

Полупроводниковая микроэлектроника – 2023 г.

Часть 1.

Широкозонные полупроводники раздвигают горизонты достигнутого



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

Широкозонные полупроводники (ШЗП) развиваются стремительными темпами, заметно превосходящими исторические этапы эволюции кремния. Мировой рынок полупроводниковых продуктов карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN) устойчиво растет даже во время мирового кризиса, и новые горизонты применения ШЗП появляются ежегодно. Продолжается вертикальная интеграция производства в крупных мировых компаниях и увеличение производственных мощностей ШЗП. Новые технологии 3D GaN FinFET, алмаза, оксида галлия открывают перспективы для будущих продуктов ШЗП.

Темпы развития широкозонных полупроводников превосходят все то, что происходило с кремнием

Уже более шести лет, еще до начала мирового бума, автор статьи старается привлечь внимание в нашей стране на стремительно развивающееся направление полупроводниковой микроэлектроники с применением ШЗП. Основной акцент автор делает не толь-

ко на практические достижения мировой отрасли, но и на прикладные изыскания, которые могут расширить возможности ШЗП по созданию новых технологий и приборов в ближней и среднесрочной перспективе.

Научная и практическая деятельность в этом направлении задают вектор дальнейшего развития технологий, приборов и приложений. И каждый следующий год приносит свои плоды. Так, в 2022-м настоящим прорывом стали разработка универсальной

QST-технологии для нитрида галлия, открывающей перспективы для производства всех типов продуктов на пластинах диаметром до 300 мм, и эффективные исследования по созданию GaN КМОП совместимой технологии для новых классов микросхем [1].

За столь небольшой период, насчитывающий всего шесть лет, мировая отрасль прошла путь от обозначения принципиальной возможности реализации новых силовых приборов на основе SiC, и особенно GaN, и относительно небольших объемов их производства до полной уверенности в целесообразности интенсивного развития данного направления. Причем такая уверенность появилась даже у мировых полупроводниковых гигантов, ранее только присматривавшихся к этой сфере. А массовый переход множества компаний к освоению производства за столь короткое время — лучший показатель долгосрочной перспективы ШЗП.

Переход от создания простых диодов и транзисторов на основе ШЗП к их высоковольтным аналогам и СВЧ-изделиям, затем к простым микросхемам силовой электроники, создание базиса для сложных микросхем по КМОП-технологии и современных 3D GaN FinFET-архитектур очень быстро раздвигает горизонты и определяет перспективы ШЗП. Очень важно и то, что разрабатываемые для этого техпроцессы максимально близки и совместимы с классической и давно освоенной кремниевой КМОП-технологией. А это гарантирует быстрое снижение себестоимости производства и цен на продукцию. Именно так и должны развиваться рыночно стимули-

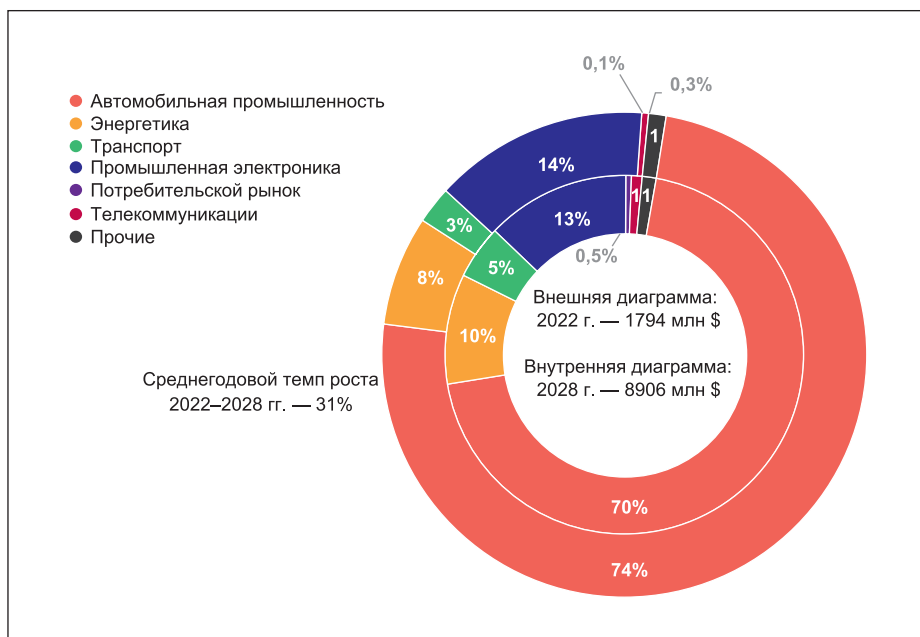


Рис. 1. Рост мирового рынка и сфер применения мощных SiC-приборов в 2022–2028 гг. от YOLE

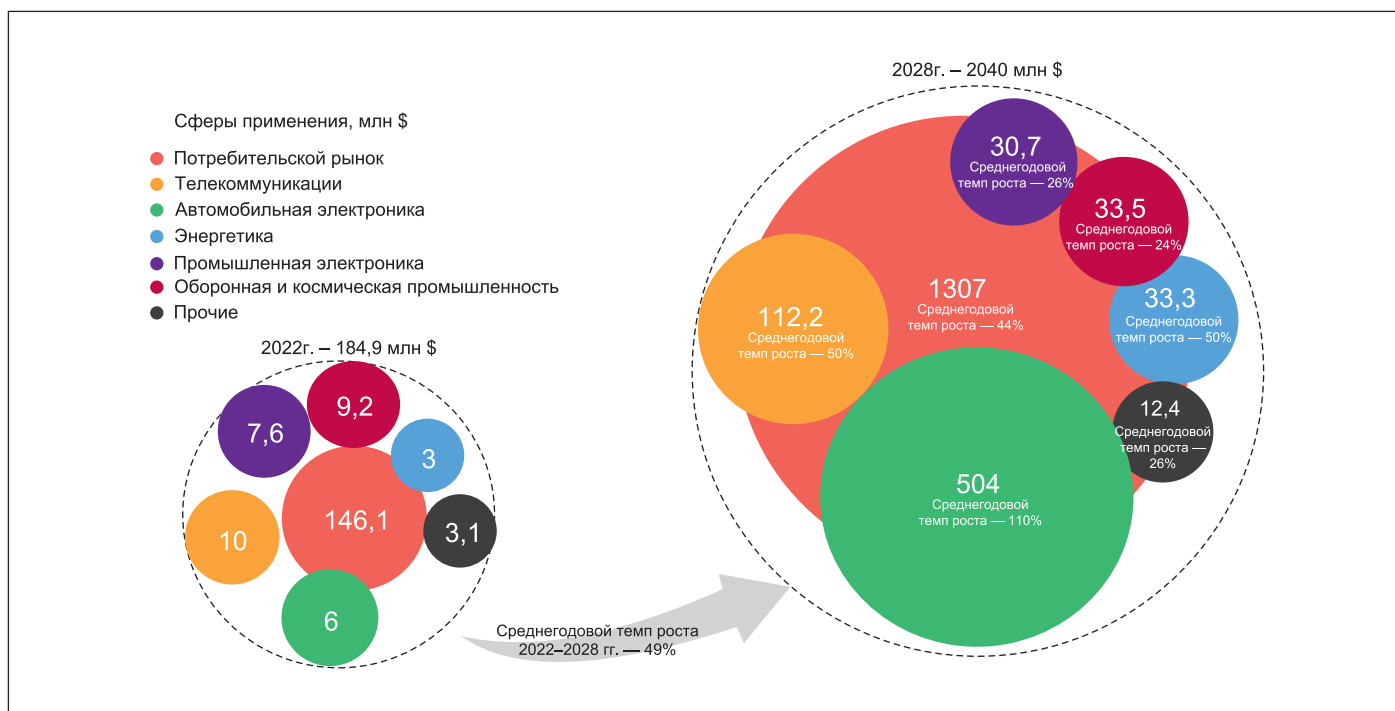


Рис. 2. Рост мирового рынка и сфер применения мощных GaN-приборов в 2022–2028 гг. от YOLE

рованные направления науки и производства. И автору статьи доставляет удовольствие следить за происходящим и делиться своими наблюдениями со специалистами.

