

# Эволюция технологий и материалов силовой полупроводниковой микроэлектроники

## Часть 1. Технологии производства пластин и кристаллов

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

Технологии производства кристаллов силовых полупроводников с помощью заимствованных из СБИС современных методов фотолитографии, trench-технологий, ультратонких пластин большого диаметра и новых широкозонных материалов позволили уменьшить площадь чипов, улучшить динамические параметры, увеличить мощность и снизить потери, обеспечив значительный рост средних токов на кристалл с десятков до 300–400 А. Мировой рынок силовых полупроводников устойчиво растет, а кремний, несмотря на давление со стороны широкозонных полупроводников, остается важным и востребованным материалом для применения в силовой электронике.

### Введение

Мировая полупроводниковая микроэлектроника относится к числу самых динамично развивающихся отраслей промышленности. Ее девиз по аналогии со спортом можно охарактеризовать выражением «быстрее – меньше (мощнее) – дешевле». Слово «мощнее» относится ко всем типам продукции микроэлектроники, но, в первую очередь, характеризует именно силовую электронику. Каждый новый тип микроэлектронной продукции обязательно характеризуется одним или всеми элементами этого девиза, вследствие чего можно с немалой долей истины утверждать, что эта продукция устаревает в момент ее создания, поскольку в проектах уже предусмотрена ее модернизация по какой-либо составляющей этого девиза.

К пятерке самых распространенных полупроводниковых материалов для создания микроэлектронной продукции (табл. 1) относятся Si, SiGe, GaAs, а в последние годы к ним присоединились SiC и GaN. Если оценивать универсальность применения этих материалов в категориях СВЧ-, силовой электроники, СБИС, светодиодного освещения, MEMS-систем, солнечных элементов, радиационно-стойких ИЭТ, то в разной степени полное соответствие применимости во всех этих областях обеспечивают Si и GaN. Таким образом, GaN – самый перспективный материал не только для силовой электроники, но и для многих других категорий приборов. Заметим, что композитные материалы на основе GaN уже применяются для хранения энергии в новых революционных технологиях суперконденсаторов.

### Эволюция технологий и материалов силовых полупроводников

За последние десятилетия силовая электроника совершила стремительный рывок во всех категориях приборов, их конструкциях и технологиях. Микросхемы силовой электроники от биполяр-

ных технологий эволюционировали к КМОП, БиКМОП, а в текущем виде – к технологии BCD, интегрирующей в моночипе функции управления, датчиков контроля и силовых каскадов (табл. 2). Создание BCD-технологии обусловлено именно необходимостью включения силовых транзисторов и компонентов в состав моночипов микросхем разного функционального назначения, но преимущественно силовой электроники. Их проектные нормы снижались от 1–3 до 0,1–0,15 мкм, а в последнее время для микросхем Smart Power – до 65 и 45 нм [1–2].

Кремниевые полевые транзисторы являются главным основанием силовой полупроводниковой электроники, на котором базируются

| Таблица 1. Основные материалы полупроводниковой микроэлектроники и их применение |             |             |            |            |              |             |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|------------|------------|--------------|-------------|
| Типы изделий                                                                     |             | GaAs        | Si         | SiC        | GaN          | SiGe        |
| СВЧ                                                                              | транзисторы | + до 70 ГГц | + до 6 ГГц | + до 8 ГГц | + до 110 ГГц | + до 10 ГГц |
|                                                                                  | диоды       | +           | +          | +          | +            | +           |
|                                                                                  | ИС          | +           | +          | –          | +            | +           |
| Силовая электроника                                                              | транзисторы | –           | +          | +          | +            | –           |
|                                                                                  | диоды       | –           | +          | +          | +            | –           |
|                                                                                  | модули      | –           | +          | +          | +            | –           |
|                                                                                  | драйверы    | –           | +          | –          | +            | –           |
| СБИС                                                                             |             | –           | +          | –          | +            | +           |
| LED                                                                              |             | –           | –          | –          | +            | –           |
| MEMS                                                                             |             | –           | +          | –          | +            | –           |
| Солнечные элементы                                                               |             | +           | +          | –          | +            | –           |
| Радиационно-стойкие ИЭТ                                                          |             | +           | +          | +          | +            | +           |

Таблица 2. Эволюция технологий силовых полупроводников

| Тип продукции                     |                      | Тип технологии                                                                          |         | Проектные нормы                                            | Примечание                                                |
|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Si-микросхемы силовой электроники |                      | биполярные → КМОП, БикМОП → BCD 40–120 В                                                |         | 1–3 мкм → 0,35 мкм → 0,18 мкм → 45 нм                      | в том числе для управления IGBT-, SiC-, GaN-транзисторами |
| Si MOSFET<br>Si-диоды             |                      | Planar DMOS → Trench MOSFET → SJ MOSFET → SuperQ MOSFET<br>биполярные → Шоттки → Trench |         | 0,8 мкм → 0,6 мкм → 0,35 мкм → 0,18 мкм<br>3 мкм → 0,5 мкм | начато производство SuperQ MOSFET                         |
| Si IGBT                           |                      | Planar → NPT → Trench Field Stop → SiC IGBT                                             |         | 0,8 мкм → 0,35 мкм → 0,18 мкм → 0,13 мкм                   | SiC IGBT на стадии исследований                           |
| SiC                               | диоды транзисторы    | SiC диоды Шоттки → SiC MOSFET → SJ SiC MOSFET                                           |         | 0,8 мкм → 0,35 мкм                                         | переход к производству SJ SiC MOSFET                      |
| GaN                               | диоды транзисторы ИС | GaN-on-SiC →                                                                            |         | 0,6 мкм → 0,25 мкм → менее 0,1 мкм                         | 3DGaN FinFET – менее 100 нм, DrGaN – менее 22 нм          |
|                                   |                      | GaN-on-Si                                                                               | → QST   |                                                            |                                                           |
|                                   |                      |                                                                                         | → V GaN |                                                            |                                                           |
| Si LDMOS                          |                      | Planar → Trench LDMOS                                                                   |         | 0,6 мкм → 0,18 мкм → 0,13 мкм                              | СВЧ и силовые ИС                                          |
| Алмаз                             |                      | диоды Шоттки → MOSFET                                                                   |         | 1–3 мкм                                                    | на стадии исследований                                    |
| Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    |                      | диоды Шоттки → MOSFET                                                                   |         | 1–3 мкм                                                    | мелкосерийное производство                                |

все потребительские и промышленные схемы применения устройств силовой электроники. Существует несколько их модификаций, но самыми распространенными являются транзисторы MOSFET и IGBT с вертикальной структурой и изолированным затвором. Они прошли несколько конструктивных и технологических генераций от планарных до trench-конструкций со снижением проектных норм от 0,8–1,0 мкм до 0,35 мкм, а в самых современных конструкциях – до 0,18 мкм.

MOSFET совершенствовались от вертикальных планарных VDMOS через Trench MOSFET, Super Junction (SJ) MOSFET, а в настоящее время и SuperQ MOSFET при непрерывном улучшении всех параметров и снижении размеров чипов. IGBT-ключи компании Infineon – одного из мировых лидеров этой продукции – прошли эволюцию через восемь генераций: PT (punch-through); NPT (non-punch-through); SPT (Soft Punch Through); Trench Field Stop NPT; RC–IGBT (Reverse Conducting IGBT), или IGBT с обратной проводимостью; MPT (Micro Pattern Trench) [3]. Эта эволюция сопровождалась постоянным снижением размера и толщины чипов, увеличением обратного напряжения и средних рабочих токов, а также снижением статических и динамических потерь.

