным полупроводникам для СВЧ-электроники, светодиодам

и другим изделиям так и было. Но далее возникал провал и полноценные второй и третий этапы были невозможны из-за отсутствия рыночной экономики, стартапов, венчурного капитала, а, самое главное, бюрократической волокиты при внедрении любых новшеств за исключением оружейных и космических направлений, находящихся на прямом контроле у руководства страны. В этих направлениях затраты никогда не считались. Главным был девиз: «Мы за ценой не постоим».

В других сферах после первого этапа с большим опозданием подключались к освоению изделий на основе новых материалов отраслевые НИИ, и процесс освоения переходил в затяжную фазу. Дополнительным толчком для ускорения могли быть сообщения об использовании за рубежом научных исследований наших ученых. История развития карбида кремния очень хорошо отражает различие между советским и зарубежным подходами к коммерциализации таких исследований. Именно в СССР существовали две лучшие мировые научные школы по карбиду кремния: в Ленинградском электротехническом институте (ЛЭТИ) и в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе. В ЛЭТИ под руководством профессора Юрия Таирова впервые в мире была создана ростовая технология выращивания SiC-слитков для электронной промышленности и первая полупромышленная установка [95–96]. Однако затем по окрику чиновников «сверху» работы были прекращены. Продолжил эти работы стартап, который возник в США. Он превратился в компанию Cree – настоящего мирового лидера в области производства пластин и электронных приборов на основе SiC и GaN. Второй парадокс этой истории заключается в том, что именно ученые группы Таирова из ЛЭТИ, невостребованные в своей стране, составили кадровый костяк ученых компании Cree.

В текущей российской действительности это выглядит по-другому и намного хуже. В России потеряна советская преемственность даже в том, что со скрипом выполнялось в СССР, а развал академической и отраслевой науки сделал практически невозможными пионерские исследования на первом этапе. За 30 последних лет ни один наш ученый не получил Нобелевскую премию в области естественных наук за исследование. Ученые Ж. И. Алферов, А. А. Абрикосов, В. Л. Гинзбург получили премии за исследования советского периода, а наш соотечественник К. С. Новоселов – за работы по графену за рубежом. В то же время, в России был создан прообраз венчурного капитализма в лице

компания «Роснано», задачей которого являлось быстрое освоение не только отечественных, но и зарубежных высоких технологий. Итогом работы «Роснано», которая около 15 лет получила крупное государственное финансирование и госгарантии [97], стал полный провал и финансовая несостоятельность. При этом само государство годами не замечало отчетов своей же контрольной госструктуры – Счетной палаты – о неэффективности и злоупотреблениях в корпорации. И причина даже не в том, что «Роснано» руководил «эффективный менеджер» Анатолий Чубайс, далекий от прикладной науки и промышленности. Ущербность этой идеи в том, что руководство страны, тоже далекое от практической науки, промышленности и экономики, рассчитывало (насколько искренне?) созданием единственной крупной госкорпорации без частного капитала решить проблемы освоения высоких технологий в стране. Так в мире не работают. Именно частный венчурный капитал, а не государство снижает риск неудач, которые неизбежны в таком бизнесе, и не позволяет множить убытки десятилетиями, как это происходило в «Роснано». Кроме того, в условиях рыночной экономики таких компаний должны быть десятки, а не одна, и в большинстве – частные. Так что не только «Чубайс во всем виноват», хотя он может служить хорошим примером. Подобное мы наблюдаем и в Сколковском инновационном центре, так и не ставшем за 11 лет, вопреки обещаниям властей, российской «Кремниевой долиной». Он и не мог ею стать при полном отсутствии в России спроса на инновации и приверженности сырьевой идеологии.

Еще одна поучительная история развития бизнеса на новых материалах связана с искусственным сапфиром, пластины которого являются подложками для выращивания на них GaN-эпиструктур для светодиодов. СССР в этой сфере также имел хорошую научную школу, которая начала разваливаться в конце 1980-х и в 1990-е гг. И, как и в истории с карбидом кремния, отечественные ученые и специалисты уехали в США. На их знаниях в 2000 г. появилась и выросла компания Rubicon Technology, специализировавшаяся на технологии выращивания сапфира по усовершенствованному методу Киропулоса, которая довольно быстро заняла ведущие позиции в сапфировом бизнесе [98]. Однако сильная конкуренция на мировом рынке, мировой кризис 2008–2009 гг., большие перепады цены пластин сапфира для светодиодов в 2008–2016 гг. и неспособность к конкуренции с более дешевыми азиатскими

производителями отрицательно отразились на состоянии компании. Ее капитализация к 2016 г. и в настоящее время резко снизилась [99].