Следует отметить, что темпы и скорость развития широкозонных полупроводников превосходят все то, что происходило ранее с кремнием, однако именно большой научный и производственный опыт, полученный в ходе проведения работ по кремнию и достигнутый мировой наукой и отраслью, способствовал этому, и без него процессы освоения заняли бы гораздо больше времени. А такого быстрого перехода от диаметра пластин 76 мм к 200 мм, и в перспективе к 300 мм, кремний не знал. Для кремния этот период занял 20 лет (с 1972 по 1992 год), в то время как для пластин SiC и GaN он сократился в 4 раза.

Очень важным в развитии ШЗП и любых других направлений в мире является создание стартапов при зарубежных учебных заведениях, отраслевых институтах и национальных центрах, с помощью частных инвестиций и госпрограмм, обеспечивающих быстрый переход от прикладных исследований и создания технологий к освоению производства. Таких примеров в развитых странах очень много. К сожалению, в России за последние 30 лет не удастся найти ни одного подобного положительного примера. И это говорит о многом.

Мировой рынок широкозонных полупроводников

Оптимизм по поводу перспектив мирового рынка ШЗП растет с каждым годом. Как

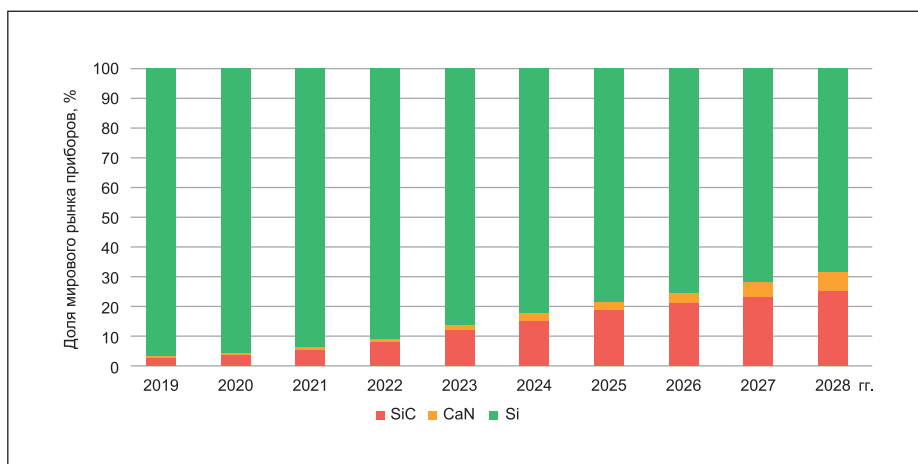


Рис. 3. Рост долей мирового рынка SiC- и GaN-приборов в 2019–2028 гг. от YOLE

отмечает в своих отчетах по мировому рынку французская компания YOLE Group, главным его стимулятором в настоящее время для SiC и GaN по-прежнему остается автомобильная промышленность, но все четче обозначаются новые перспективные области применения в сферах коммуникаций, промышленной, потребительской электроники, космоса и авиации [2, 3].

По их оценке, мировой рынок SiC-приборов вырастет с \$1,794 млрд в 2022 году до \$8,906 млрд в 2028-м со среднегодовыми темпами 31% (рис. 1), а рынок GaN за этот же период поднимется с \$184,8 млн до \$2,04 млрд со среднегодовыми темпами 49% (рис. 2). По карбиду кремния доля автомобильного рынка более 70% за весь этот период будет значительно превышать все другие сферы его применения.

Лидерами роста на рынке GaN станут автомобильный и телекоммуникационный секторы со среднегодовыми темпами в 110 и 50% соответственно. И хотя развитие мирового полупроводникового рынка имеет свою цикличность, то есть спустя 3–5 лет подъем сменяется падением, в прогнозах по ШЗП такого характера не наблюдается, и рынок постоянно растет. Причем, по данным YOLE, в своих секторах доля мирового рынка SiC- и GaN-приборов с с 2019 по 2028 год будет непрерывно увеличиваться, а кремниевых продуктов — падать (рис. 3) [4]. Устойчиво развивается и рынок пластин SiC, который к 2027 году достигнет почти 2,5 млн эквивалентных 150-мм пластин (рис. 4) [5]. Такими показателями и темпами роста за аналогичный период не обладает ни один другой тип продукции мировой полупроводниковой отрасли.

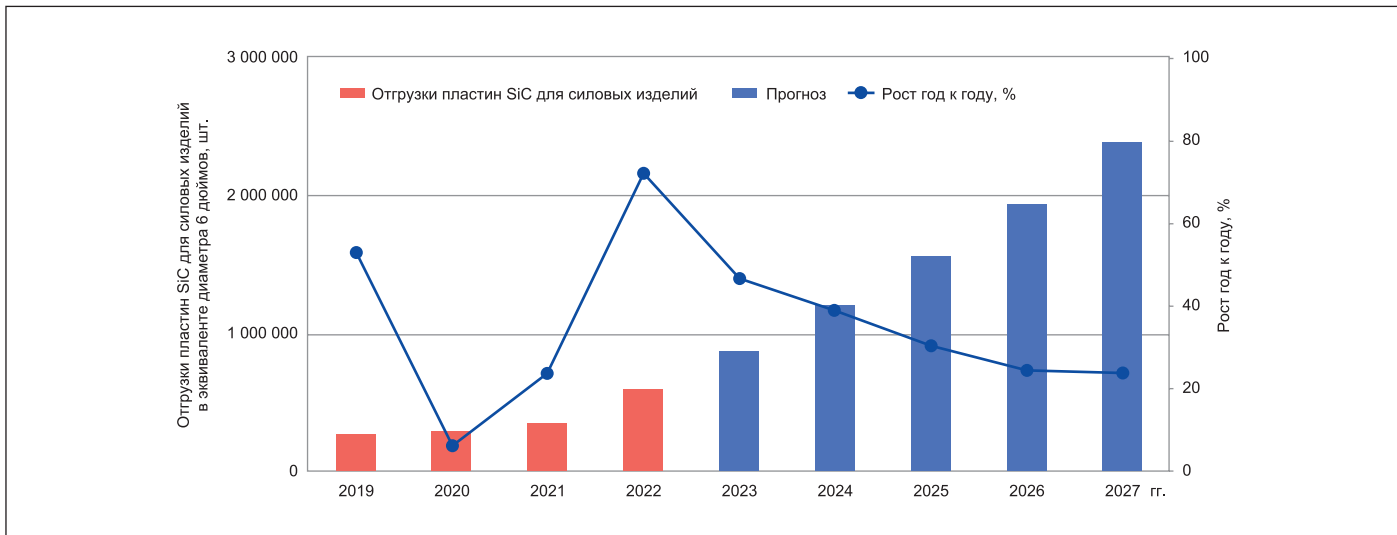


Рис. 4. Рост мирового рынка пластин SiC в 2019–2027 гг. от YOLE

Новые горизонты сервисов и продукции с применением ШЗП

В оптимально организованной рыночной экономике компании всегда ищут способы создания новых сервисов и конкурентных продуктов. Развитие электрического транспорта требует повышения его мобильности и запаса хода, что достигается благодаря новым типам аккумуляторных батарей и электронике с ШЗП. Впрочем, инновационные страны используют и ставшую обычной в нашей жизни беспроводную быструю зарядку, где также применяется эта электроника.