Кремниевые диоды Шоттки переходят от планарной к Trench-конструкции с проектными нормами 0,5 мкм при одновременном снижении площади чипов, прямого падения напряжения и повышении средних рабочих токов, то есть плотность мощности чипов возросла на единицу площади [4–5].

Из категории широкозонных полупроводников (ШЗП) первыми были запущены в производство в 2001 г. SiC-диоды Шоттки [6], длительное время слабо проникающие на рынок из-за высокой стоимости. GaN долгое время рассматривался как главный материал светодиодной оптоэлектроники, пока в 2009 г. не были представлены первые коммерческие GaN-транзисторы с режимом обогащения на кремниевой подложке [7]. До этого в 2005 г. японская компания Nitronex представила первый СВЧ-транзистор GaN-на-Si [8]. Однако коммерческие перспективы GaN для силовой электроники открылись после реализации процесса многослойной эпитаксии GaN на кремниевой подложке диаметром 150 и 200 мм [9]. Важной вехой стала разработка в 2015 г. силовых ИС на основе GaN с интеграцией в одном чипе полевого транзистора, схемы управления и ее защиты. Производство коммерческих силовых ИС на основе GaN началось в 2018 г. [10]. Одним из самых важных этапов в развитии приборов на основе SiC и GaN стала разработка и начало промышленного производства автомобилей с электрическим приводом, где эти изделия за счет отличных электрических и динамических параметров стали главным локомотивом непрерывного совершенствования электромобилей.

Еще одна категория изделий силовой электроники – транзисторы Si LDMOS – получила распространение в СВЧ-электронике

и микросхемах преобразователей напряжения, но нынешнее бурное развитие СВЧ GaN-изделий снижает применение Si LDMOS в СВЧ-приложениях [11].

Важной сферой применения становятся энергоэффективные коммуникации, где технология 3DGaN FinFET компании Finwave Semiconductor использует современные достижения кремниевой FinFET-технологии и проектные нормы менее 130 нм [12].

Производство высоковольтных диодов Шоттки на основе Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с помощью японских стартапов только перешло на мелкосерийный выпуск и должно пройти тот же этап коммерческой адаптации и снижения цены, что и с SiC и GaN [13].

Алмаз обладает чрезвычайно выгодными свойствами, которые позволяют применять его в таких областях, как мощная и высокочастотная электроника, детекторы излучения, электронные излучатели для вакуумных переключателей сверхвысокого напряжения и катодов ламп бегущей волны, а также термоэмиссионные излучатели для преобразования энергии. К некоторым из выдающихся электронных свойств алмаза относятся: электрическое поле пробоя и высокая подвижность носителей заряда. Алмаз также обладает самой высокой теплопроводностью среди всех материалов, что особенно важно, поскольку во многих приложениях силовой электроники и оптоэлектроники работа устройств ограничена отводом тепла. Однако возможности алмаза пока исследуются, и переход к широкому практическому применению у него еще впереди [14].

Мировые тенденции развития силовых полупроводников

Основными мировыми тенденциями развития силовых полупроводников в последние десятилетия являются:

- заметный рост потребности в силовых полупроводниках, обеспечивающих решающие преимущества в энергосберегающих и «зеленых» сегментах экономики: потребительском, автомобильном, энергетическом и т. д.;
- ощутимый рост мощности дискретных полупроводников и силовых ИС, что потребовало пересмотра технологий изготовления чипов и сборки, конструкций корпусов силовой электроники для снижения теплового сопротивления и улучшения теплоотвода;
- интеграция в одном чипе (корпусе) функций управления (драйвера), силовых выходных каскадов, датчиков тока, температуры, обратной связи и т. д.;
- перенос целых технологических блоков из СБИС в силовые дискретные полупроводники (150–350-нм фотолитография, щелевые технологии, многоуровневые межсоединения, 300-мм пластины и т. д.);
- переход к тонким и ультратонким пластинам;

- использование новых материалов для улучшения статических и динамических параметров (SiC, GaN,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , AlN и др.);
- обеспечение высокой радиационной стойкости ИЭТ с помощью новых материалов;
- вследствие исключительных физических характеристик новых материалов отпадает необходимость в традиционных дорогих и сложных методах повышения быстродействия, характерных для кремниевых изделий (электронное, протонное облучение и т.д.);
- переход к 2,5–3D-сборке аналогично технологии СБИС;
- переход к «безвыводным» мощным корпусам и их интеграции с теплоотводом в печатную плату;
- переход с керамических и металлокерамических на пластиковые корпуса в изделиях для военного и космического применения, включая радиационно-стойкие.

Одним из наиболее важных технологических аспектов их развития является широкое использование целых технологических блоков и топологических проектных норм из технологии СБИС, а также сборочных методов, технологий и материалов силовых модулей. Когда в 1988 г. компания IBM впервые внедрила метод изоляции компонентов неглубокими канавками (Shallow Trench Isolation, STI) для технологии 500-нм КМОП-логики и чипов памяти 16-Mbit DRAM, который затем трансформировался в изоляцию глубокими канавками (Deep Trench Isolation, DTI), ничто не указывало, что эта технология станет базовой не только для СБИС, но и силовых полупроводников в повышении степени интеграции и улучшении многих статических и динамических параметров, а также для сборочных интерполюсов. Однако если вначале траншейная технология применялась только в качестве замены диэлектрической изоляции LOCOS, то в настоящее время она является частью структуры и конструкции диодов, транзисторов, пассивных компонентов ИС и силовой электроники. Эта технология стала одним из основных инструментов в снижении размеров чипов всех изделий силовой электроники и улучшении их статических и динамических параметров. В сочетании с проектными нормами менее 0,25 мкм trench-процесс уже не ограничивается травлением глубоких канавок, их заполнением и планаризацией, а требует современных методов математического моделирования и САПР-проектирования для создания оптимальной структуры и достижения требуемых параметров силовой электроники. Эти методы позволяют изделиям силовой электроники развиваться ускоренными темпами, заметно превосходящими такие же этапы для кремниевых ИС небольшой мощности. Теперь топологические нормы 130–350 нм и менее для силовых ИС, MOSFET, IGBT являются столь же привычными, как десятилетие назад для микросхем высокой степени интеграции. И это обстоятельство не позволяет многим российским предприятиям совершить быстрый эволюционный скачок к новым современным технологиям силовой электроники без значительного обновления парка оборудования и технологий. Если два десятилетия назад средние рабочие токи кремниевых MOSFET транзисторов составляли десятки ампер, а типовое сопротивление  $R_{DS(on)}$  – сотни миллиом, то с переходом на технологию Trench MOSFET они выросли до более 100 А в тех же корпусах типа TO-220, TO-247, D2Pak, а в настоящее время в связи с совершенствованием кремниевых техпроцессов и применением новых материалов SiC, GaN, снижением сопротивления  $R_{DS(on)}$  до еди-

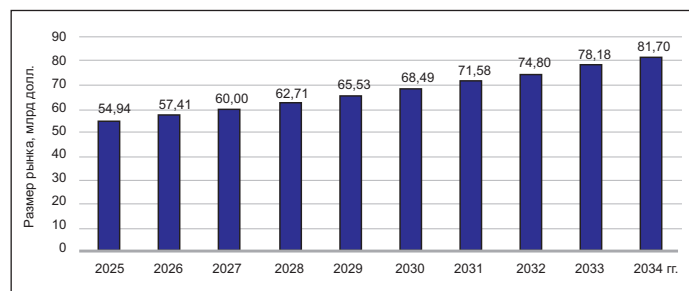


Рис. 1. Мировой рынок силовых полупроводников за 2025–2034 гг.

