

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА – 2021 г.

БЕСПРЕЦЕДЕНТНЫЙ ГОД ДЛЯ МИРОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

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



Мировая пандемия COVID-19 оказала сильное влияние на результаты минувшего 2021 г., в т. ч. на рынок и развитие мировой электронной промышленности. Главным стал тотальный дефицит полупроводниковых изделий, отразившийся на всей мировой экономике и особенно на автомобильной промышленности. Повышенный спрос на электронные компоненты способствовал увеличению частных и государственных инвестиций в электронику, расширению и созданию новых производств, значительному росту мирового полупроводникового рынка, впервые преодолевшего рубеж в 500 млрд долл. Побочными итогами стали сильный рост цен на электронные товары и материалы, увеличение сроков поставок, нехватка квалифицированных кадров и рост общемировой инфляции.

ДЕФИЦИТ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ. МИРОВАЯ ОТРАСЛЬ ВКЛЮЧИЛА ФОРСАЖ, БЬЕТ РЕКОРДЫ, НО НЕ СПРАВЛЯЕТСЯ

2021 г. оказался уникальным для мировой электронной промышленности. Никогда еще за всю ее историю мир не сталкивался со столь очевидным и значительным дефицитом электронных компонентов, ростом цен на них и применяемые материалы, а также с нехваткой производственных мощностей для их выпуска. Согласно прогнозу ассоциации WSTS, темпы роста мирового полупроводникового рынка в 2021 г. составят 25,1% (см. табл.) [1], что является вторым показателем с 2001 г. Только однажды в 2010 г. рост был более заметным и составил 26% (см. рис. 1) [2].

WSTS скорректировала свой предыдущий прогноз, опубликованный всего несколько месяцев до этого, где указывался

более скромный темп роста величиной 19,7%. Большой рост в 2010 г. был связан с эффектом низкой базы из-за существенного спада рынка на 9% во время мирового экономического кризиса в 2008–2009 гг. Объем мирового полупроводникового рынка в 2021 г. достигнет рекордных показателей и составит 550 млрд долл., впервые в истории отрасли превысив этот рубеж.

Вероятно, в начале 2022 г. после уточнения фактических отраслевых показателей за прошедший год эта величина скорректируется, и темпы роста в минувшем году станут лучшими за последние 20 лет. Рост происходит во всех мировых регионах в отношении продукции всех типов, что наблюдается в мировой полупроводниковой промышленности не так часто. Максимальным (на 37,1%) станет рост в сегменте микросхем памяти, в котором два года назад наблюдалось падение.

Таблица. Прогноз мирового полупроводникового рынка за период 2021–2022 гг. от ассоциации WSTS

	Сумма, млрд долл.			Изменения год/год, %		
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Америка	95,366	115,868	129,773	21,3	21,5	12,0
Европа	37,520	47,440	51,138	–5,8	26,4	7,8
Япония	36,471	42,913	45,893	1,3	17,7	6,9
Азиатско-Тихоокеанский регион	271,032	344,656	379,678	5,1	27,2	10,2
Итого в мире, млрд долл.	440,389	550,876	606,482	6,8	25,1	10,1
Дискретные п/п приборы	23,804	29,389	30,936	–0,3	23,5	5,3
Оптоэлектроника	40,397	43,137	44,967	–2,8	6,8	4,2
Сенсоры	14,962	18,666	19,790	10,7	24,8	6,0
Интегральные микросхемы	361,226	459,685	510,788	8,4	27,3	11,1
Аналоговые	55,658	71,882	76,757	3,2	29,1	6,8
Микропроцессоры	69,678	77,305	80,922	4,9	10,9	4,7
Логические ИС	118,408	149,388	162,341	11,1	26,2	8,7
Память	117,482	161,110	190,769	10,4	37,1	18,4
Итого по всем изделиям, млрд долл.	440,389	550,876	606,482	6,8	25,1	10,1

Примечание. Цифры в таблице округлены до целых значений в млрд. долл., из-за чего могут возникать небольшие несоответствия в полях «Итого» по типам изделий и регионам.