Для того чтобы сократить время зарядки и повысить запас хода, электромобили переводятся на питание 800 В и могут поддерживать быструю зарядку свыше 360 кВт, что приводит к резкому росту строительства мощных зарядных станций. Более того, прогресс в области беспроводной зарядки ускоряется. В США приняли закон о поддержке беспроводной зарядки электромобилей, а в Мичигане собираются открыть 1,6-км беспроводную зарядную магистраль, способную поддерживать зарядку на ходу. Диверсификация способов зарядки потенциально может уменьшить беспокойство владельцев электромобилей по поводу запаса хода. И появление таких сервисов расширяет потребности в ШЗП на многие десятилетия.

В одной из предыдущих статей по ШЗП автор отмечал преимущества алмаза для электроники систем спутниковой связи, что было актуально в первую очередь для военного назначения и спутниковой связи [6]. Однако высокая инновационность полупроводниковой электроники ориентирована в первую очередь на гражданскую сферу, и это способствует быстрой коммерциализации всех ее новых достижений и применений. Именно таким направлением является только зарождающиеся стандарты связи 6G

и новой технологии радиодоступа 5G New Radio (5G NR).

В настоящее время большинство операторов наземных сетей сосредоточены на предоставлении услуг 5G в районах, где распространены старые технологии и оборудование наземной сотовой связи. К концу 2022 года в мире насчитывалось 229 коммерческих наземных сетей 5G. Однако такая связь была возможна только в зонах, охваченных соответствующим наземным оборудованием.

Новый стандарт 5G NR предусматривает передачу сигнала через низкоорбитальные спутники и интеграцию с наземной структурой. Благодаря этому в новом типе смартфона сочетаются все функции спутникового и мобильного телефона в любой недоступной точке Земли. Такая возможность у некоторых пользователей уже появилась, но пока носит ограниченный характер. Кроме повышенной скорости, пропускной способности и увеличения покрытия связью, данный стандарт открывает новые, революционные перспективы автоматизации и управления.

Унификация спутниковых и наземных технологий 5G устранит барьер между различными спутниковыми системами, что позволит конечным пользователям свободно перемещаться между наземными и внеземными сетями разных операторов. Это станет одним из самых больших преимуществ стандарта 5G NR. Процесс стандартизации 6G должен начаться в период 2024–2025 гг., а внедрение первых технологий ожидается примерно в 2027–2028 гг.

По мере осуществления прорывов в ключевых технологиях 6G сфера применения выходит за рамки простого объединения сверхширокополосных приемников и передатчиков. На первый план выйдет интеграция наземных и внеземных сетей, а также инновации, внедренные с помощью искусственного интеллекта и машинного обучения. И в спутниковых системах 6G и 5G, под-

держивающих 5G NR, незаменимой становится электроника на основе алмаза и других ШЗП, обеспечивающих резкое повышение пропускной способности, мобильной работоспособности и параметров связи.

Новые горизонты применения электроники с ШЗП открывают также европейские компании STMicroelectronics и Airbus, подписавшие соглашение о сотрудничестве в области исследований и разработок силовой электроники для поддержки более эффективной и легкой силовой электроники для будущих гибридных самолетов и полностью электрических городских воздушных транспортных средств [7]. Сотрудничество основано на анализе, уже выполненном обеими компаниями при изучении преимуществ полупроводниковых материалов SiC и GaN для электрификации самолетов, и будет сосредоточено на разработке устройств, пакетов и модулей SiC и GaN, адаптированных для аэрокосмических приложений Airbus. Компании говорят, что они уже оценивают эти компоненты, проводя передовые исследования и испытания на демонстраторах, таких как блоки управления электронными двигателями, высоковольтные и низковольтные преобразователи энергии и беспроводные системы передачи энергии.

С каждым годом горизонты новых применений электроники с ШЗП раздвигаются, переводя в практическую плоскость то, что вчера еще казалось лишь принципиально возможным. Еще одно знаковое событие 2023 года связано с началом массового производства американской компанией NexGen Power Systems первых в мире вертикальных транзисторов GaN-on-GaN E-Mode Fin-JFET на 1200 В [8]. Они работают на частоте переключения до 10 МГц и способны выдерживать лавинообразное напряжение 1470 В и предназначены для автомобильной промышленности, центров обработки данных, светодиодного освещения и промышленного применения.

Рост слияний, поглощений компаний и расширений производственных мощностей на рынке ШЗП

Рост количества слияний, поглощений и покупок компаний служит лучшим подтверждением перспективности новых направлений. С 2006 по 2017 год в мире состоялась всего одна подобная транзакция в два года, а с 2018-го ежегодно происходит по шесть таких процедур (табл. 1) [9]. Из 31 сделки с 2006 года 21 напрямую связана с карбидом кремния. И основная причина в том, что технология SiC стала главной для автомобильной промышленности в связи с увеличением производства электрического транспорта. Как видно, крупные компании — Infineon, STMicroelectronics, OnSemi, II-VI, Wolfspeed — за счет покупки и транзакций ускоряют процесс вертикальной интеграции своего бизнеса с помощью как организации производства пластин SiC, так и приобретения профильных компаний и стартапов по разработке продукции.

Особенно следует отметить покупку европейским грандом Infineon одной из наиболее успешных в GaN-бизнесе канадской компании GaN Systems за \$830 млн [10]. На сегодня это одна из самых крупных сделок в секторе силовой электроники, а цена приобретения — около 18% от общего годового дохода Infineon Technologies от силовой электроники — в 4 раза превышает стоимость всего силового GaN-рынка по состоянию на 2022 год.

Ведущий производитель в области силовой электроники, инвестирующий столь значительные средства в довольно молодую компанию с относительно небольшим годовым доходом, делает важный шаг, свидетельствующий о желании Infineon извлечь выгоду из потенциального роста GaN и укрепить свое лидерство в области силовой электроники. GaN Systems, основанная в 2008 году, имеет штаб-квартиру в Оттаве и насчитывает более 200 сотрудников. Ранее компания привлекла более \$170 млн внешнего финансирования и имеет контракт с японской компанией ROHN — прямым конкурентом Infineon. GaN Systems не имеет собственного производства чипов и размещала его в сторонних компаниях, но теперь сможет использовать ресурсы Infineon.

Заслуживает внимания и поглощение французской Omnic американской компанией MACOM [11]. Omnic специализируется на разработке СВЧ ИС по технологиям GaAs и GaN. В июле этого года во Франции задержали девятерых представителей руководства компании Omnic по подозрению в незаконной передаче технологий Китаю и России, а также в поставке им продукции в обход действующих санкций [12].