ниц миллиом средние токи на чип превышают 200–400 А. Однако для обеспечения этих параметров требуются новые типы корпусов, новые способы и материалы монтажа внутренних выводов, самих чипов и теплоотвода корпуса, обеспечивающие снижение теплового и электрического сопротивления.

Еще одним важным фактором, позволяющим повысить мощность силовых полупроводников, является более высокая температура перехода 175°C и выше, обеспечиваемая ШЗП в сравнении с кремнием. Она позволяет расширить область безопасной работы приборов. Однако именно при таких температурах традиционные паяные материалы начинают разрушаться. Кроме того, возникают более жесткие требования к толщине чипов и металлизации их обратной стороны. Если посмотреть на требования к электрооборудованию, то интенсивность термического циклирования усиливается из-за быстрой зарядки и необходимости частых циклов включения и выключения, повышения скорости нарастания  $dv/dt$  и  $di/dt$ , больших колебаний температуры, создания значительного механического напряжения из-за несоответствия КТР материалов, расширяющихся с разной скоростью, что приводит к механизмам отказа в традиционных пайках из-за усталости, пустот и деламации (расслоения). Еще одной тенденцией, связанной с этими новыми условиями эксплуатации, является применение новых герметизирующих компаундных материалов, основанных не на силиконовых, а на эпоксидных наполнителях. Таким образом, более жесткие условия эксплуатации создают новые вызовы и требования к сборочным материалам и корпусам.

Силовая электроника стала по-настоящему силовой не только в категории мощных модулей, но и в дискретной продукции, ранее отнесенной к изделиям средней и даже малой мощности. Для удовлетворения новых реалий и требований потребовался пересмотр концепций технологии изготовления чипов, корпусов и сборки. И если снижение размеров чипов при одновременном повышении их мощности являлось многолетней тенденцией, то для корпусов и технологий сборки силовой электроники потребовались новые подходы, в том числе для теплоотвода резко возросшей мощности.

Отдельной темой рассмотрения является применение SiC и соединений на его основе, а также алмазов в качестве теплоотвода в полупроводниковых корпусах, интерпозерах, радиаторах.

## Мировой рынок силовой электроники

Рынок силовой электроники среди полупроводниковых изделий является самым стабильным и растущим, не подверженным резким колебаниям, например, в отличие от микросхем памяти. По прогнозам, с 2025 по 2034 гг. мировой рынок изделий силовой полупроводниковой электроники вырастет с 54,94 до 81,7 млрд долл. с ежегодными средними темпами роста 5–6% (рис. 1) [15]. В 2024 г. Азиатско-Тихоокеанский регион с долей 41% являлся мировым лидером по объему этого рынка для автомобильной, потребительской, промышленной электроники. Европа, где лидирует автомобильный

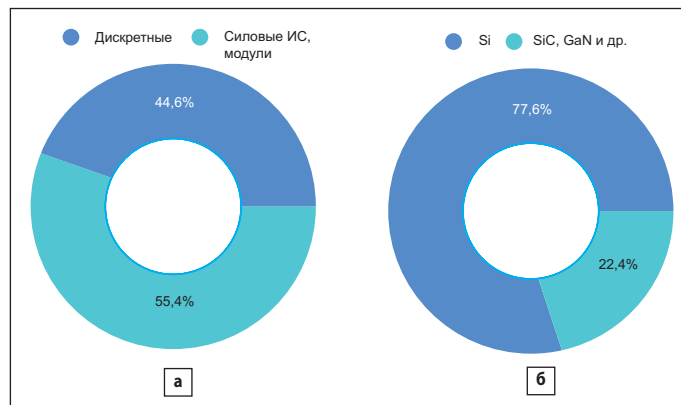


Рис. 2. Доли сегментов по типам: а) продукции; б) материалов на мировом рынке силовых полупроводников в 2025 г.

сегмент, с долей 32% занимает второе место среди мировых регионов. Объемы рынка в Азии с 2025 по 2034 гг. вырастут с 22,53 до 33,58 млрд долл. По типам продукции в 2025 г. доля дискретных полупроводников составляет 44,6%, а силовых ИС и модулей – 55,4% (рис. 2а). Доля кремниевых изделий силовой электроники равна 77,6%, а всех других

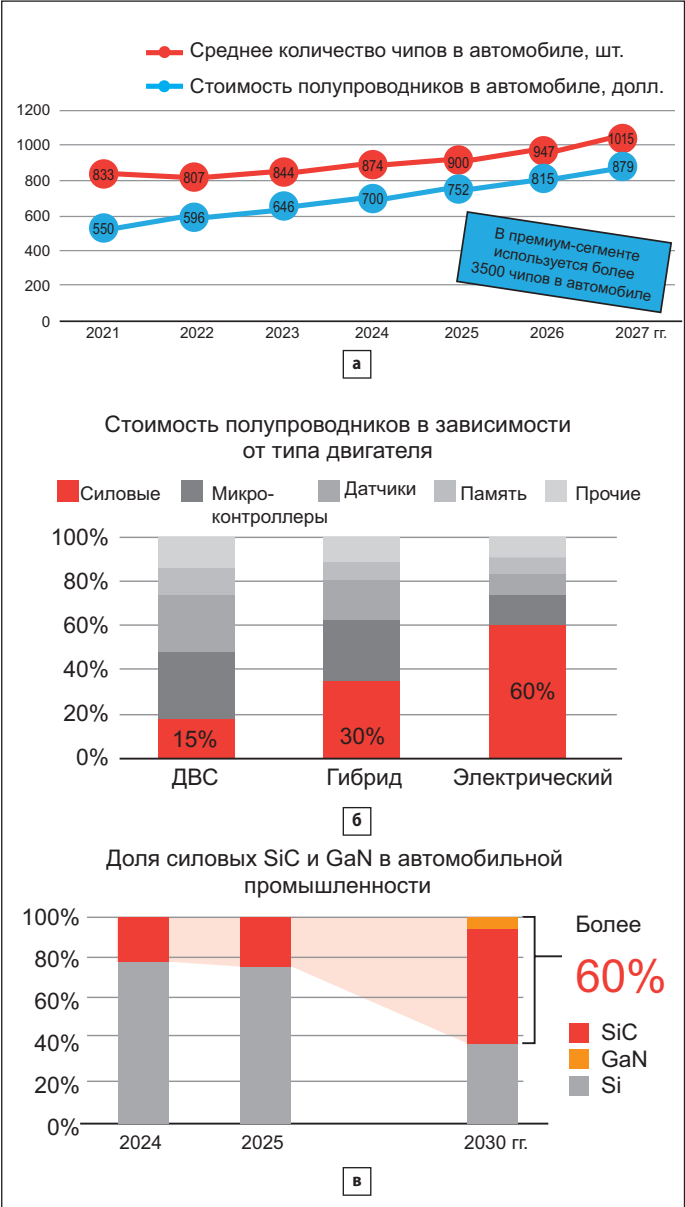


Рис. 3. Рост: а) количества и стоимости полупроводников в автомобиле за 2021–2027 гг.; б) их доли в разных типах автомобилей; в) доли силовых полупроводников за 2024–2030 гг.