Редкий пример развития производства и сапфирового бизнеса в России показала ставропольская компания «Монокристалл», входящая в концерн «Энергомера». «Монокристалл» является частной компанией. Президент и учредитель концерна Владимир Поляков показал, как можно не только вытащить из кризиса компанию, которая несколько раз находилась на грани исчезновения, но и вывести ее в мировые лидеры поставщиков искусственного сапфира для оптоэлектроники [100] путем постоянного совершенствования технологии, снижения затрат, повышения эффективности производства и менеджмента за счет грамотного руководства ею и производственным персоналом. Крайне важным, и, с точки зрения автора, определяющим являлось то, что Владимир Поляков был из плеяды «физиков», а не любимых властью и модных сейчас «лириков, эффективных экономистов и юристов», стоящих во главе госкорпораций. Он хорошо понимал, что представляют собой его продукция, производство и как повысить их эффективность. Практически вся продукция «Монокристалла» экспортируется на мировые рынки. Этот пример демонстрирует гигантскую разницу в подходах, управлении и способности к конкуренции между государственными и частными компаниями, ориентированными не на постоянное ожидание бюджетного финансирования, а на положительный результат в условиях жесткой конкуренции. В высоком уровне менеджмента «Монокристалла» и его соответствии лучшим стандартам автор статьи имел возможность убедиться лично при посещении компании.

Важнейшей особенностью полупроводниковых технологий для создания электронных компонентов на основе SiC и GaN, в отличие от суперсовременных кремниевых нанометровых технологий, являются зрелые проектные нормы топологии 0,25–0,5 мкм, отсутствие необходимости в очень дорогих технологиях, оборудовании для EUV-литографии и в соответствующих им процессах высокоточного плазменного травления. Это значит, что стоимость производственных линий для SiC- и GaN-электроники снижается более чем на порядок. Основными в данной технологии являются процессы MOCVD SiC и GaN, CVD и атомно-слоевое осаждение диэлектрических и металлических материалов, высокоэнергетическая ионная имплантация, а также высокотемпературная активация

примесей. Многие из них имеются в России, а создание или приобретение недостающего оборудования не являлись неразрешимыми проблемами, в отличие от EUV-литографии и высокоточного плазменного травления. Хотя в настоящее время, особенно после осложнения отношений с Западом, на все, что связано с технологией нитрида кремния, требуется экспортная лицензия. Таким образом, 7–10 лет назад у нашей страны была принципиальная возможность если не опередить, то достигнуть передового мирового уровня по этим технологиям и компонентам. Проблема в том, что в России нет приемлемой области применения этой продукции. Автомобилестроение, производство современного оборудования для технологий 4–5–6G, мобильной электроники и других сфер применения в нашей стране в производстве или совсем не представлены или значительно отстают от мирового уровня. Выпуск электромобилей и строительство зарядной и сервисной инфраструктуры в России находятся в зародышевом состоянии. Это значит, что отсутствуют главные заинтересованные потребители SiC- и GaN-электроники. При этом государство в лице непрофессиональных чиновников разного уровня не способно решить даже текущие, а не только перспективные технические и рыночные задачи. К тому же, власти не хотят отступать от своего главного «достижения» – сырьевой идеологии. По этой причине мы не воспользовались и китайским опытом по привлечению в Россию зарубежных компаний с их опытом и технологиями, когда это еще можно было сделать. Сами же российские полупроводниковые компании ожидают бюджетного финансирования, а при его выделении готовы максимально растянуть время разработки в ожидании очередного транша. Таким образом, в нынешней системе управления у нашей страны нет никаких шансов выйти на мировой уровень.