Первые подозрения появились в январе 2021 года после перехвата партии из 844 чи-

Таблица 1. Слияния и поглощения компаний на мировом рынке SiC

Регион	Приобретающая компания	Год	Приобретаемая компания	Основной бизнес
США	Wolfspeed	2006	Intrinsic Semiconductor	Подложки SiC
		2016	WATER	Силовые модули SiC
		2018	Infineon (подразделение по СВЧ)	СВЧ-приборы GaN-на-SiC
	On Semi	2021	GTAT	Слитки SiC
	II-VI	2020	INNOVION Corporation	Ионная имплантация
		2020	Ascatron AB	Эпитаксия SiC
	Qorvo	2021	UnitedSiC	Разработка силовых приборов SiC
	Transphom	2021	AFSW	Изготовление пластин GaN
	MACOM	2023	OMMIC SAS	Производство GaN и GaAs
	Veeco	2023	Epiluvac AB	Эпитаксиальное оборудование
Navitas	2022	GeneSiC	Разработка приборов SiC	
Littelfuse	2018	Monolith Semiconductor	Разработка силовых приборов SiC	
Европа	ST	2019	Norstel AB	Изготовление пластин SiC
		2020	Exagan	Разработка силовых приборов GaN
	Infineon	2018	Sillectra GmbH	Холодная резка пластин SiC
		2023	GaN Systems	Решения для преобразования энергии GaN
	Soitec	2019	EpiGaN	Эпитаксия GaN
		2021	NOVASiC	Полировка пластин SiC
BelGan	2022	On Semi (фабрика в Бельгии)	Изготовление пластин GaN	
ASM	2022	LPE	Эпитаксиальное оборудование SiC	
Япония	Showa Denko	2008	ESICAT Japan LLP	Эпитаксия SiC
		2017	Nippon Steel Sumitomo Metals (производственный бизнес по SiC)	Выращивание кристаллов SiC методом PVT
	Rohm	2009	SiCrystal	Подложки SiC
	Kyocera	2020	SLD Laser	Лазерный источник GaN
	Advantest	2022	CREATES	Испытания полупроводников
Южная Корея	SK Group	2019	DuPont (подразделение по SiC)	Подложки SiC
		2021	Yes Power	Разработка и изготовление SiC
	LX Semicon	2021	LG Innotek (некоторое оборудование и патенты)	Разработка силовых приборов SiC
	IV Works	2022	Saint-Gobain (бизнес подложек GaN)	Подложки GaN
Китай	China Resources Micro	2022	Runxin Micro	Разработка и изготовление приборов GaN
	Jingfang Technology	2023	VisiC (доля 51,7%)	Разработка силовых приборов GaN

пов, относящихся к технологиям двойного назначения, которые направлялись в Китай и которые компания не задекларировала должным образом. Позже следствие выявило целую сеть поставок подобных товаров не только в Китай, но и в Россию, причем как через Китай, так и через другие страны, в том числе Литву и Бельгию.

Особую обеспокоенность французских властей вызвало то, что 94% акций компании якобы контролировал 64-летний китайский бизнесмен через основанные во Франции фирмы. Утверждается, что он поставил на ключевые посты близких ему людей и даже отправлял работать в Китай французских инженеров, а также якобы создал в Китае аналогичную компанию, занимающуюся разработками в той же сфере.

Еще один пионер GaN-бизнеса — американская компания Navitas Semiconductor решила диверсифицировать и расширить его через приобретение компании GeneSiC, специализирующейся на дизайне SiC-изделий [13]. Разработчики и производители оборудования также положительно оценивают перспективы широкозонных полупроводни-

ков и покупают специализированные компании по эпитаксии, ионной имплантации, шлифовке, тестированию.

Не остаются в стороне и полупроводниковые гранды, расширяющие производственные мощности по ШЗП. Infineon Technologies выделяет 5 млрд евро на создание в Малайзии самой крупной в мире фабрики для 200-мм пластин SiC [14], а STMicroelectronics уже строит завод в Италии по производству исходных пластин карбида кремния стоимостью 730 млн евро [15] и сейчас планирует начать строительство в той же Италии завода стоимостью 5 млрд евро для выпуска SiC-чипов [16].

В связи со значительным ростом рынка SiC-продуктов начинает ощущаться нехватка исходных и эпитаксиальных пластин. Это вынуждает производителей чипов переходить к вертикальной интеграции бизнеса в своих компаниях и заключать долгосрочные контракты на поставки пластин SiC, что раньше не практиковалось так массово.

Японская компания Renesas Electronics подписала 10-летнее соглашение с Wolfspeed на сумму \$2 млрд на поставку исходных и эпи-

таксимальных SiC-пластин диаметром 150 и 200 мм [17]. Долгосрочные контракты стараются заключать и потребители полупроводниковых приборов SiC, применяющие их в силовых автомобильных блоках.

Производитель инверторов Vitesco Technologies заявил, что до 2030 года обеспечил стратегически важные мощности своего предприятия, заключив контракт на сумму более \$1 млрд с ROHM — поставщиком SiC-чипов [18]. Японские компании Denso и Mitsubishi Electric инвестируют по \$500 млн каждая в поставщика 150- и 200-мм подложек и эпитаксиальных пластин из карбида кремния — компанию Coherent в обмен на 12,5% неконтролирующей доли в бизнесе, а Coherent будет владеть оставшимися 75% [19]. Обе японские компании являются поставщиками Toyota Motors.

Однако тенденции долгосрочного согласования и распределения поставок пластин карбида кремния имеют и обратную сторону. То есть в 2024 году исходные и эпитластины SiC станут ограничивающим фактором для наращивания производства, а потому заранее резервируются изготовителями чипов. В свою очередь это подтверждает, что значительное снижение их цены в течение 2024-го и ближайших нескольких лет вряд ли произойдет и потребуются другие методы снижения стоимости чипов.

Таким классическим способом в полупроводниковой отрасли для кремния давно выросло уменьшение размеров чипов с помощью новых технологий. В частности, благодаря внедрению щелевой trench-технологии во все категории приборов — от простых диодов, MOSFET- и IGBT-транзисторов до суперсложных БИС. Поэтому повышение расходов на НИОКР по trench-технологии, помимо увеличения диаметра пластин, станет источником сокращения себестоимости и цен на продукцию ШЗП.

Один из мировых грандов производства по самым современным технологиям 12–28 нм компания GlobalFoundries (GF) в партнерстве с правительством США приближается к крупномасштабному производству чипов нового поколения на основе нитрида галлия [20]. GF получила федеральное финансирование в размере \$35 млн от правительства США для ускорения выпуска продукции по технологии GaN-на-кремнии на своем предприятии в Эссекс-Джанкшен, штат Вермонт.

Финансирование приближает GF к крупномасштабному производству чипов GaN для сотовой связи 5G и 6G для инфраструктуры и мобильных телефонов, автомобильного и промышленного «Интернета вещей», электросетей и другой критически важной инфраструктуры. Благодаря новому финансированию, предоставленному Управлением программы доверенного доступа (TAPO) Министерства обороны США, GF планирует приобрести дополнительное оборудо-

вание для расширения проектов по разработке и прототипированию, приближаясь к крупномасштабному производству 200-мм чипов GaN-на-кремнии. В рамках инвестиций компания заявляет о планах внедрить новые возможности для снижения как собственных рисков, так и рисков клиентов GF, что вызвано ограничениями в цепочках поставок галлия.

Компания OnSemi является наиболее ярким примером внутренней интеграции для производства SiC-продуктов по всему их технологическому циклу. В сентябре 2023 года OnSemi завершила строительство и ввод в эксплуатацию на своем заводе в южнокорейском Пучхоне новой линии по производству 150–200-мм пластин карбида кремния мощностью 1 млн пластин в год [21]. Вначале планируется изготавливать 150-мм пластины, а с 2025-го линия будет переведена на 200-мм, и в течение ближайших трех лет количество персонала увеличится на 1 тыс. человек с нынешних 2300 сотрудников.