материалов, включая SiC и GaN, – 22,4% (рис. 2б). Одним из самых мощных стимуляторов роста потребительского рынка потребления является автомобильный сегмент. К 2027 г. среднее количество полупроводников в автомобиле вырастет до 1015 шт., а в сегменте премиальных авто превысит 3500 шт. (рис. 3а) [16]. Стоимость силовых полупроводниковых приборов растет в зависимости от типа автомобиля от 15% у автотранспортных средств с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) до 60% у автомобилей с электрическим приводом (рис. 3б). В первую очередь, этот показатель будет достигнут за счет роста применения силовых полупроводников, и особенно на основе SiC и GaN, совокупная доля которых в автомобиле к 2030 г. превысит 60% (рис. 3в). Перевод электромобилей на питание 48 В также увеличивает их применение. Сегмент автомобилестроения для авто с электрическим приводом оказался мощным катализатором роста рынка, особенно в отношении SiC-продукции, тогда как в предыдущие 15–20 лет его темпы роста были низкими. Особенно огорчительным для нашей страны является то, что, учитывая территориальные размеры России, транспортный сектор (авто, железнодорожный, авиа, водный) всегда являлся важным для ее рынка электроники и за последние годы потерял его в связи с падением производства собственных транспортных средств.

Широкозонные полупроводники

ШЗП обладают идеальными параметрами для силовой электроники (табл. 3) [17]. Наиболее ярким параметром, который характеризует возможные потери мощности в силовых устройствах, является показатель добротности Балиги (BFOM) [18]. Он основан на предположении, что потери мощности возникают из-за проводимости, то есть протекания тока открытого силового ключа. BFOM зависит от внутренних параметров материала и может быть представлен следующим образом:

BFOM = ε · М · E<sub>c</sub><sup>3</sup>

где ε, М, E<sub>c</sub> – диэлектрическая проницаемость, подвижность и критическое электрическое поле, соответственно.

Из табл. 3 видно, что у всех ШЗП и СПШЗП этот показатель намного лучше в сравнении с кремнием. Зависимость сопротивления в открытом состоянии от обратного напряжения демонстрирует их идеальные возможности для создания высоковольтных полупроводниковых приборов с использованием 4H-SiC, GaN, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и алмаза. Большими перспективами также обладают СПШЗП из нитрида алюминия (AlN) и кубического нитрида бора (c-BN). AlN уже проходит стадию прототипирования для создания MOSFET, а c-BN – исследования параметров и технологии производства.

Благодаря этим параметрам ШЗП обладают намного меньшим проходным сопротивлением (рис. 4а), а площадь чипов GaN-транзисторов на 650 В при одинаковом сопротивлении R<sub>DS(on)</sub> можно снизить в 35–45 раз в сравнении с типовыми планарными кремниевыми MOSFET и в 10–20 раз относительно кремниевых SJ MOSFET (рис. 4б) [19]. В последние 20 лет эволюция изменения

| Таблица 3. Параметры широкозонных и сверхширокозонных полупроводников |                             |                                                |                                                      |          |                            |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------|----------------------------|
| Материал                                                              | Ширина запрещенной зоны, эВ | Подвижность электронов, см <sup>2</sup> /(В·с) | Критическая напряженность электрического поля, МВ/см | BFOM (*) | Теплопроводность, Вт/(м·К) |
| Si                                                                    | 1,12                        | 1240                                           | 0,3                                                  | 8,8      | 145                        |
| 4H-SiC                                                                | 3,2                         | 930                                            | 3,1                                                  | 6270     | 350                        |
| GaN                                                                   | 3,4                         | 1000                                           | 4,9                                                  | 27900    | 140                        |
| β-Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                      | 4,9                         | 150                                            | 10,3                                                 | 36300    | 27                         |
| Алмаз                                                                 | 5,5                         | 2000                                           | 13                                                   | 554000   | 3450                       |
| AlN                                                                   | 6,0                         | 426                                            | 15,4                                                 | 336000   | 319                        |
| c-BN                                                                  | 6,4                         | 825                                            | 17,5                                                 | 695000   | 2145                       |

\* BFOM (Baliga Figure of Merit) – коэффициент качества Балиги.

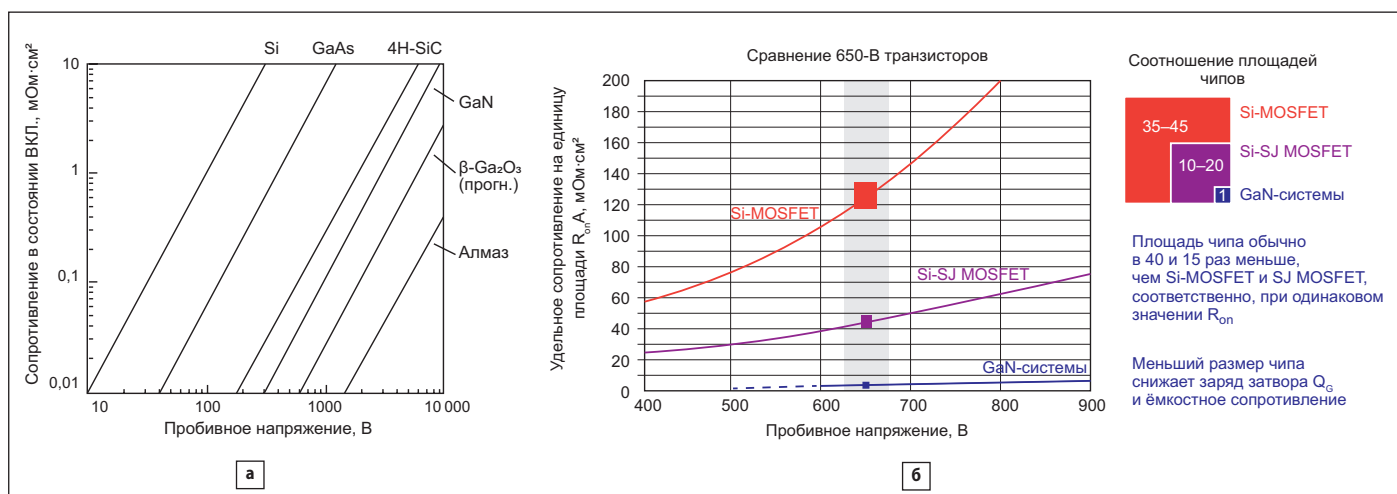


Рис. 4. а) теоретические значения зависимости сопротивления в открытом состоянии от обратного напряжения у разных полупроводников; б) сравнение площади чипов кремниевых MOSFET, SJ MOSFET и GaN HEMT при напряжении 650 В

площади транзистора VDMOS, SJ MOSFET, GaN HEMT с параметрами 10 А/650 В свидетельствует о снижении площади с 21,6 мм<sup>2</sup> у VDMOS до 4 мм<sup>2</sup> у GaN HEMT при одновременном снижении в пять

раз  $R_{DS(on)}$  у GaN (рис. 5а) [20]. Сравнение соотношения параметра  $FOM = R_{DS(on)} \cdot Q_g$  также указывает на большие преимущества GaN HEMT, у которого более чем на порядок лучше значения в сравнении с последними поколениями кремниевых SJ MOSFET (рис. 5б). Кроме того, благодаря малым размерам стоимость чипов GaN HEMT постоянно снижается в долларах за единицу сопротивления  $R_{DS(on)}$ . Эти значения даже ниже, чем у SJ MOSFET (рис. 5 в). У SiC- и GaN-приборов в сравнении с кремниевыми также лучше динамические параметры и намного меньше время обратного восстановления при переключении, что обеспечивает более высокие рабочие частоты и КПД устройств на их основе в сравнении с кремнием. Заметим также, что при выпуске кремниевых приборов для улучшения быстродействия необходимо применять сложные и дорогостоящие процессы высокоэнергетического электронного, протонного облучения. Благодаря отличным динамическим параметрам самого GaN, в изделиях на его основе отпадает необходимость в этих методах. На этих изделиях, обладающих хорошей радиационной стойкостью для космической силовой электроники, в частности, специализируется один из мировых лидеров по GaN-продукции – американская компания EPC.