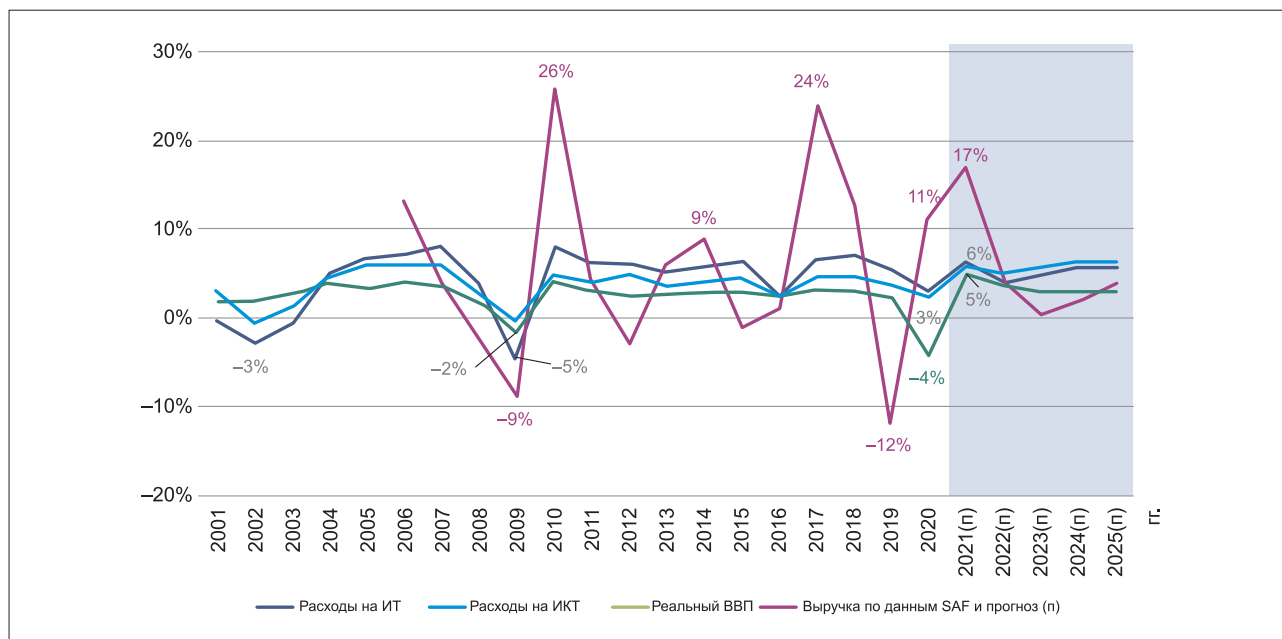


Рис. 1. Темпы изменения мирового полупроводникового рынка за 2001–2025 гг.

Очевидно, что столь высокие темпы роста связаны с существенным дефицитом электронных компонентов в 2021 г. Они стали бы заметнее, если бы мировая полупроводниковая промышленность была в состоянии обеспечить производство всей заказываемой продукции. В 2022 г. организация WSTS также предполагает дальнейший подъем мирового полупроводникового рынка на 10,1% до 606 млрд долл.

Компания IC Insights представила отчет по мировому рынку группы оптоэлектроники, датчиков и дискретных продуктов (O-S-D) (см. рис. 2) [3]. Ожидается, что мировые продажи в 2021 г. вырастут на 18% до 104,3 млрд долл. с 88,3 млрд долл. в 2020 г., когда эта группа рынка полупроводников увеличилась менее чем на 3%. O-S-D-изделия обеспечивают около 18% мировых продаж полупроводников, а остальная их часть (82%) приходится на интегральные схемы.

25 лет назад на продукцию O-S-D приходилось менее 13% доходов от производства полупроводников. Рыночная группа O-S-D с середины 1990-х гг. постепенно обеспечивала постоянно увеличивавшуюся долю доходов от полупроводников из-за стабильного и часто значительного ежегодного роста производства датчиков, приводов, КМОП датчиков изображения, лазерных передатчиков и светодиодов высокой яркости.

Этому способствовали увеличение выпуска смартфонов, оснащенных цифровыми камерами и датчиками, а также высокоскоростная связь, интернет вещей (IoT) и недавний рост приложений искусственного интеллекта (ИИ), встраиваемых в большее количество систем. Ожидается, что в 2021 г. выручка

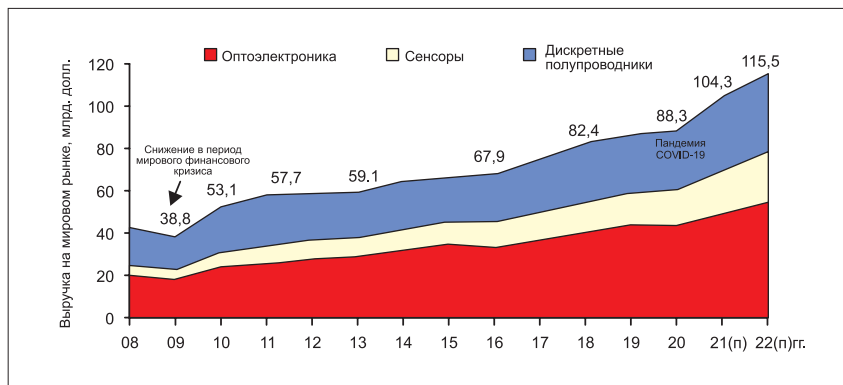


Рис. 2. Мировой рынок оптоэлектроники, датчиков, дискретных полупроводников за 2008–2022 гг.

от дискретных полупроводников после небольшого роста менее чем на 3% в 2020 г. (до 27,8 млрд долл.) вырастет примерно на 26% до 35,0 млрд долл., что станет четвертым среди самых больших годовых темпов роста за последние 40 лет в этом сегменте полупроводников. Согласно прогнозу IC Insights, в 2022 г. общий объем продаж изделий O-S-D вырастет на 11% до 115,5 млрд долл.

Нехватка электронных компонентов в минувшем году сопровождалась торможением развития многих отраслей мировой промышленности, и, в первую очередь, автомобильной. Этот дефицит тайфуном прошел не только по всем мировым автопроизводителям, останавливавшим конвейеры и снижавшим выпуск автомобилей, но разрушил бизнес небольших и средних компаний смежников, поставлявших комплектующие и оборудование для автопрома.

Так, пять компаний в Германии – основном европейском производителе автомобилей, выпускающих кузовные пресс-формы и комплектующие, заявили о банкротстве и неплатежеспособности из-за снижения заказов автопромом [4].

Причинам дефицита электронных компонентов посвящено немало аналитических материалов, но основными среди этих причин являются три: продажа и опустошение складов производителей и потребителей компонентов во время мирового локдауна; резко возросшая потребность в электронике для возобновивших работу производств и пополнения складских запасов после его окончания; повышенный ажиотажный спрос из-за увеличения сроков поставки и отказов поставщиков.