Санкционная война затронула и рынок ШЗП. Китай ввел санкции на экспорт сырья галлия и германия, по которым доля Китая на мировом рынке составляет 80–90 и 60% соответственно, и все китайские поставщики этих материалов должны будут получать экспортные лицензии, что значительно усложнит поставки в США и другие страны. Уже в августе это привело к росту цен на галлий на мировом рынке на 50%, но пока не до конца понятно, как данные изменения отразятся на мировом рынке пластин нитрида и арсенида галлия, особенно для американских и европейских компаний.

SiC-транзисторы всех типов теснят кремниевые IGBT

Исторически кремниевые IGBT используются в приводах двигателей постоянного и переменного тока благодаря их способности выдерживать высокие токи, а также быстрой скорости переключения и низкой стоимости. Эти устройства имеют высокое нормируемое напряжение и низкое падение напряжения, что делает их хорошим вариантом для применения в разных областях.

Впрочем, у Si IGBT есть один существенный недостаток — они очень чувствительны к температуре эксплуатации, и когда температура устройства неконтролируемо возрастает, оно выходит из строя. В приложениях с приводами двигателей, где используются высокие токи, напряжения и имеют значение условия эксплуатации, например, в электромобилях или в непрерывном производственном цикле, это может представлять значительный риск. Подобные недостатки удается устранить с помощью SiC-транзисторов. Все категории таких транзисторов, включая классические SiC MOSFET, полевые транзисторы с управляющим переходом SiC JFET и биполярные SiC BJT благодаря более высоким скоростям переключения, рабочей частоте, термостабильности и низким потерям показывают лучшие результаты, нежели кремниевые IGBT.

На рис. 5 представлены совокупные потери включения и выключения транзисторов Si IGBT, SiC MOSFET и JFET с нормируемым напряжением 1200 В в зависимости от рабочего тока [22]. При низких токах различие между ними не очень значительное, но при повышении рабочего тока у SiC MOSFET и нормально выключенного JFET потери снижаются на 70–80%.

Карбидокремниевый BJT имеет очень низкое напряжение насыщения V_{cesat} , что позволяет уменьшить потери мощности более чем на 60% по сравнению с технологией Si IGBT с той же площадью кристалла. SiC BJT демонстрируют очень хорошую устойчивость к высоким температурам и испытаниям при температуре, превышающей +250 °С, а также при температуре до –80 °С.

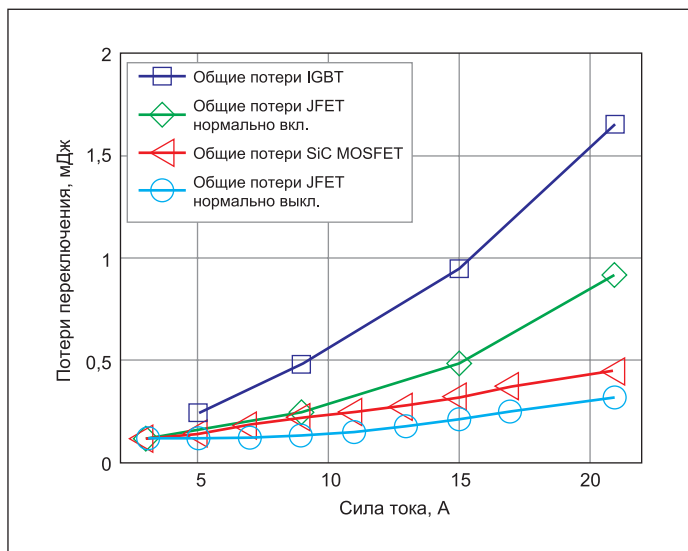


Рис. 5. Общие потери переключения Si IGBT, SiC MOSFET, нормально включенных и нормально выключенных SiC JFET-транзисторов

Таблица 2. Сравнение потерь переключения Si IGBT- и SiC BJT-транзистора

Прибор	Обратное напряжение, V_{br} , кВ	Ток коллектора, I_c , А	Температура, °С	Энергия потерь вкл. E_{on} , мДж	Энергия потерь выкл. E_{off} , мДж
SiC BJT	10	8	+150	4,2	1,6
Si IGBT	6,5	10	+125	80	40

Похожие результаты по потерям при включении и выключении получены у изделий с высоким обратным напряжением при измерении переключения SiC BJT на 10 кВ в сравнении с Si IGBT на 6,5 кВ от ABB, которые представлены в табл. 2 [23]. Можно видеть, что у транзистора BJT SiC потери энергии включения меньше в 19 раз, а потери энергии выключения меньше в 25 раз, чем у кремниевого IGBT, хотя он и работает при более высокой температуре (+150 °C) по сравнению с Si IGBT, функционирующим при +125 °C.

Благодаря этим преимуществам в ближайшие годы широкозонные транзисторы будут уверенно вытеснять на рынке кремниевые аналоги (рис. 3). Подобное давно происходит с кремниевыми СВЧ LDMOS-транзисторами, уступающими рынок SiC- и GaN-аналогам.

Технология 3D GaN FinFET

В современной кремниевой КМОП интегральной микроэлектронике FinFET-архитектура транзисторов главенствует в техпроцессах 22–3 нм. Но еще год назад было невозможно представить, что так быстро ее можно перенести в GaN-техпроцесс. Finwave Semiconductor, стартап из Массачусетского технологического института, первым разработал и запатентовал технологию 3D GaN (рис. 6а) [24]. «Технология 3D GaN FinFET является результатом более чем 10-летних исследований и разработок, первоначально созданных в Массачусетском технологическом институте и отмеченных в 2012 году престижной премией Джорджа Смита IEEE Electron Device Society», — отметил Бин Лу, генеральный директор и соучредитель Finwave. «Решив многочисленные производственные задачи и успешно создав производственный процесс с использованием стандартных 8-дюймовых кремниевых КМОП-процессов, Finwave лидирует в коммерциализации технологии 3D GaN для 5G», — добавил он.

Этот процесс может быть внедрен на 200-мм пластинах GaN-on-Si на фабриках по выпуску КМОП-изделий. Finwave Semiconductor привлекла \$12,2 млн финансирования после получения гранта в размере \$4,3 млн от правительства США. Деньги будут использованы для доведения технологии 3D GaN FinFET до массового производства. В компании отмечают, что технология Finwave стремится произвести революцию в энергоэффективных коммуникациях 5G/6G, центрах обработки данных, автомобилестроении, IoT и многом другом. Она позволяет в 10 раз повысить мощность 5G-усилителей и улучшить линейность и на 80% снизить затраты (рис. 6б) [25]. Это означает более высокую эффективность GaN-усилителей, меньшее рассеивание тепла и более длительное время автономной работы.

С точки зрения энергопотребления GaN всегда предпочтительнее, чем такие устройства, как кремниевые MOSFET- и гетеропереходные биполярные транзисторы (HBT) на основе фосфида индия (InP), которые являются конкурентами для приложений на частоте 100 ГГц, в частности 6G. Для работы на частоте 100 ГГц необходимо масштабирование и уменьшение размеров транзисторов, и для этих целей оптимальна транзисторная архитектура 3D GaN Finwave. Компания Finwave заявила, что ее технология подавляет эффект короткого канала в усилителях и позволяет на 200- и 300-мм пластинах непрерывно масштабировать транзисторы GaN от 130 нм до более низких проектных норм.