Категория ШЗП с шириной запрещенной зоны более 4 эВ относится к СШЗП и имеет сферы применения, которые недоступны даже приборам на основе ШЗП. В первую очередь, имеются в виду датчики для экстремальных условий окружающей среды (высокая температура, повышенная радиация и т. д.). СШЗП посвящена отдельная статья [14].

### Мировой рынок широкозонных полупроводников

С 2024 по 2030 гг. мировой рынок SiC-продуктов вырастет с 3,4 до 10,3 млрд долл. со среднегодовыми темпами 20,3% [21].

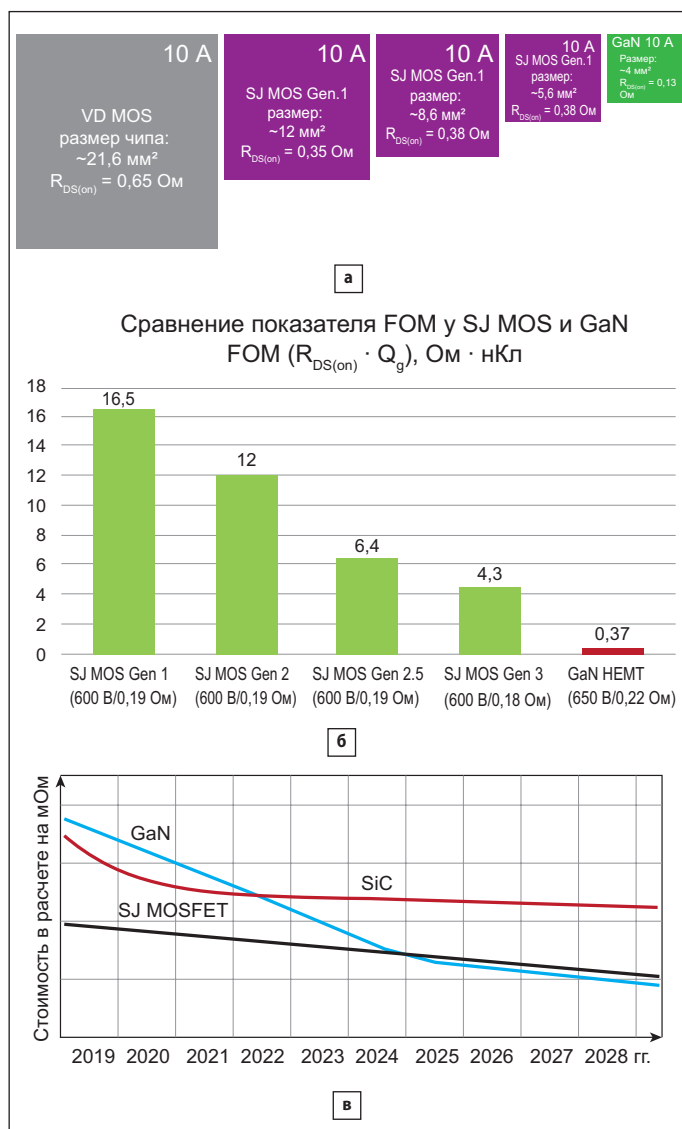


Рис. 5. Изменение: а) площади чипов транзисторов 10 А/650 В, реализованных по разным технологиям; б) показателя добротности FOM; в) стоимости за единицу сопротивления  $R_{DS(on)}$

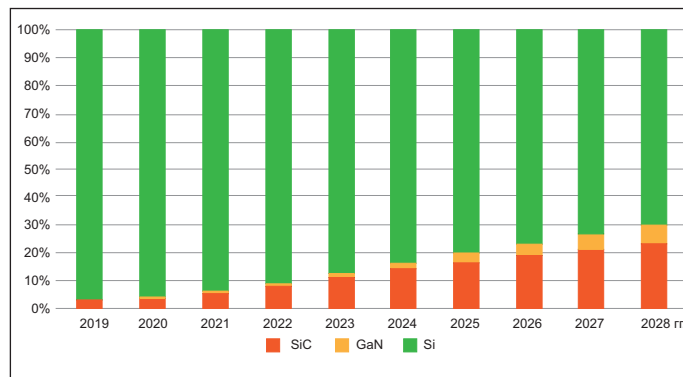


Рис. 6. Рост доли изделий на основе SiC, GaN в сравнении с кремнием на мировом рынке в 2019–2028 гг.

Основными сферами их применения станут автомобильная промышленность, сфера мобильности с долей 71% и промышленная электроника с долей 28%. В этих сферах ШЗП-продукция на основе SiC и GaN будет отвоевывать свою долю применения и к 2028 г. вырастет до 30% (рис. 6) [22]. По прогнозу компании Omdia, совокупный рынок этих изделий с 2024 по 2030 гг. вырастет с 4,5 до 20,3 млрд долл.; при этом среднегодовые темпы роста SiC и GaN, соответственно, составят 53,5 и 27%. По сферам применения Si, SiC и GaN очевидно, что SiC преимущественно используется в приборах, где важны высокая рабочая температура и теплопроводность, а GaN – в изделиях с большей напряженностью электрического пробоя. Сегменты авто- и промышленной электроники как основные для электронных SiC-блоков на основе комплектующих SiC-полупроводников вырастут с 2023 по 2029 г. с 23,8 до 35,7 млрд долл., причем в зависимости от рабочего напряжения увеличится доля блоков на 1200 В.

Мировой рынок силовой GaN-продукции с 2023 по 2029 гг. вырастет с 260 млн долл. до 2,5 млрд долл., а рынок RF GaN – с 1,1 до 1,9 млрд долл., соответственно [23].

В 2023–2025 гг. на фоне космических расходов мировых компаний в строительство ЦОД, особенно после начала разработки новой архитектуры напряжения 800 В DC, вырос спрос на силовые Si-, SiC-, GaN-транзисторы. Потребность в них будет ежегодно расти и к 2030 г. превысит 1 млрд долл., а доля SiC-, GaN-транзисторов превысит 30% [24]. Этот рынок является еще одним катализатором роста потребности в силовых ШЗП.

Если оценивать параметрические области применения силовых полупроводников по типу материалов, то видно, что у кремния такой зоной является диапазон устройств с рабочей частотой до 100 кГц, у SiC-, GaN-приборов – до 100 МГц, а у ШЗП Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN и алмаза – свыше 100 МГц (рис. 7) [25]. Кремний остается пока незаменимым для тиристоров, IGBT с уровнем мощности в десятки или сотни МВт, но в устройствах до 100 кГц.