Электронные компоненты на основе полупроводников с широкой запрещенной зоной очень перспективны для космической и военной областей, особенно для высокотемпературной и радиационно-стойкой космической электроники. Очевидно, что это направление станет основным для некоторых отечественных предприятий. В настоящее время в России только несколько предприятий ведет работы по упомянутым полупроводникам. Брянское АО «Кремний» является единственным предприятием, ведущим практические работы по разработке и освоению технологии производства высоковольтных SiC-диодов Шоттки, а в перспективе и транзисторов на пла-

стинах диаметром 100 мм. Воронежское АО «НИИЭТ» занимается разработкой силовых и СВЧ-транзисторов по технологиям GaN-на-Si и GaN-на-SiC. НИИЭТ уже представил на рынок соответствующие изделия и является российским лидером этого направления.

Наша компания АО «Синтез Микроэлектроника» оказывает техническую поддержку обеим предприятиям, начиная с поставки эпитаксиальных структур и оборудования и заканчивая изготовлением чипов. В 2020 г. самая креативная российская полупроводниковая компания «Миландр» закрыла свой проект по организации производства SiC-электроники для отечественного автомобильного рынка из-за отсутствия достаточных перспектив этого рынка [101]. В России отсутствуют также современные технологии и производители эпитаксиальных структур SiC и GaN. Исследовательские работы по технологии GaN-на-Si также ведутся в зеленоградском АО ЗНТЦ. АО «Кремний» представило в своем каталоге силовые модули с применением зарубежных SiC-чипов MOSFET-транзисторов. Однако этого крайне мало в масштабах страны. При отсутствии отечественном рынке потребления этих изделий у предприятий практически нет шансов на создание коммерческой, рыночной и конкурентной по цене продукции. Производственные линии и технологии должны соответствовать мировому уровню, а объемы выпуска изделий составлять десятки или сотни миллионов штук. Но ничего подобного нет, и близко не предвидится. Пример «Монокристалла» отчетливо показывает, что положительный результат достигается только путем создания и продвижения на глобальный рынок конкурентной экспортно-ориентированной продукции, как это происходит во всем мире [102].

Снова будет много разговоров о том, что в мире освоена 5-нм технология, а в нашей стране только 90 нм, и необходима фабрика на 28 нм, а также гигантское финансирование. При этом необходимого и достаточного рынка потребления электронных изделий нет ни на 90, ни на 28 нм. В то же время в мире большими скачками развивается направление, в котором наша страна вела пионерские исследования. Россия могла бы стать мировым флагманом, освоив его на многих отечественных полупроводниковых предприятиях без гигантских затрат и с перспективами выхода на мировой рынок. Однако это только умозрительный вывод: на самом деле, при текущем состоянии экономики,

науки, системы управления шансов было немного. Наш удел в электронике – пытаться пешком догонять быстро уходящий электромобиль и не понимать, что через 10 лет наши топливно-сырьевые ресурсы такому транспорту не понадобятся. Несколько лет назад эти ресурсы можно было разменять на развитие и освоение технологии полупроводников с широкой запрещенной зоной, но мы этого не сделали. Теперь эти полупроводники будут постепенно обнулять транспортную востребованность нашего топливного сырья в мире. Современные электромобили развиваются гигантскими темпами, уже имеют внутреннее энергоснабжение благодаря использованию SiC- и GaN-электроники, искусственное зрение с помощью лидаров на основе GaN-полупроводников, искусственный интеллект и электронную беспилотную систему вождения, а мы, имея природные зрение и интеллект, десятилетиями не видим очевидного и блуждаем, как обреченные, по историческому кругу неудач, не в состоянии покорить ни один даже самый скромный барьер.