Для гарантированного исполнения заказов даже крупные покупатели стали предлагать предоплату, что прежде не практиковалось. Все остальные причины, включая сложные климатические условия и катастрофы в США, Тайване, Японии, важны, но не являются определяющими и в разной степени происходили прежде.

Генеральный директор Apple Тим Кук оценил потери своей компании от отсутствия микросхем в 6 млрд долл. [5]. Эксперты компании AlixPartners уже третий раз за год пересматривают свой прогноз по мировому автомобильному рынку.

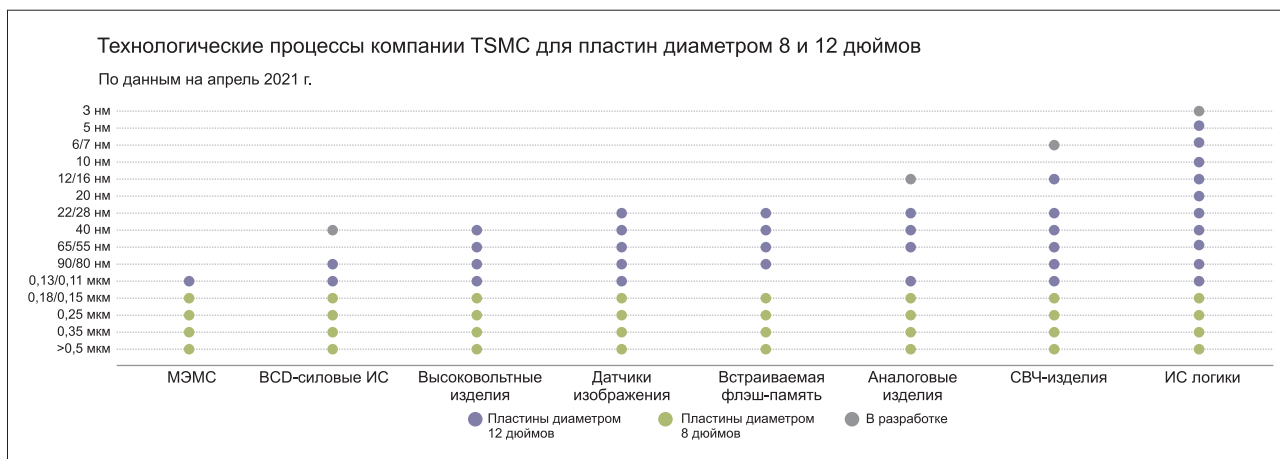


Рис. 3. Диаметр пластин для разных технологий компании TSMC

В новейшей версии он гласит, что объемы выпуска автомобилей в 2021 г. сократятся на 7,7 млн шт., а потери автопроизводителей из-за нехватки полупроводниковых компонентов достигнут 210 млрд долл. [6]. Еще в мае аналитики AlixPartners рассчитывали на снижение выручки автопроизводителей на 110 млрд долл. по итогам текущего года, а потери в натуральном выражении прогнозировали на уровне 3,9 млн автомобилей, которые не смогут быть выпущены из-за дефицита чипов.

Теперь оба показателя увеличились почти в два раза. Производители полупроводниковых компонентов для автопромышленности NXP, Texas Instruments, Infineon, ON Semiconductor, Microchip резко повысили срок исполнения заказов с 12 недель в 2020 г. до 21,7 недель к сентябрю 2021 г. [7]. Однако даже эти сроки не соблюдаются.

Самые большие потери из-за нехватки электронных компонентов понесут Ford (падение выпуска в 2021 г. – 700 тыс. автомобилей), Stellantis (марки Fiat, Citroen, Chrysler, Dodge, Jeep – падение на 600 тыс.) и альянс Renault-Nissan-Mitsubishi (падение на 415 тыс.). В компании Stellantis заявили, что потери от дефицита полупроводников оказались существенно выше, чем от пандемии и остановки заводов в 2020 г.

Высокий спрос на электронные компоненты в 2021 г. привел к перераспределению производственных мощностей на фабриках производства пластин и чипов. До 2019 г. увеличивалась их производительность на пластинах диаметром 300 мм для новых современных процессов и, наоборот, падала для 200-мм пластин на фабриках по зрелым технологиям. Этому способствовали новые изделия для смартфонов, внедрение 5G, технологии управления электропитанием и т. д. В результате ведущие мировые производители чипов TSMC, UMC и др. наращивали мощности производства на основе 300-мм, а не 200-мм пластин.

Так, компания TSMC использует 300-мм пластины для технологий 130 нм и менее (см. рис. 3) [8], хотя у многих других фабрик переходными являются техпроцессы 65–90 нм. Несмотря на то, что исходные 200-мм пластины значительно дешевле 300-мм, экономические показатели себестоимости чипов на 300-мм пластинах лучше.

Еще одной проблемой для компаний, эксплуатирующих фабы с оборудованием для 200-мм пластин, является то, что производители оборудования потеряли интерес к 200-мм производству и массово переориентировались на оборудование для обработки 300-мм пластин. Как правило, оборудование для 300-мм пластин позволяет обрабатывать и 200 мм, но стоимость его значительно выше и использовать его для меньшего диаметра экономически невыгодно.