Китай является не только мировым лидером на рынке потребления силовых ШЗП-изделий, но и в их производстве. В Китае быстро поняли перспективы этой продукции и не только подхватили, но и быстро развили ее выпуск, а также совершенствование методов и инструментов производства. Несмотря на введенные санкционные ограничения на эту продукцию, Китай не намерен повторять ошибки и сталкиваться с проблемами в отношении оборудования и передовых нанометровых технологий, полагаясь только на их легальный трансфер из-за рубежа. В настоящее время Китай является самодостаточным в технологиях и оборудовании производства SiC- и GaN-продукции и будет теснить на мировом рынке зарубежные компании, доводя их даже до банкротства.

Основные виды GaN-технологий

В табл. 4 приведены основные виды GaN-техпроцессов, типов приборов и применяемых диаметров пластин в мировой полупроводни-

ковой отрасли. Наибольшее распространение получили техпроцессы GaN-on-Si и GaN-on-SiC, причем GaN-on-Si применяется для всех категорий силовых и СВЧ-изделий, включая моночиповые микросхемы драйверов управления силовыми транзисторами, а GaN-on-SiC востребован в СВЧ-электронике и в приборах повышенной мощности, где важным параметром является высокая теплопроводность подложки SiC.

Техпроцесс GaN-on-Sapphire необходим для дискретных диодов и латеральных транзисторов с повышенными требованиями к токам утечки и радиационной стойкости. По экономическим показателям техпроцесс GaN-on-Si имеет очевидные преимущества за счет низкой цены кремниевой подложки, диаметра пластин 200–300 мм и его совместимости с существующей кремниевой КМОП-технологией ИС. Техпроцесс GaN-on-GaN очень важен для производства вертикальных MOSFET-транзисторов с напряжением 1200 В и выше, но пока он не приобрел конкурентных экономических показателей из-за высокой стоимости GaN-подложки и небольшого диаметра пластин 76–100 мм. Однако по мере его эволюции он будет составлять конкуренцию SiC-приборам в этой области. Наибольшими перспективами обладает технология GaN QST, обладающая максимальной универсальностью для приборов всех категорий, включая высоковольтные до 10 кВ и более и избавленная от многих механических недостатков пластин GaN-on-Si, обусловленных различием параметров кристаллической решетки GaN и Si [26]. Еще одним преимуществом техпроцесса QST является диаметр пластин 200–300 мм, а также совместимость с другими типами ШЗП-материалов, включая SiC. А это значит, что на базе QST-подложки с эпитаксиальными слоями SiC возможно создание соответствующих SiC-изделий.

| Таблица 4. Основные технологии GaN силовых ИЭТ |                                                    |                 |                                                                                                          |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Технология                                     | Приборы                                            | Диаметр пластин | Особенности                                                                                              |
| GaN-on-SiC                                     | СВЧ-транзисторы<br>диоды<br>HEMT-транзисторы       | 100–150–200 мм  | высокая теплопроводность SiC, но более высокая стоимость                                                 |
| GaN-on-Sapphire                                | диоды<br>HEMT-транзисторы                          | 100–150–200 мм  | плохая теплопроводность Sapphire, хорошая изоляция                                                       |
| GaN-on-Si                                      | СВЧ-транзисторы<br>диоды<br>HEMT-транзисторы<br>ИС | 200–300 мм      | латеральные конструкции приборов, низкая стоимость Si                                                    |
| GaN-on-GaN                                     | высоковольтные диоды<br>и MOSFET-транзисторы<br>ИС | 76–100 мм       | вертикальные конструкции при малом R <sub>DS(on)</sub> и высоких обратных напряжениях                    |
| QST                                            | все типы диодов,<br>HEMT MOSFET-транзисторов<br>ИС | 200–300 мм      | максимальная универсальность для всех типов приборов и совместимость с производственными линиями Si CMOS |

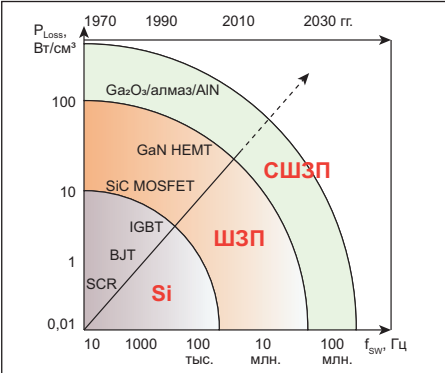


Рис. 7. Область применения силовых полупроводников по удельной мощности и рабочей частоте приборов и материалов разных типов

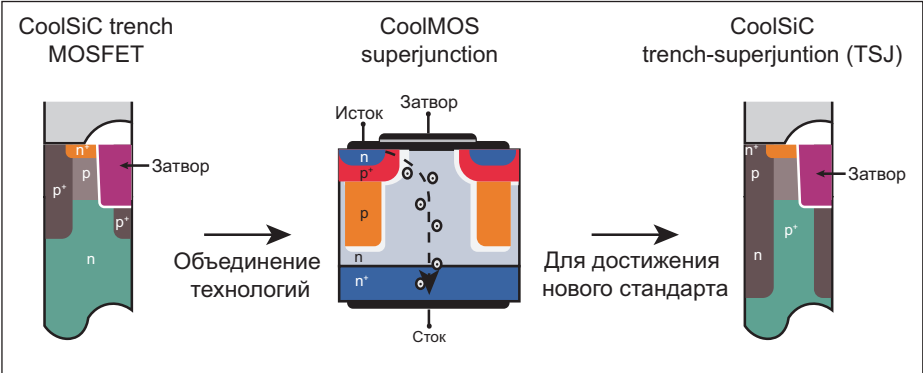


Рис. 8. Новая технология SJ SiC MOSFET от Infineon объединяет преимущества CoolSiC MOSFET и кремниевых CoolMOS с возможностью улучшения R<sub>DS(on)</sub> до 40%

## Последние достижения мировых компаний по силовой электронике

Компании Navitas Semiconductor и EPFL разработали платформу твердотельного трансформатора мощностью 250 кВт для архитектур распределения напряжения 800 В DC для ЦОД следующего поколения на базе ИИ [27]. Она применяет модульную топологию мостового выпрямителя SST для прямого преобразования 3,3 кВ AC в 800 В DC при номинальной мощности 250 кВт с использованием траншейных SiC MOSFET Gen.5 с ультравысоким напряжением 3,3 и 1,2 кВ.

Компания Wolfspeed анонсировала создание чипов SiC MOSFET с напряжением 10 кВ, представленных как первые коммерчески доступные устройства в этом классе напряжений [28]. Прогнозируемый срок службы нового изделия CPM3-10000-0300A составляет примерно 158 тыс. лет при непрерывной подаче 20 В для смещения затвора, а устройства на его основе способны обеспечить эффективность преобразования до 99%.

Многонациональная группа исследователей из США, Китая и Великобритании анонсировала создание GaN HEMT-транзисторов с напряжением 10 кВ и удельным сопротивлением открытого канала 69 мОм·см<sup>2</sup>, что ниже, чем у MOSFET на основе SiC с тем же номинальным напряжением [29].