Пластины алмаза от DIAMFAB

Образование и стремительный рост стартапов очень характерны для новых направлений материалов и приборов. К таковым относится и DIAMFAB — дочерняя компания Французского национального центра научных исследований (CNRS) [26], базирующаяся в Гренобле. Опыт ее работы базируется на 30-летних исследованиях в области выращивания высококачественных синтетических алмазов, которые проводит команда Institut Néel-CNRS по широкозонным полупроводникам. В 2016 году был основан проект DIAMFAB, а в 2019-м зарегистрирован стартап.

По заявлениям DIAMFAB, по сравнению с существующими полупроводниковыми материалами алмаз обладает тремя ключевыми

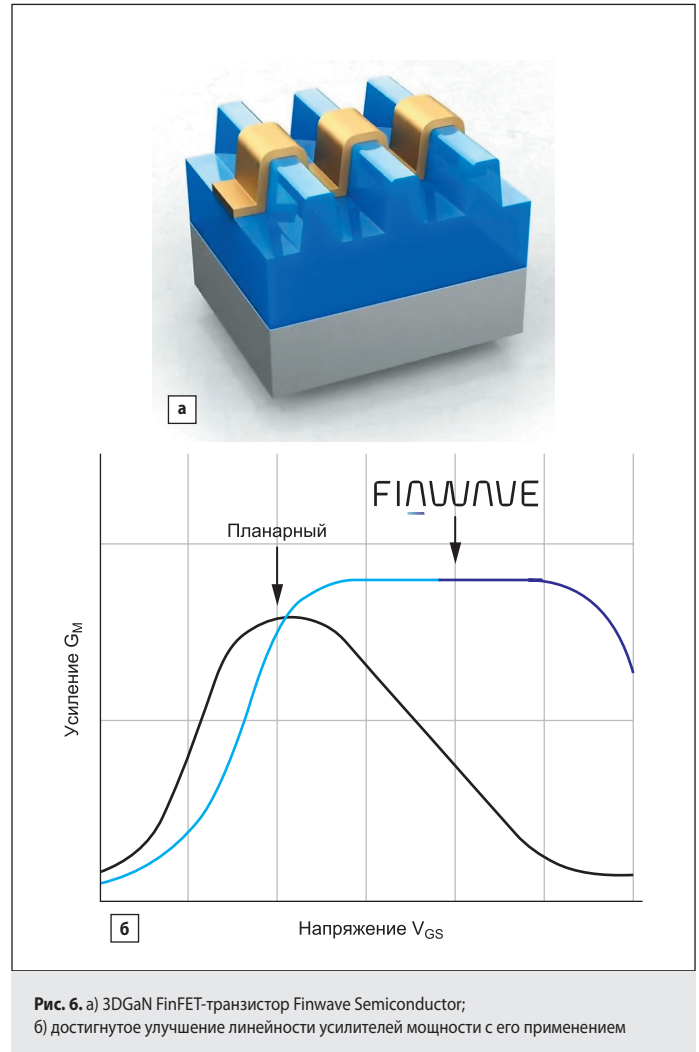


Рис. 6. а) 3D GaN FinFET-транзистор Finwave Semiconductor; б) достигнутое улучшение линейности усилителей мощности с его применением

преимуществами: управление температурой, оптимизация затрат и эффективности и сокращение выбросов CO_2 . В отличие от большинства полупроводников, с повышением температуры у алмаза происходит уменьшение удельного сопротивления.

Таким образом, устройства, изготовленные из этого материала, лучше работают при +150 °C (типичная рабочая температура для силовых устройств), чем при комнатной температуре. Алмаз также хорошо рассеивает тепло. Благодаря этим особенностям преобразователи, изготовленные из алмаза, могут быть в 5 раз легче и меньше, чем решения на основе кремния, и в 3 раза легче и меньше, чем преобразователи на основе SiC.

Если основное внимание уделяется снижению стоимости устройства, можно спроектировать чип из алмаза, который на 30% дешевле чипа из карбида кремния, потому что у него в 50 раз меньшая площадь, чем у эквивалентного SiC, при тех же электрических характеристиках и эффективности, но с лучшим управлением температурой — утверждают в DIAMFAB. Когда речь идет об эффективности, алмаз может сократить потери энергии втрое по сравнению с SiC, но с чипом в 4 раза меньше, что позволяет напрямую экономить энергопотребление. Кроме того, позволяя увеличить частоту переключения, алмазные устройства могут уменьшить объем пассивных компонентов в 4 раза по сравнению с преобразователями на основе карбида кремния. Все эти преимущества незаменимы при использовании изделий из алмаза в спутниковом оборудовании.

Электромобильность является приоритетным сегментом для DIAMFAB, и недавно компания подала заявку на патент на полностью алмазный конденсатор для электромобилей. Идея полностью алмазного конденсатора возникла, когда производитель промыш-

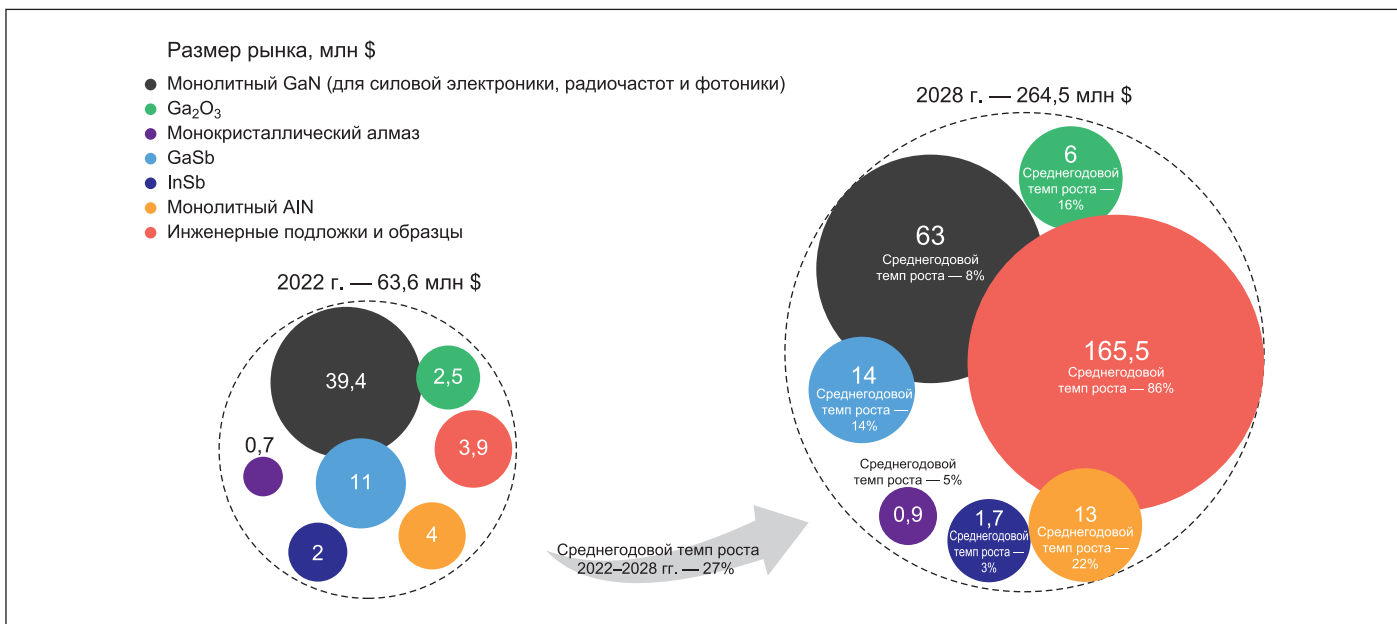


Рис. 7. Мировой рынок новых полупроводниковых подложек в 2022–2028 гг. от YOLE

ленных конденсаторов заявил, что ищет пассивно-компонентное решение для защиты активных компонентов на основе SiC и GaN, таких как диоды и транзисторы, поскольку активные устройства подвергались пикам напряжения, которые были выше, чем они могли выдержать (более 1500 В). Такая потребность особенно актуальна в связи с переходом питания электромобилей на 800 В.