Таким образом, даже не ведущие фабрики чипов стали переводить их на 300-мм пластины. Это затронуло не только

технологии менее 110 нм, но даже производство некоторых дискретных приборов. Так, например, китайская компания Hua Hong Semiconductor впервые в мире переводит производство транзисторов Trench FS IGBT в городе Уси с 200- на 300-мм пластины [9]. В результате уже с 2019 г. стала ощущаться нехватка производственных мощностей для 200-мм пластин. Пандемия и тотальный дефицит электронных компонентов только усугубили проблему, а контрактные производители чипов TSMC, UMC, SMIC увеличили инвестиции в производство по зрелым техпроцессам [10]. Китайский полупроводниковый лидер SMIC инвестирует 8,87 млрд долл. в строительство новой фабрики в Шанхае производительностью 100 тыс. 300-мм пластин в месяц по 28-нм технологии.

Значительный рост полупроводникового рынка привел к увеличению заказов кремниевых пластин, их дефициту, удлинению сроков поставки и, как следствие, к росту цен на них. Согласно прогнозам SEMI, глобальные поставки кремниевых пластин будут стабильно расти до 2024 г.; при этом суммарная площадь пластин увеличится на 13,9% в годовом исчислении в 2021 г. до рекордного уровня почти в 14 000 млн кв. дюймов [11]. Ожидается, что в последующие годы импульс роста сохранится, но его можно сдержать замедлением темпов макроэкономического восстановления и сроками добавления мощностей по производству пластин, необходимых для удовлетворения растущего спроса.

Увеличение производственных мощностей, запуск новых заводов и производственных линий привел к сильному росту инвестиций и затрат на полупроводниковое оборудование для фабрик чипов. В 2021 г. они достигнут нового рекорда и превысят 90 млрд долл. при темпах роста 44%, но уже в 2022 г. превзойдут этот рекорд и вырастут еще на 8% почти до 100 млрд долл. (см. рис. 4) [12]. На рынке поддержанного оборудования также резко возрос спрос, вследствие чего запасы оборудования на вторичном рынке сильно истощены и сроки его продажи, особенно для 200 мм, резко сократились.

TrendForce прогнозирует, что общая емкость производства 200-мм пластин в отрасли будет расти со средним годовым темпом 3–5% с 2019 по 2023 гг., тогда как емкость 300-мм пластин будет увеличиваться в среднем в год на 11–13% за тот же период [13]. Несколько контрактных производителей, включая SMIC, занимаются расширением своих 28-нм производственных мощностей, в первую очередь, потому, что транзисторная архитектура ниже 20 нм требует перехода с Planar FET на архитектуру FinFET, что обходится относительно дорого. TrendForce считает, что 28-нм техпроцесс представляет собой золотую середину по соотношению цена/качество и широко используется для производства таких основных продуктов как чипы Wi-Fi для



Рис. 4. Мировой рынок расходов на оборудование для производства чипов за период 2016–2022 гг.

ноутбуков, микросхемы OLED-драйверов для смартфонов, автомобильные микроконтроллеры и процессоры сигналов изображения.

Кроме того, микросхемы, используемые для интернета вещей, включая умную бытовую технику и телевизионные приставки, а также другие изделия, которые в настоящее время производятся по технологии 40 нм, вероятно, будут переведены на 28-нм производство, а это значит, что спрос на емкость 28 нм продолжит расти в будущем.

Прогнозы центра исследований ReportLinker по мировому рынку полупроводниковой промышленности крайне оптимистичные. Ожидается, что за период с 2021 по 2026 гг. среднегодовые темпы роста составят 7,7%, а объем рынка к 2026 г. достигнет впечатляющего показателя – 778 млрд долл. [14]. Основными драйверами этого рынка являются увеличение цен на полупроводники из-за нехватки предложения, рост беспроводной связи, спрос на передовые функции безопасности в автомобилестроении и увеличение числа подключенных к интернету устройств, спрос на полупроводники в искусственном интеллекте и в технологиях автономного вождения. Компания IC Insights прогнозирует рост поставок микросхем с 2020 по 2025 гг. при среднегодовом темпе 11%, тогда как за период с 2015 по 2020 гг. этот показатель составил 6% [15]. Снижение поставок микросхем – редкое явление в мировой микроэлектронике. Оно наблюдалось всего пять раз: в 1985, 2001, 2009, 2012 и 2019 гг. и ни разу не длилось два года подряд.

TSMC МЕНЯЕТ СТРАТЕГИЮ. ДРУГИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ГРАНДЫ АКТИВНО СТРОЯТ НОВЫЕ ФАБРИКИ

2021 г. окончательно ознаменовался изменением долгосрочной стратегии действий ведущего мирового контрактного производителя чипов – компании TSMC. До текущего года при расширении производственных мощностей (иногда даже носивших авральный характер) TSMC всегда ориентировалась на Тайвань и отказывалась от производственной экспансии в другие страны, в т. ч. в США. Из 13 фабрик производства чипов TSMC имеет только по одной 300-мм и 200-мм фабрики в континентальном Китае и одну на 200 мм в США [16]. Все четыре вспомогательных фабрики сервиса backend также расположены на Тайване.

Однако с 2019–2020 гг. компания начала менять многолетнюю стратегию. Вначале под давлением США тайваньский лидер согласился на строительство в стране не одного, а нескольких заводов по самым современным технологиям 5–7 нм. Затем пошел поток сообщений о проведении пере-

говоров о строительстве новых производств TSMC в Японии и Германии [17–18].