Компания iDEAL Semiconductor заявила о начале промышленного выпуска семейства кремниевых MOSFET-транзисторов SuperQ на 100-150-200 В, обладающих самым низким в отрасли сопротивлением, которое на 30–40% ниже, чем у ближайших конкурентов [30].

На конференции и выставке IEEE Applied Power Electronics (APEC) в марте 2026 г. несколько мировых производителей представили результаты исследований и планы перехода на коммерциализацию SiC SJ MOSFET с напряжением 1200 В [31]. Среди известных поставщиков, ведущих эти работы, – Infineon Technologies, Bosch, STMicroelectronics, Navitas Semiconductor, ROHM Semiconductor, Toshiba Electron Devices & Storage, Mitsubishi Electric и Fuji Electric. По данным Infineon, величина  $R_{DS(on)}$  улучшится до 40% с помощью инновационной техно-

логии CoolSiC TSJ, обеспечив до 25% более высокую токонесящую возможность. Эта технология объединяет лучшее из карбидокремниевых CoolSiC и кремниевых CoolMOS (рис. 8). Infineon планирует начать массовое производство с использованием 200-мм пластин CoolSiC TSJ 1200 В в 2027 г. Текущие значения  $R_{DS(on)}$  при 1200 В достигают 5 мОм.

Еще одним важным драйвером технологии SiC SJ MOSFET является компания Bosch. Она планирует внедрение этой технологии в пятой генерации SiC-продукции. Ключевым в ней станет усиление зоны дрейфа SJ и оптимизация производственного техпроцесса с точным контролем концентрации примесей и толщины слоев, а также использованием очень высокоэнергетической ионной имплантации. В Японии совместная исследовательская группа под руководством Национального института передовых промышленных наук и технологий (AIST), в состав которой входят Sumitomo Electric, Fuji, Toyota Motor Corporation, Toshiba Corp. и Mitsubishi Electric, совместно разработала MOSFET SJ SiC на 3,3 кВ с  $R_{DS(on)}$  равным 3,3 мОм·см<sup>2</sup>.

Отдельного внимания заслуживает революционная технология DrGaN компании Intel, анонсированная Intel Foundry в апреле текущего года [32]. Она действительно революционная, и техпроцесс DrGaN создания чиплетов из GaN на кремниевой 300-мм подложке толщиной всего 19 мкм позволяет интегрировать в рамках одного чипа не только функции цифрового управления, силового GaN-транзистора, но и обеспечить новые вычислительные способности, что делает ее применимой как в силовой электронике, так и в микропроцессорах, схемах памяти и т. д. (рис. 9) [33]. Новая технология использует практически все самые современные технологии чипов и сборки, включая гибридное соединение пластин GaN и кремния, а также их ультраутонение, и открывает новый этап для комбинированного соединения преимуществ кремниевых и GaN-технологий для цифровых и силовых полупроводников разного назначения. Эта сложная технология будет доступна немногим компаниям, и за ней нужно пристально наблюдать. Однако главный прорыв по этой технологии следует ожидать именно в отношении сложных цифровых

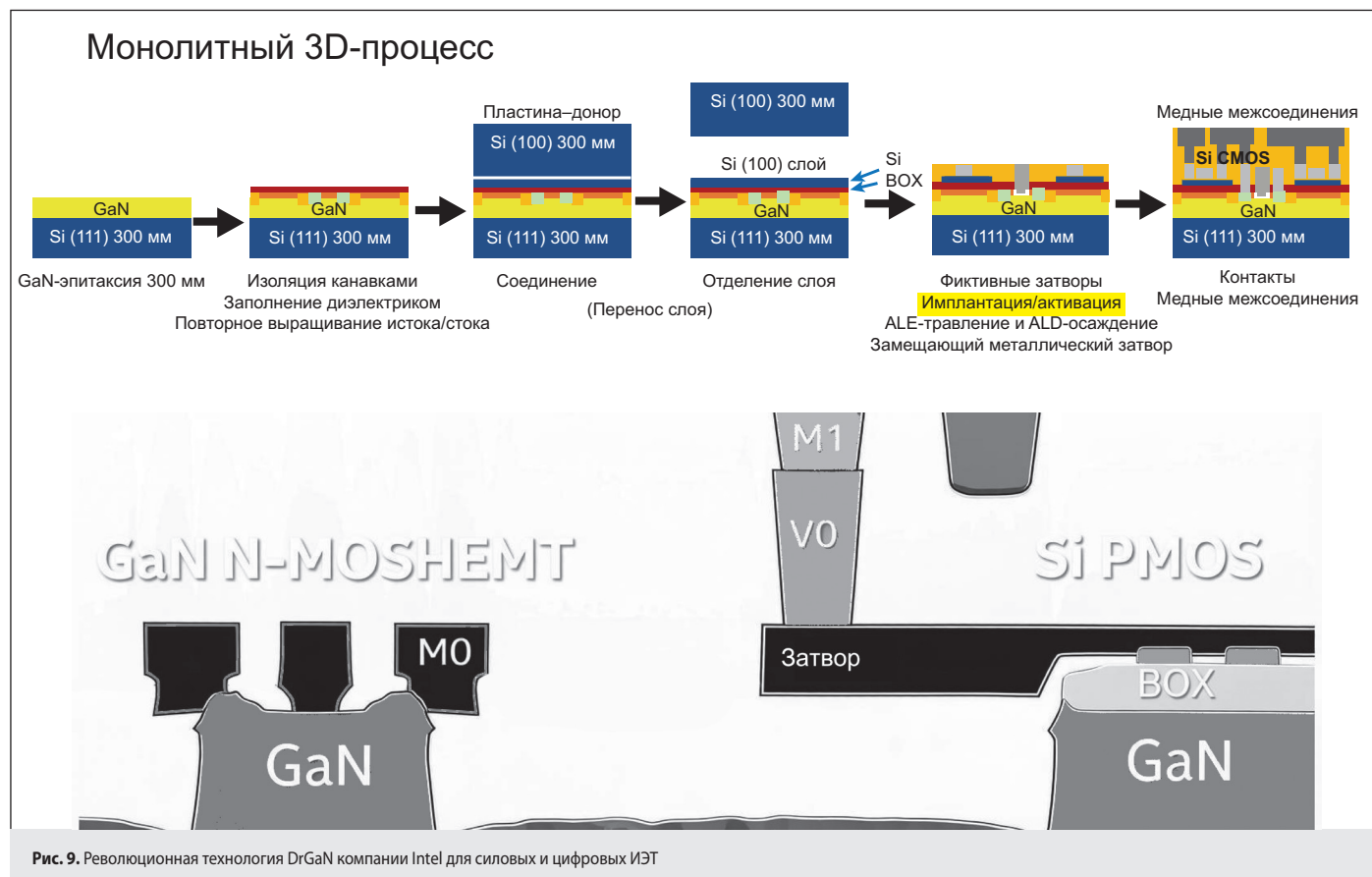


Рис. 9. Революционная технология DrGaN компании Intel для силовых и цифровых ИЭТ

СБИС процессорного направления и памяти, где будет достигнуто значительное улучшение динамических параметров и токов потребления.