ВЫВОДЫ

16. Бурный рост мирового автомобильного рынка с постепенным преобладанием выпуска гибридных и электромобилей гарантирует ускоренное развитие и дальнейшее снижение стоимости полупроводниковых приборов на основе SiC и GaN.
17. Оценивая хорошие рыночные перспективы SiC- и GaN-изделий, крупные зарубежные компании продолжают увеличивать инвестиции в их производство, а также в приобретение компаний-разработчиков этих изделий и материалов, в т. ч. и для начала производства у себя новых, ранее отсутствующих в этих компаниях направлений электронных компонентов.
18. Развитие электронных компонентов на основе GaN проходит эволюцию от создания более простых силовых дискретных компонентов (транзисторы, диоды и т. д.) и управляющих микросхем (драйверов, контроллеров) к более сложным интегрированным решениям с высокой энергоэффективностью, в т. ч. для применения в жестких условиях космоса.
19. Повышение диаметра SiC-пластин до 200 мм, которое произойдет в 2022 г. несмотря на технические трудности, является главным средством, которое позволит уменьшить себестоимость и цену производства карбидокремниевых ЭК.
20. Представленные на рынок в 2021 г. первые эпитаксиальные GaN-

пластины на кремниевой подложке диаметром 300 мм с высокой однородностью и низкой дефектностью позволят в дальнейшем уменьшить себестоимость производства и цены электронных GaN-компонентов.

21. Эволюция и прогресс в промышленной разработке технологии вертикальных структур GaN-на-GaN и GaN-на-Si для активных компонентов с низкой себестоимостью в перспективе позволят создать конкуренцию не только кремниевым IGBT-, но и SiC-транзисторам, диодам в области высоких напряжений до 10 кВ.
22. Несмотря на мировое лидерство советской научной школы по карбиду кремния во времена СССР, современное состояние науки и системы управления в России при отсутствующем рынке потребления не позволяют создать в стране конкурентную на мировом рынке электронику на основе SiC- и GaN-полупроводников с широкой запрещенной зоной. ■

ЛИТЕРАТУРА

58. В ноябре доля электромобилей на первичном рынке Норвегии достигла 73,8%. 3D News. 05.12.2021//3dnews.ru.
59. SiC Technology: Challenges and Future Perspectives. Power Electronics News. October 12. 2021//www.powerelectronicsnews.com.
60. Compound Semiconductor Quarterly Market Monitor. YOLE Report. Q3 2021//www.yole.fr.
61. SiC and GaN: A Tale of Two Semiconductors. EETimes. October 19. 2021//eetimes.com.
62. Longer range as standard: Bosch gives go-ahead for volume production of silicon carbide chips. BOSCH. December 02. 2021//www.bosch-presse.de.
63. Популярность GaN-зарядок очень быстро растет – к 2025 г. они займут больше половины рынка. 3D News. 26.10.2021//www.3dnews.ru.
64. SiC and GaN: A Tale of Two Semiconductors. EETimes. October 19. 2021//www.eetimes.com.
65. GaN Systems Listed on 2021 Deloitte Technology Fast 500, the Fastest-Growing Companies in North America. GaN Systems News//gansystems.com.
66. GaN Systems raises \$150m in growth capital funding. Semiconductor Today. November 18. 2021//www.semiconductor-today.com.
67. GaN Systems' power transistor prices drop below \$1. Semiconductor Today. March 10. 2021//www.semiconductor-today.com.
68. Infineon and Panasonic accelerate GaN technology development for 650 V GaN power devices. Infineon. September 02. 2021//Infineon.com.