Этот прорыв вызван несколькими причинами. Исходной являются санкционные ограничения правительства США в противостоянии с Китаем. Но это не главное. TSMC за последнее десятилетие является самой динамично развивающейся мировой полупроводниковой компанией. Если в 2010 г. ее годовые объемы продаж составляли 13,37 млрд долл. [19], то теперь таких объемов компания достигает всего за один квартал [20]. Подобных темпов роста при таких объемах не имеет ни одна крупная полупроводниковая компания мира.

Доля TSMC в мировом объеме контрактных производителей чипов постоянно росла и достигла 55%. В этом и кроется большая ловушка для мировой отрасли, приобретающей хроническую зависимость от тайваньского гиганта. Постоянное расширение и строительство новых современных производств на острове Тайвань давно стало сталкиваться с трудностями, обусловленными не финансовыми причинами. Первой среди них являются энергетические ограничения.

Такие производства требуют большого потребления электроэнергии, воды и других энергоносителей. Нехватка электроэнергетических мощностей, повышенная сейсмическая и климатическая зависимость острова от погодных аномалий являются еще одним фактором, ставящим под угрозу стабильную работу предприятий полупроводникового гиганта на Тайване. TSMC также давно сталкивается с кадровыми проблемами и нехваткой квалифицированных кадров даже на действующих предприятиях на острове.

На вновь строящихся фабриках кадровая проблема станет намного острее. Хотя с подобной проблемой в настоящее время сталкивается в США и процессорный гигант Intel, вынужденный даже привлекать студентов младших курсов для работы на своем заводе в шт. Орегон [21]. Разница в том, что у Intel это отчасти временная проблема, связанная с ростом производства из-за дефицита электроники, а у TSMC – хроническая. Не последнюю роль в этом играет континентальный Китай, переманивающий высокими зарплатами квалифицированных специалистов из Тайваня.

Бурный рост полупроводникового производства и создание новых предприятий во всех странах, где эта отрасль является профилирующей, потребует большого дополнительного количества квалифицированных кадров, что сопряжено с их повышенной миграцией из регионов, где микроэлектроника не является ведущей отраслью, в т. ч. из России. Поэтому

в ближайшие годы следует ожидать их оттока из нашей страны, которая сама испытывает трудности с нехваткой опытных и мобильных специалистов, особенно молодых.

Таким образом, производственная экспансия за пределы Тайваня давно стала необходимостью. Без этого внутренние проблемы каждого нового завода на острове постепенно начнут разрушать его изнутри. Каждая такая проблема и остановка завода гулким эхом отзовется не только на состоянии компании, но и всей мировой отрасли. Руководство TSMC это отчетливо понимает, принимая решение об изменении долгосрочной стратегии по экспансии за пределы Тайваня.

В то же время основатель TSMC Моррис Чанг (Morris Chang), ушедший в отставку в 2018 г., выступил с критикой американских властей по достижению национального суверенитета, утверждая, что выделяемых правительством США средств в размере 52 млрд долл. недостаточно для этого [22]. Скорее всего, эта критика направлена в сторону текущего руководства TSMC, поменявшего стратегию, которую Моррис Чанг проводил во время своего руководства компанией. Он считает, что воссоздать полную цепочку поставок компонентов и их производство на территории США обойдется в сотни миллиардов долларов и в конечном итоге их себестоимость окажется настолько высокой, что вся затея потеряет смысл.

По мнению автора статьи, Моррис Чанг прав только в том, что этих средств правительства не хватит для достижения цели. Однако проект ими и не ограничивается. Значительную долю необходимых инвестиций внесут правительство США, местные штаты и сами компании. Что касается всей цепочки материалов и логистики, то производители материалов уже разворачивают предприятия в США для локализации. К тому же, для достижения национального суверенитета главным является запуск суперсовременных фабрик производства чипов. На первых порах материалы могут поставляться из-за пределов США. Смежники сами будут заинтересованы в строительстве заводов в США, поскольку этот рынок для них крайне перспективный. Безусловно, стоимость производства в США может оказаться выше, чем на Тайване за счет более высоких зарплат и налогов, но текущие льготные программы правительства и штатов после начала производства на этом не закончатся.

Еще одним подтверждением новой стратегии TSMC является объявленное компанией решение о планах строительства своей первой в Японии фабрики по производству чипов по 22–28-нм технологиям, начало работы которой запланировано на конец 2024 г. [23]. Для этого TSMC создает в Японии дочернюю компанию JASM с участием в качестве миноритарного акционера компании Sony Semiconductor, инвестирующей в нее 0,5 млрд долл.

Строительство фабрики при активной поддержке правительства Японии с первоначальными затратами 7 млрд долл. производительностью 45 тыс. 300-мм пластин в месяц для выпуска чипов датчиков изображения начнется в 2022 г. Не вызывает сомнения, что несмотря на получение субсидий от правительств США и Японии, структура затрат на производство на этих фабриках будет выше, чем на Тайване.

В отличие от существующих старых фабрик, где оборудование уже амортизировано, стоимость нового на строящихся фабриках будет существенно выше. Эти затраты производители станут перекладывать в цены на продукцию. Тем более что, как заявило руководство TSMC, затраты на фабрику в США будут намного выше, чем предполагалось [24].

По оценкам Micron, затраты на производство памяти в США на 35–45% выше, чем на более дешевых рынках с устоявшимися полупроводниковыми экосистемами [25]. В первой половине текущего года Micron сообщила о продаже компании Texas Instruments 300-мм фабрики в Лехи (шт. Юта), которая была куплена у Intel в 2019 г. в рамках совместного предприятия по производству памяти 3D XPoint [26]. Micron планирует

построить новый завод на территории своего производственного комплекса в Японии и инвестировать в него порядка 800 млрд йен (7 млрд долл.) [27]. Предполагается, что предприятие с 2024 г. будет выпускать чипы оперативной памяти для серверного оборудования ЦОД и персональных компьютеров.