Компания определила двойную бизнес-модель, в соответствии с которой будет продавать свои технологии как напрямую, так и через стратегические партнерства и альянсы, ориентированные на приложения. Во-первых, DIAMFAB планирует продавать алмазные пластины с высокой добавленной стоимостью и производственные процессы для алмазных компонентов изготовителям интегрированных устройств. Во-вторых, DIAMFAB намерена продавать высокопроизводительные алмазные устройства напрямую конечным пользователям на основе подхода к совместной разработке.

Как считают в компании, увеличение диаметра пластины с 0,5 до 4 дюймов позволит DIAMFAB достичь конкурентоспособности, необходимой для автомобильного рынка. По мнению компании, важно и то, что производство алмазных пластин в 20 раз снижает выбросы CO₂ в сравнении с карбидом кремния.

Оксид галлия

Как утверждает TrendForce [27], рост числа приложений, требующих высокого напряжения температуры и частоты, продолжает увеличиваться, и оксид галлия Ga₂O₃ становится сильным соперником для силовых полупроводниковых устройств следующего поколения.

Это особенно актуально в таких секторах, как электромобили, электросетевые системы и аэрокосмическая промышленность. По сравнению с карбидом кремния и нитридом галлия, выращенными из газовой фазы, кристаллы оксида галлия могут быть получены методами выращивания расплава, аналогичными тем, которые используются для кристаллов кремния.

Это дает большой потенциал для снижения затрат, хотя автор настоящей статьи и готов поспорить с данным утверждением. Сегодня промышленность реализовала массовое производство 4-дюймовых пластин оксида галлия, а в ближайшие годы планирует расширить производство до 6-дюймовых.

Во то же время были достигнуты значительные успехи в структурном проектировании и процессах изготовления диодов Шоттки и транзисторов на основе материалов из оксида галлия. Ожидается, что первая партия диодов Шоттки появится на рынке к 2024 году и потенциально станет первым коммерческим компонентом питания на основе оксида галлия. И хотя у оксида галлия по-прежнему остаются такие проблемы, как плохая теплопроводность и отсутствие легирования р-типа, ожидается, что с привлечением крупных игроков в энергетической полупроводниковой промышленности и расширением ключевых приложений, коммерциализация не за горами.

В июле 2023 года произошло знаковое событие в зарождающемся бизнесе оксида галлия. Японская Mitsubishi Electric объявила о приобретении еще одной японской компании Novel Crystal Technology (NCT) [28], основанной в 2012-м Национальным институтом информационных и коммуникационных технологий (NICT) и Tamura Corporation [29].

В NICT был представлен первый монокристаллический транзистор β-галлия на оксиде галлия с напряжением пробоя, превышающим 250 В. В том же году NCT совершила прорыв в 2-дюймовых пластинах оксида галлия и технологии эпитаксии, а затем в 2014-м наладила массовое производство материалов из Ga₂O₃.

В 2017 году в сотрудничестве с корпорацией Tamura был успешно разработан первый в мире силовой МОП-транзистор на основе оксида галлия, который значительно снизил энергопотребление до одной тысячной по сравнению с традиционными МОП-транзисторами. В 2019 году были разработаны 2-дюймовые пластины β-оксида галлия, а в 2021-м NCT успешно наладила серийное производство 4-дюймовых пластин на основе оксида галлия и начала поставлять их клиентам, установив лидирующие позиции Японии в гонке составных полупроводников 3-го поколения. В настоящее время NCT является единственной компанией в мире, серийно выпускающей 100-мм монокристаллические пластины β-Ga₂O₃.

К 2023–2024 гг. NCT планирует поставлять 150-мм пластины, и это будет очень серьезный прорыв в данной сфере, направленный на снижение стоимости чипов из оксида галлия. Сам факт покупки NCT компанией Mitsubishi Electric говорит о многом. В настоящее время материалы на основе оксида галлия и технологии их применения находятся на промежуточной стадии перехода — от научных достижений к коммерческому применению. Дальнейшие перспективы оксида галлия многообещающи, и несколько компаний предпринимают шаги, чтобы извлечь выгоду из этого потенциала. Mitsubishi Electric, много лет работающая в сфере продуктов SiC,

тоже хорошо понимает это и вкладывается в новое направление именно сейчас.

Однако не следует ожидать очень быстрых темпов коммерциализации оксида галлия. Прикладные исследования в этом направлении стартовали позднее, чем изучение нитрида галлия, и тем более карбида кремния. Кроме снижения стоимости технологий и продуктов, предстоят большие научные и прикладные работы по их совершенствованию и оптимизации. По данным YOLE Group, в 2022 году мировой рынок пластин оксида галлия составлял всего \$2 млн, а до 2028-го он будет расти со среднегодовыми темпами 16% и в 2028 г. достигнет показателя \$6 млн (рис. 7) [30].

Еще одно важное событие произошло в технологии производства пластин оксида галлия. Одним из основных недостатков технологии оксида галлия считалась сложность получения в нем областей р-типа. В марте 2023 года японские компании FLOSFIA Inc. и JSR Corporation объявили о совместной разработке нового материала для пленочного осаждения на основе иридия в качестве решения для массового производства оксида галлия иридия (альфа-(IrGa)₂O₃).

Это первый в мире силовой полупроводник р-типа разработан компанией FLOSFIA для применения в сочетании с оксидом галлия корундового типа (альфа-Ga₂O₃). Оксид иридия-галлия, используемый в сочетании с оксидом галлия, был успешно продемонстрирован в структуре траншейной конструкции диода (рис. 8а,б) [31].

Появилось сообщение о создании и первой демонстрации флэш-памяти на Ga₂O₃, выращенном методом импульсного лазерного осаждения на сапфировой подложке [32]. Это пока выглядит экзотически, но именно с таких исследований начинается расширение горизонтов применения новых материалов и технологий.

В сентябре в российских СМИ было опубликовано короткое сообщение о том, что отечественная компания «Рокор» из состава ОЭЗ «Технополис Москва» разработала новую технологию производства монокристаллических пластин из оксида галлия [33]. К сожалению, сообщение носит скорее рекламный характер, и никакой подробной информации по достигнутым параметрам в результате этой разработки нет.

И одним из главных показателей является размер и диаметр полученных слитков и пластин. Если он будет меньше 76–100 мм, то даже при решении всех технических вопросов разрекламированные перспективы его поставки на мировой рынок проблематичны, поскольку там уже представлены 100-мм и анонсированы 150-мм пластины. Но для внутреннего применения это станет достижением. Насколько полученные результаты будут соответствовать необходимым требованиям, можно судить только после появления новой более подробной информации.