69. STPOWER SiC MOSFETs. STMicroelectronics/www.st.com.
70. STMicroelectronics Drives the Future of EVs and Industrial Applications with New Silicon-Carbide Devices. STMicroelectronics. December 09. 2021/www.globenewswire.com.
71. 28V GaN, Single-Stage, Isolated DC-DC Converter. CAES/caes.com.
72. Renesas Completes Acquisition of Dialog Semiconductor. Renesas. August 31. 2021/renesas.com.
73. SK Holdings acquires 33,6% in Korea's only SiC Chip Maker Yes Power Technix for \$24 mn. I-Micronews. February 04. 2021/www.i-micronews.com.
74. Qorvo Acquires United Silicon Carbide (UnitedSiC), a Leading Provider of Silicon Carbide Power Semiconductors. Qorvo. November 03. 2021/www.qorvo.com.
75. OnSemi to Acquire GT Advanced Technologies. OnSemi. August 25. 2021/www.onsemi.com.
76. Из-за дефицита полупроводниковой продукции Hyundai Motor снова пришлось остановить завод в Южной Корее. 12.09.2021/ixbt.com.
77. Sony Explores Selling EVs, Joining Tech Rush Into Red-Hot Arena. Bloomberg. January 4. 2022/www.bloomberg.com.
78. STMicroelectronics Manufactures First 200mm Silicon Carbide Wafers. STMicroelectronics. July 27. 2021/www.st.com.
79. Cree|Wolfspeed and STMicroelectronics Expand Existing 150mm Silicon Carbide Wafer Supply Agreement. Wolfspeed. August 17. 2021/www.wolfspeed.com.
80. Cree to Invest \$1 Billion to Expand SiC Capacity. Wolfspeed. May 07. 2019/www.wolfspeed.com.
81. Cree Inc. Rebrands as Wolfspeed Inc., Strikes Deal with GM. Photonics Media. October 13. 2021/www.photonics.com.
82. Annual 6-inch SiC Wafer Demand from EV Market Expected to Reach 1.69 Million Units in 2025 as 800V Charging Architecture Nears, Says TrendForce. TrendForce. December 01. 2021/www.trendforce.com.
83. Soitec acquires NOVASIC to strengthen its Silicon Carbide wafer technology. Soitec. October 2021/www.soitec.com.
84. New Applied Materials Technologies Help Leading Silicon Carbide Chipmakers Accelerate the Transition to 200 mm Wafers and Increase Chip Performance and Power Efficiency. Applied Materials. September 08. 2021/www.appliedmaterials.com.
85. EU project TRANSFORM: AIXTRON drives the green economy. AIXTRON. December 08. 2021/aixtron.com.
86. CMOS Compatible High-voltage GaN-on-Silicon HEMT reaches 300 mm. Enkris Semiconductor News. September 23. 2021/enkris.com.
87. Боднар Д. Нитрид галлия – премьер среди новых материалов полупроводниковой микроэлектроники. Компоненты и технологии. 2018. № 4.
88. Nexgen Power Systems/www.nexgenpowersystems.com.
89. Odyssey Semiconductor Presentation/www.odysseysemi.com.
90. Fully Vertical GaN-on-Si power MOSFETs. IEEE Electron Device Letters. Vol. 40. No. 3. March. 2019/www.researchgate.net.
91. 'First' quasi-vertical gallium nitride trench MOSFET on 6-inch silicon. Semiconductor TODAY Compounds & Advanced Silicon. Vol. 13. Issue 1. February 2018/www.semiconductor-today.com.
92. Vertical GaN on Silicon: Wide Band Gap Power at Silicon Cost. European Commission. November 19. 2021/cordis.europa.eu.
93. Боднар Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2020. Часть 4. Широкозонные полупроводники как главный инструмент повышения энергоэффективности электроники. Электронные компоненты. 2021. № 3.
94. Vertical GaN on Silicon: Wide Band Gap Power at Silicon Cost. YESvGaN Project/www.yesvgan.eu.
95. Рубан О. Америка доказала, что мы можем. Эксперт. № 45. 12–18 ноября. 2012.
96. SiC-электроника. Прошлое, настоящее, будущее. Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 5.
97. «Роснано» в шаге от дефолта: во всем опять виноват Чубайс? EADaily. 25 ноября. 2021/eadaily.com.
98. Rubicon Technology/www.rubicontechnology.com.
99. Rubicon Technology – Wikipedia/en.wikipedia.org/wiki/Rubicon_Technology.
100. Поляков В. О том, как стать первым на рынке сапфиров и не разориться. Harvard Business Review Россия. 22 июля. 2016/hbr-russia.ru.
101. Боднар Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2020. Часть 2. Российская микроэлектроника и ее фантомные цели. Электронные компоненты. № 1. 2021.
102. Боднар Д. Ориентация на экспорт как средство повышения конкурентоспособности отечественной электроники. Электронные компоненты. № 4. 2015.

НОВОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ

| УЧЕНЫЕ РАЗРАБОТАЛИ РЕВОЛЮЦИОННЫЙ НОВЫЙ ТРАНЗИСТОР |

Создан динамически программируемый транзистор, который в одиночку позволяет реализовать такую многокомпонентную логику как NOR, NAND и т.д. Разработанный транзистор легко вписывается в существующую инфраструктуру производства и не использует экзотические материалы. Особенный выигрыш от его использования ожидается в сфере искусственного интеллекта.