В начале 2020 г. Texas Instruments (TI) сообщила о планах окончательного закрытия двух своих старых фабрик в Шермане и Далласе (шт. Техас), являющихся единственными заводами компании, который работают с пластинами диаметром 150 мм [28]. Однако дефицит электроники привел к коррекции планов – на месте этих предприятий построят новые заводы для 300-мм пластин. Строительство в Шермане с первоначальными инвестициями в 6,5 млрд долл. начнется в 2022 г., а выпуск продукции запланирован с 2025 г. [29]. Общий размер инвестиций компании на протяжении четырех этапов составит 23,4 млрд долл. Новые фабрики дополняют существующие 300-мм фабрики TI DMOS6 (Даллас), RFAB1 и RFAB2, которые скоро будут завершены (обе в Ричардсоне, шт. Техас). Производство на них, как ожидается, начнется во 2-й половине 2022 г. Кроме того, ожидается, что производство LFAB (Лехи, шт. Юта), недавно приобретенное TI, стартует в начале 2023 г. [30].

РОСТ ЦЕН НА ЭЛЕКТРОНИКУ – ПРОДОЛЖЕНИЕ СЛЕДУЕТ

Глава Infineon Рейнхард Плосс (Reinhard Ploss) полагает, что производители компонентов должны будут оправдать инвестиции, направленные на увеличение объемов выпуска полупроводниковых изделий из-за повышения спроса на них, что приведет к дальнейшему значительному увеличению цен [31].

В 2021 г. увеличилась стоимость поликристаллического кремния, а поставщики кремниевых слитков и пластин повышают их цену на 20% [32]. От повышения цен крупные полупроводниковые компании пока боятся долгосрочные контракты с поставщиками кремния, но с началом 2022 г. цены пластин неминуемо повысятся и, вероятно, не один раз. Стоимость фотомасок увеличилась на 20% в этом году. Спрос на них в полной мере тоже не удовлетворен, поскольку их комплекты многократные, а многие уже изготовлены. Себестоимость изготовления чипов в 2021 г. выросла до 30%.

Все это неминуемо будет сопровождаться ростом цен на продукцию и услуги в 2022 г., а дальнейшее изменение цен будет зависеть от конъюнктуры на мировых рынках. При снижении дефицита электронных компонентов, заполнении складов и падении текущего ажиотажа автор допускает возможность снижения цен в 2023–2024 гг. на продукцию и услуги по зрелым и старым технологиям, где высокая конкуренция.

Однако в сегменте самых передовых технологий менее 10 нм возможен дальнейший рост цен из-за отсутствия полноценной рыночной конкуренции всего трех мировых производителей (TSMC, Samsung, Intel). Похоже, заказчики готовы платить больше, а в погоне за принятием своих заказов и включение их в производственные планы поставщиков в 2021 г. заказчики стали предлагать предоплату за продукцию, что ранее не практиковалось. Очевидно, в следующем году этот конкурс покупателей продолжится.

В поддержку роста цен будет направлена и общемировая инфляция и повышение цен на многие товары, включая продовольствие, металлы, энергоносители, обозначившиеся в 2021 г. и имеющие тенденцию к продолжению в следующем году. В настоящее время в мировой экономике имеются повышенные инфляционные ожидания.

Рост цен на полупроводниковые товары повысит цены не только на электронику, но и на все сопутствующие товары, т.к. полупроводники давно стали параллельным отражением влияния нефти на мировое ценообразование. Однако, несмотря на гораздо более высокую диверсификацию производства и поставок полупроводниковой продукции в сравнении с неф-

тью, мир не избавился от тех проблем, которые появились с дефицитом и ростом цен электроники в минувшем году.

Это лишнее свидетельство, насколько важна роль полупроводниковой отрасли для мировой экономики. Непонятно и то, как будет развиваться ситуация с пандемией еще не побежденного коронавируса, способной оказать существенное влияние на мировую экономику. Поэтому любые долгосрочные прогнозы носят условный характер и зависят от многих причин. Такие «качели» и резкое изменение цен то в одну, то в другую сторону не идут на пользу мировой электронной промышленности и осложняют ее поступательное развитие с предсказуемым изменением цен. После «золотого дождя» высоких цен наступит спад, к которому много компаний будет не готово.

ЗЕЛЕНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ДЕФИЦИТ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ КРЕМНИЕВЫХ ФАБРИК

Почему TSMC и Intel принимают решение о строительстве водозависимых производств чипов в одном из самых засушливых штатов США – Аризоне? В настоящее время, когда климат Аризоны стал меняться и продолжает усугубляться водяной кризис, будущее некоторых важнейших водоносных горизонтов штата остается неопределенным.

По данным Национального центра климатических данных NOAA, за период 1970–2000 гг. в Аризоне выпадало в среднем всего 13,6 дюйма осадков в год, что делает ее четвертым по засухе штатом в стране. И, наоборот, Гавайи и Луизиана зарегистрировали за тот же период самые высокие уровни среднегодовых осадков в США, составившие 63,7 дюйма и 60,1 дюйма, соответственно. Вода – ключевой элемент в полупроводниковом производстве, но инфраструктура, которая была создана в Аризоне для обеспечения адекватных поставок и удовлетворения текущих потребностей отрасли, предусматривает, что заводы по производству микросхем обязательно рециркулируют воду для повторного применения.