## Выводы

1. Мировые технологии и рынок кремниевых силовых полупроводников растут с ежегодными темпами 5–9%. Рынок силовых полупроводников на новых материалах SiC, GaN ежегодно увеличивается на 30–50%.
2. Мировые технологии и силовые полупроводниковые изделия непрерывно эволюционируют: растет их плотность мощности, снижаются потери и размеры чипов, а также улучшаются динамические параметры изделий на основе кремния и новых ШЗП-материалов.
3. Средние токи на кристалл силовых дискретных полупроводников (диодов, транзисторов) за последние десятилетия выросли с десятков до сотен ампер (300–400 А), а проходное сопротивление транзисторов снизилось в десятки или сотни раз до менее 1 мОм, что потребовало пересмотра и применения новых корпусов, технологий и материалов сборки для снижения потерь мощности.
4. Одной из наиболее важных технологических тенденций в эволюции силовых полупроводниковых приборов является заимствование и перенос из апробированных технологий СБИС целых технологических блоков и приемов, включая 150–350-нм фотолитографию, trench-технологии, многоуровневые межсоединения, 300-мм пластины с их ультраутономением и т. д.
5. Широкозонные полупроводники SiC, GaN обладают идеальными параметрами для создания чипов силовых полупроводниковых приборов. Использование карбида кремния предпочтительнее в более мощных приборах, а нитрид галлия обладает максимальной универсальностью, особенно в области высоких рабочих частот, для изделий не только силовой, но и цифровой электроники.
6. Конструкции и технологии дискретных силовых MOSFET на основе широкозонных полупроводников эволюционируют по историческому пути кремниевых изделий: планарные MOSFET – Trench MOSFET – SJ MOSFET. Однако их статические и динамические параметры значительно превосходят кремниевые аналоги.
7. IGBT-транзисторы прошли восемь генераций и этапов конструктивных и технологических усовершенствований. Одним из следующих этапов станет разработка SiC IGBT-транзисторов.
8. Несмотря на быстрый рост рынка и масштабов применения силовых ШЗП-приборов, кремниевые ЭКБ и их технологии продолжают свою эволюцию и будут востребованы в ближайшее десятилетие, а для некоторых категорий изделий с оптимальной стоимостью (тиристоры, выпрямительных диодов, диодов Зенера, низковольтных диодов Шоттки и т. д.) кремний пока безальтернативен.
9. Самыми перспективными в ближайшие годы станут универсальные технологии: QST для силовых GaN- и SiC-приборов и DrGaN – для силовой и цифровой электроники.
6. Infineon Technologies Produces World's first Power Semiconductors in Silicon Carbide. Compound Semiconductor. February 5. 2001 // [www.compoundsemiconductor.net](http://www.compoundsemiconductor.net).
7. GaN Transistors for Efficient Power Conversion. EPC // [www.epc-co.com](http://www.epc-co.com).
8. Nitronex agrees GaN transistor deal for WiMAX. Compound Semiconductor. October 5. 2005 // [www.compoundsemiconductor.net](http://www.compoundsemiconductor.net).
9. Боднар Д. Нитрид галлия – премьер среди новых материалов полупроводниковой микроэлектроники. Компоненты и технологии. №4. 2018.
10. GaN Power ICs Enable the New Revolution in Power Electronics. EE Power. February 04. 2018 // [www.eepower.com](http://www.eepower.com).
11. RF GaN Compound Semiconductor Market Monitor 2024. YOLE Group // [www.yole.fr](http://www.yole.fr).
12. Finwave GaN Technology. Finwave Semiconductor // [www.finwavesemi.com](http://www.finwavesemi.com).
13. Perspective: Ga2O3 for Ultra-High Power Rectifiers and MOSFETS. Journal of Applied Physics 124. 220901 (2018).
14. Боднар Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2024 г. Часть 3. Широкозонные полупроводники как новый класс и этап развития полупроводниковых материалов и приборов. Электронные компоненты. №11. 2024.
15. Power Semiconductor Market Size, Share and Trends 2025 to 2034. Precedence Research // [www.precedenceresearch.com](http://www.precedenceresearch.com).
16. Semiconductor and beyond 2026. Global Semiconductor Industry Outlook 2026. PwC // [www.pwc.com](http://www.pwc.com).
17. Ultrawide-Bandgap Semiconductors: Research Opportunities and Challenges. Advanced Electronic Materials. 2018. 4. 1600501.
18. B. Baliga. J. Appl. Phys. 1982. 53. 1759.
19. Maximizing GaN Power Transistor Performance with Embedded Packaging. GaN Systems Inc. // [www.gansystems.com](http://www.gansystems.com).
20. GaN Power HEMT Tutorial: GaN Basics. GaN Power International Inc. // [www.ganpower.com](http://www.ganpower.com).
21. Power SiC: Market & Applications. Yole Group. May. 2025 // [www.yolegroup.com](http://www.yolegroup.com).
22. Power SiC/GaN Market Update. Yole Group. 2023 // [www.yolegroup.com](http://www.yolegroup.com).
23. From Power to RF: GaN's Journey to a US\$4.35B Market by 2029. Yole Group. June. 2024 // [www.yolegroup.com](http://www.yolegroup.com).
24. Power Electronics for Data Centers 2025. Yole Group // [www.yolegroup.com](http://www.yolegroup.com).
25. Management and Packaging of Wide and Ultra-Wide Bandgap Power Devices: A Review and Perspective. Journal of Physics D/Applied Physics. February 2023. 56 (9).
26. Боднар Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2022 г. Часть 2. Широкозонные полупроводники – мировые фавориты в новых производствах и научных разработках. Электронные компоненты. №1. 2023.
27. Solid-State Transformers' Path from Concept to Common. Power Electronics News. April 14. 2026 // [www.powerelectronicsnews.com](http://www.powerelectronicsnews.com).
28. Wolfspeed Introduces Industry's First Commercially Available 10,000 V Silicon Carbide Power MOSFET. Wolfspeed Inc. March 05. 2026 // [www.wolfspeed.com](http://www.wolfspeed.com).
29. E-mode GaN HEMT Breakdown beyond 10kV. Semiconductor Today. August 28. 2025 // [www.semiconductor-today.com](http://www.semiconductor-today.com).
30. iDEAL Semiconductor Announces 200 V Family of SuperQ-based MOSFETs With Industry-Leading Cost x Performance. iDEAL Semiconductor. September 4. 2025 // [www.idealsemi.com](http://www.idealsemi.com).
31. Recent Advances Push SiC Superjunction MOSFETs Toward Mass Production. Power Electronics News. May 6. 2026 // [www.powerelectronicsnews.com](http://www.powerelectronicsnews.com).
32. Intel Foundry Achieves Breakthrough with World's Thinnest GaN Chiplet Technology. Intel. April 7. 2026 // [www.intel.com](http://www.intel.com).
33. GaN Chiplet Technology Based on 300mm GaN-on-Silicon. 2025 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). San Francisco. CA. USA.

Во второй части этой статьи рассматривается мировая эволюция корпусов и процессов сборки изделий силовой полупроводниковой микроэлектроники.

## Литература

1. 65nm BCD Management Platform. Tower Semiconductor // [towersemi.com](http://towersemi.com).
2. BCD & BCDLite. GlobalFoundries // [gf.com](http://gf.com).
3. Power Semiconductors. Semikron Danfoss International GmbH // [www.semikron-danfoss.com](http://www.semikron-danfoss.com).
4. Trench MOS Schottky Diodes: A Physics-Based Analytical Model Approach to Charge Sharing. Micromachines (Basel). 2025 Jan 14.16 (1):90.
5. Comparing Trench and Planar Schottky Rectifiers. Nexperia // [www.nexperia.com](http://www.nexperia.com).