Как известно, стандартный транзистор состоит из двух электродов для токопроводящего канала и еще одного электрода для управления каналом (затвором). Управление затвором позволяет пропускать ток через транзистор или запирает его. На этом принципе базируется практически вся современная цифровая электроника. Исследователи из Венского технического университета добавили в структуру транзистора два дополнительных электрода и соединили их тончайшей нитью из чистого германия. Особые свойства германия и использование специальных программных вентильных электродов позволили создать прототип нового компонента, который может открыть новую эпоху в технологиях микросхем.

Благодаря своим электронным свойствам германий обладает эффектом отрицательного дифференциального сопротивления. Это значит, что по мере увеличения тока напряжение на определенном участке перестает расти и образуется провал. Чем больший ток подается на таком отрезке вольтамперной характеристики, тем меньше напряжение, что также можно использовать для переключения прибора (сигнала).

Этот дополнительный металл-германиевый переход (в качестве металлических электродов используется алюминий) позволяет программировать транзистор на заданные пороговые напряжения переключения состояний. Подчеркнем, этот порог можно динамически устанавливать на требуемом уровне: фактически это программирование транзистора на ряд последовательных логических операций вместо простого «включено» или «выключено».



SYNTEZ
MICROELECTRONICS

АО «Синтез Микроэлектроника»

Сервис и услуги в сфере широкозонных полупроводников (ШЗП) GaN и SiC:

- Поставка эпитаксиальных структур SiC на подложке SiC диаметром 100, 150 мм для высоковольтных диодов Шоттки и транзисторов.
- Поставка эпитаксиальных структур GaN на подложке SiC диаметром 100 мм для СВЧ-транзисторов.
- Поставка эпитаксиальных структур GaN на подложке Si диаметром 150, 200 мм для СВЧ- и силовых транзисторов.
- Поставка оборудования для производства SiC и GaN.
- Услуги фаудри за рубежом для изготовления электронных компонентов на основе ШЗП.
- Трансфер технологий на основе ШЗП.
- Поставка электронных компонентов (диодов, силовых и СВЧ-транзисторов) на основе ШЗП

г. Воронеж, Ленинский проспект, 119В, 394007
+7-473-226-60-57 (телефон/факс)
bodnar@syntezmicro.ru
www.syntezmicro.ru



АО «Синтез Микроэлектроника» — официальный представитель
компании Gallium Semiconductor в России

ПОДНИМАЯ ПЛАНКУ ТЕХНОЛОГИЙ ВЧ И СВЧ НА НОВЫЙ УРОВЕНЬ

Приверженность инновациям, упрощающим беспроводные технологии



РАЗРАБОТКА СВЧ-ПРИБОРОВ

Полный спектр квалифицированных услуг от разработки прибора до стадии его применения с получением высокоэффективных широкополосных СВЧ GaN-транзисторов



СИЛОВЫЕ СВЧ УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

Мы поставляем продвинутые модели симметричных и асимметричных усилителей мощности Догерти широкого диапазона частот



НАДЕЖНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

Тесные международные связи с компаниями полного цикла из Азии и Европы, а также выделенные специализированные линии испытаний и сборки

О КОМПАНИИ

Компания Gallium Semiconductor, располагающаяся в Сингапуре и обладающая глобальной сетью центров НИОКР, рабочих подразделений и отделов продаж, занимается разработкой и изготовлением инновационных силовых СВЧ GaN-транзисторов и усилителей мощности для применения в областях передовых технологий беспроводной связи 5G, изделиях ISM-диапазона и других сферах широкого рынка.

Мы предлагаем обширную линейку дискретных GaN-on-SiC-транзисторов с различными уровнями выходной мощности в пластмассовых и керамических корпусах, а также поставку в форме порезанных чипов.

РЕКЛАМА

КЛЮЧЕВЫЕ ИЗДЕЛИЯ



Транзисторы GaN-on-SiC HEMT

- Выходная мощность: 10–150 Вт
- Диапазон рабочих частот: DC–20 ГГц
- Напряжение питания: 28 В, 50 В
- Типы корпусов: DFN14, керамические с открытой полостью SOT, а также чипы
- Тип сигнала: импульсный, непрерывный

GALLIUMSEMI.COM