Стремясь улучшить положение дел с использованием воды в Аризоне, Intel профинансировала 15 проектов по ее восстановлению, направленных на благо штата. «После полной реализации эти проекты помогут ежегодно восстанавливать примерно 937 млн галлонов воды», – заявила компания. Таким образом, нехватка воды не является препятствием для строительства заводов по производству чипов. Intel присутствует в Аризоне более 40 лет, и в этом штате существует хорошо развитая экосистема полупроводников.

В настоящее время в Intel работает более 12 тыс. человек в Аризоне. В этом штате находится новейшее производственное предприятие Intel – Fab 42. К другим крупным компаниям по производству микросхем, представленным в Аризоне, относятся ON Semi, NXP и Microchip. Благодаря обильному солнечному свету Аризона также обладает надежной, обильной и экологически чистой возобновляемой электроэнергией. При закладке двух новых заводов Intel подчеркивалось, что они на 100% будут использовать именно возобновляемую электроэнергию.

В Аризоне отсутствуют сейсмические риски, а также другие угрозы, например пожары и ураганы, в отличие от, например, шт. Орегона, где расположен один из заводов Intel. Но в штате создана хорошая экосистема за счет того, что местные университеты готовят кадры не только для производителей чипов, но и для смежников по всей цепочке поставок, а местные власти предоставляют хорошие льготы на стоимость земли, жилья и налоги. Тем самым они стимулируют строительство заводов смежников и поставщиков материалов для двух чиповых гигантов, т.е. сразу предусматривают локализацию.

TSMC также давно занимается регенерацией и повторным использованием водных ресурсов. В 2020 г. эта компания запустила программу строительства завода по переработке

воды TSMC STSP – первого частного предприятия по переработке воды на Тайване [33]. Исходя из начальной суточной мощности рециркуляции 5 тыс. куб. м воды, к 2023 г. запланировано регенерировать 20 тыс. куб. м в сутки. Но, несмотря на это, проблема на острове остается острой. К тому же, она усугубилась за счет небывалой засухи 2021 г. Согласно Water Technology, производственное предприятие потребляет от двух до четырех миллионов галлонов (1 галлон = 3,785 л) в день на очистку кремниевых пластин и охлаждение оборудования [34]. Задача TSMC – довести уровень регенерации используемой воды до 90% и коэффициент использования до 350% на каждую каплю воды. Эти принципы TSMC закладывают как основу своих подходов при строительстве новых заводов за пределами Тайваня и, в частности в Аризоне. Зеленое производство, управление энергетикой и утилизация отходов, контроль над загрязнением воздуха являются типовым стандартом для TSMC.

Программы регенерации воды и зеленой энергетики очень важны не только для полупроводниковой промышленности и всей мировой экономики, но и для жизни людей, особенно в регионах, испытывающих недостаток водных и энергетических ресурсов.

Европейский полупроводниковый центр IMEC, имеющий собственную линию полупроводникового производства, запускает исследовательскую программу в области устойчивых полупроводниковых технологий и систем (Sustainable Semiconductor Technologies and Systems, SSTS), направленную на исследование влияния всей производственно-сбытовой цепочки создания полупроводников для снижения воздействия на окружающую среду [35]. В рамках этой программы будет проведена оценка влияния на окружающую среду всех этапов и операций полупроводникового производства.

Центр IMEC также готов выполнить экспертизу производства заказчиков с предоставлением подробной экологической карты и рекомендаций по снижению выбросов и уровня загрязнений по каждой из этих операций. Сложность и важность такой работы связана с тем, что обилие операций производственного цикла микросхем, использующих разные физические и химические принципы, может приводить к самым разнообразным загрязнениям водных ресурсов и окружающей среды. Очевидно, что запрос на такие работы будет только расти. Первой компанией, которая присоединилась к программе, стала Apple [36]. Это не удивительно, поскольку, согласно исследованиям IMEC, цепочка производства мобильной техники и ее комплектующих является одной из самых загрязняющих в электронике.

ОТКАЗ ОТ ЗАКОНА МУРА ОТКЛАДЫВАЕТСЯ

В минувшем 2021 г. продолжилась технологическая гонка по освоению суперсовременных технологических процессов. Компании TSMC и Samsung расширяют объемы производства по техпроцессу 5 нм. В III кв. 2021 г. у TSMC в общем объеме 14,88 млрд долл. доля заказов по 5-нм технологии составила 18%, а по 7 нм – 34%. Эти показатели в дальнейшем будут увеличиваться [37]. Начиная с техпроцесса 3 нм, продолжится тактическое противостояние двух главных соперников – TSMC и Samsung – по отказу от классической FinFET-структуры транзисторов и переходу к новой структуре GAAFET. Особенности и различия этих технологий подробнее рассмотрены в [38].

Samsung еще в марте текущего года сообщила о создании образца чипа памяти 256 Мбит SRAM по новому типу технологии 3 нм MBCFET (GAAFET). Особенностью этой конструкции являлось использование разной ширины наностраниц в шеститранзисторной ячейке SRAM, позволяющей улучшать время записи. В сравнении с 7-нм процессом, технология 3 нм

MBCFET позволяет повысить быстродействие транзистора на 30%, снизить потребление на 50%, а плотность упаковки в смешанной форме (SRAM и логика) увеличить на 80% [39].