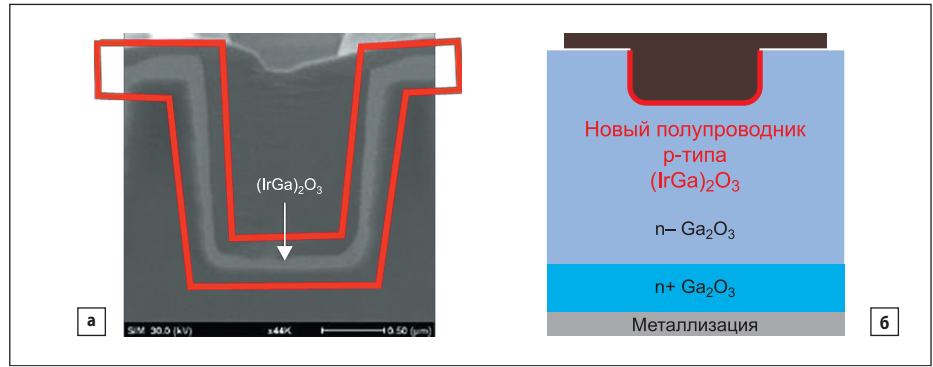


Рис. 8. а) Trench-конструкция нового материала (IrGa)₂O₃; б) структура диода с его применением от компании FLOSFIA

Выводы

1. Мировой рынок изделий на основе ШЗП является самым динамично и устойчиво развивающимся среди продуктов полупроводниковой микроэлектроники, не снижающимся даже в период кризиса.
2. Темпы роста и сроки освоения новых продуктов ШЗП и особенно эволюция увеличения диаметра пластин на мировом рынке заметно превосходят исторические этапы развития кремниевой продукции.
3. С каждым годом открываются новые сферы применения ШЗП в космической, авиационной, коммуникационной области, что гарантирует рост их рынка в среднесрочной и долгосрочной перспективе.
4. Вследствие роста рынка ШЗП в мировой полупроводниковой отрасли в последние годы резко ускорились процессы внутренней интеграции производства, слияния и поглощения крупными компаниями специализированных предприятий и стартапов по ШЗП. Полупроводниковые многопрофильные гранды Infineon, STM, OnSemi, Renesas, GlobalFoundries и другие активно расширяют свой бизнес по ШЗП, подтверждая его перспективы.
5. Разработка технологии 3DGaN FinFET проложила направление масштабирования техпроцессов ШЗП в область менее 100 нм и их интеграции и универсализации с самой передовой современной КМОП FinFET-технологией.
6. Все типы биполярных и полевых SiC-транзисторов демонстрируют преимущества по потерям, скорости переключения, рабочей частоте по сравнению с кремниевыми IGBT-транзисторами, что по мере снижения цены SiC-аналогов приведет к постепенному вытеснению кремниевых IGBT на рынке силовой электроники.
7. Прогресс технологии получения и увеличения диаметра пластин алмаза до 100 мм и оксида галлия до 150 мм обещает усиление их рыночных позиций и снижение цен на продукцию, созданную на их основе, а также переход от исследований к серийному производству.

8. Получены положительные результаты исследований японской компанией FLOSFIA по технологии формирования областей р-типа в оксиде галлия, что является одним из самых больших и ограничивающих недостатков оксида галлия. ■

Литература

1. Боднар Д. Полупроводниковая микроэлектроника — 2022 г. Часть 2. Широкозонные полупроводники — мировые фавориты в новых производствах и научных разработках // Электронные компоненты. 2023. № 1.
2. Power SiC 2023. YOLE Group. August 2023. www.yolegroup.com
3. Power GaN 2023. YOLE Group. August 2023. www.yolegroup.com
4. Power SiC and GaN Compound Semiconductor Market Monitor Q3 2023. September 2023. www.yolegroup.com
5. Power SiC/GaN CS Market Monitor Q1 2023. March 2023. www.yolegroup.com
6. Боднар Д. Полупроводниковая микроэлектроника — 2020 г. Часть 5. Широкозонные полупроводники как главный инструмент повышения энергоэффективности электроники // Электронные компоненты. 2021. № 4.
7. Airbus and STMicroelectronics collaborate on power electronics for aircraft electrification. Airbus. June 20, 2023. www.airbus.com
8. NexGen Announces Production Availability of World's First 700V and 1200V Vertical GaN Semiconductors with Highest Switching Frequencies. NexGen Power Systems. www.nexgenpowersystems.com
9. The battle for SiC — the market landscape continues to change. Evertiq. June 29, 2023. www.evertiq.com
10. Infineon completes acquisition of GaN Systems, becoming a leading GaN power house. Infineon Technologies AG. October 24, 2023. www.infineon.com
11. MACOM completes acquisition of OMMIC. Semiconductor Today. June 1, 2023. www.semiconductor-today.com
12. Франция арестовала топ-менеджмент «ИТ-гордости» за передачу России и Китаю технологий выпуска чипов. Время электроники. 27.07.2023. www.russianelectronics.ru

13. Navitas acquires GeneSiC, accelerating entry into EV, solar and energy storage markets by 2-3 years. Semiconductor Today. August 16, 2022. www.semiconductor-today.com
14. Infineon to build the world's largest 200-millimeter SiC Power Fab in Kulim, Malaysia, leading to total revenue potential of about seven billion euros by the end of the decade. Infineon Technologies. August 3, 2023. www.infineon.com
15. STMicroelectronics to build integrated Silicon Carbide substrate manufacturing facility in Italy. STMicroelectronics. October 5, 2022. www.st.com
16. STMicroelectronics will build a chip factory in Italy for 5 billion euros. Tech News Space. October 2023. www.technewsspace.com
17. Renesas and Wolfspeed Sign 10 Year Silicon Carbide Wafer Supply Agreement. Renesas Electronics Corp. July 5, 2023. www.renesas.com
18. Vitesco Technologies and ROHM have signed a long-term SiC supply partnership. ROHM Semiconductor. June 19, 2023. www.rohm.com
19. Coherent's Silicon Carbide Semiconductor Business to Receive Investments from DENSO and Mitsubishi Electric. Coherent Corp. October 10, 2023. www.coherent.com
20. GlobalFoundries Awarded \$35 Million Funding from U.S. Government to Accelerate Manufacturing of Next-Generation GaN Chips. GlobalFoundries. October 18, 2023. www.gf.com
21. OnSemi Completes Expansion of Silicon Carbide Production Facility in Bucheon, South Korea. OnSemi. October 24, 2023. www.onsemi.com
22. Comparison of switching performance for commercial Silicon Carbide power devices. Power Electronics News. November 28, 2022. www.powerelectronicsnews.com
23. 10 kV SiC BJTs — static, switching and reliability characteristics. Proceedings of the 25th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, Kanazawa. GeneSiC Semiconductor, Inc.
24. Finwave to Push GaN Technology Boundaries. EE Times Europe. October 17, 2023. www.eetimes.eu
25. Finwave Semiconductor, Inc. www.finwavesemi.com
26. DIAMFAB, an innovative company expert in electronic grade diamond. DIAMFAB. Diamfab.com
27. TrendForce 2024: Riding the Wave of Revolutionary Tech Trends. TrendForce Corp. October 17, 2023. www.trendforce.com
28. Mitsubishi Electric Buys Stake in Novel Crystal Technology to Accelerate Development of Gallium-oxide Power Semiconductors. Mitsubishi Electric Corp. July 28, 2023. www.MitsubishiElectric.com
29. Novel Crystal Technology Inc. www.novelcrystal.co.jp
30. Emerging Semiconductor Substrates 2023. YOLE Group. June 2023. www.yolegroup.com
31. FLOSFIA and JSR progress toward practical use of the world's first P-type semiconductor, Iridium Gallium Oxide. FLOSFIA. March 15, 2023. www.flosgfia.com
32. Gallium oxide flash memory. Semiconductor Today. July 6, 2023. www.semiconductor-today.com
33. Россияне освоили революционный метод производства пластин для выпуска микросхем. Он в два раза дешевле иностранного. CNews. 27 сентября 2023 г. www.cnews.ru