В апреле Samsung выпустила версию 0.1 правил проектирования PDK по этой технологии. Массовое производство чипов по первой версии 3-нм процесса запланировано на 1-ю половину 2022 г., а по 2-й версии – на 2023 г. На ранней стадии находится 2-нм техпроцесс, массовое освоение которого запланировано до 2025 г. [40].

Руководители Samsung заявили на пресс-конференции перед ежегодным мероприятием Foundry Forum, что их новая технология MBCFET – более дорогая в производстве, но компания будет стремиться уменьшить стоимость транзистора [41]. Руководители Samsung отмечают, что совместимость MBCFET с процессами FinFET означает, что инженеры могут использовать одни и те же производственные технологии и оборудование для этих двух технологий. Это, в свою очередь, ускорит разработку процесса и наращивание производства.

TSMC, главный конкурент Samsung в контрактном производстве микросхем, также утверждает, что разработка 3-нм техпроцесса идет по плану и массовое производство начнется во 2-й половине 2022 г. Поскольку TSMC использует структуру транзистора FinFET для своего 3-нм техпроцесса, полупроводниковым компаниям не потребуются новые инструменты проектирования и разработки новых IP.

Главными заказчиками TSMC по этому процессу являются Intel и Apple [42]. На текущий момент Intel работает с TSMC, по крайней мере, по двум 3-нм проектам, а именно по новым процессорам для ноутбуков и ЦОД. Intel намеревается обеспечить те объемы производства, которые пока невозможны на собственных мощностях компании. Массовое производство чипов запланировано не ранее конца 2022 г.

Если верить источнику, зарезервированные объемы производства Intel даже превышают объемы Apple. Это значит, что компания Intel, серьезно озабоченная рыночным давлением AMD, при новом главе Патрике Гелсингере радикально меняет тактику и стратегию, в т.ч. за счет использования обещанного аутсорсинга.

В июле в средствах массовой информации появились сообщения о том, что Intel покупает фаундри-компанию GlobalFoundries за 30 млрд долл. [43]. И хотя представители GlobalFoundries опровергли эту информацию, новая тактика главы Intel по организации в компании контрактного фаундри-бизнеса позволяет предположить, что работа в этом направлении может продолжиться в ближайшем будущем. Владельцы GlobalFoundries из ОАЭ давно готовы продать компанию.

TSMC начнет использовать технологию GAAFET для своих 2-нм процессорных направлений, запланированных на 2023 г. Таким образом, компания Samsung, которая по-прежнему сильно отстает от TSMC по доле рынка, пошла на большой технологический риск, перейдя на GAA на одно поколение раньше, чем тайваньский мегазавод.

Процесс 3 нм еще не освоен, но вокруг него уже начинается жесткая конкуренция между заказчиками, с одной стороны, и TSMC с Samsung, с другой. Основному заказчику Apple тайваньский гигант предоставляет максимальные преференции во всех сферах, включая цены.

При общем повышении цены на 20% для всех заказчиков, в отношении Apple она выросла только на 3% [44]. Такие заказчики как AMD и Qualcomm недовольны этим, опасаясь, что их заказы по технологии 3 нм будут изготавливаться по остаточному принципу или не будут приняты, если загрузка линии окажется полной. Возможно, они отдадут эти заказы в Samsung, что обеспечит последней хорошие стартовые условия по данной технологии.

В текущем году о своих амбициях в деле освоения новых суперсовременных технологий 3–4 нм заявил и американский процессорный гигант Intel, значительно отстающий от соперни-

ков. Intel запустит в производство свою версию GAA под названием RibbonFET в рамках процесса 20A, вероятно, в середине 2024 г. [45]. Intel также будет использовать свои транзисторы Enhanced SuperFin в процессе 4 нм Intel 4 в 2022 г. и процессе 3 нм Intel в 2023 г. Во всех этих новых технологиях (FinFET и GAA) применяется литография в жестком ультрафиолете (EUV). Заметим также, что ни Samsung, ни TSMC не решили последовать примеру Intel и изменить названия масштабов техпроцессов с нанометров на ангстремы, по крайней мере, пока.

Еще одним участником этой гонки является американская компания IBM. Несмотря на отсутствие своих производственных мощностей, IBM активно участвует в разработке передовых процессов GAA в рамках программы по разработке полупроводников в своей исследовательской лаборатории, находящейся в комплексе Albany Nanotech в Олбани (шт. Нью-Йорк).

Samsung является частью этой программы, и только в текущем году IBM добавила в программу Intel, руководство которой также решило привлечь IBM к ускорению освоения новых технологий в своей компании. Это может объяснить, почему и IBM, и Intel появились на мероприятии Samsung. Samsung также является производственным фаундри-партнером для последних платформ Power Systems и Telum Z компании IBM.

IBM представила первый в мире 2-нм чип, созданный в своем научно-исследовательском центре в Олбани [46]. В тестовой микросхеме используются транзисторы с круговым затвором GAA, построенные по технологии нанолитов IBM. В этом чипе каждый транзистор имеет три уложенных друг на друга нанолитов шириной 40 нм и высотой 5 нм. Шаг транзисторов составляет 44 нм, а длина затвора – 12 нм. Новый 2-нм техпроцесс будет использоваться практически в каждом приложении, начиная с мобильной электроники и заканчивая высокопроизводительными серверами и высокопроизводительными вычислениями (HPC), включая AI, 5G, 6G, автономные системы, квантовые вычисления. Он также будет использоваться для собственных платформ IBM Power Systems и IBM Z, хотя эти устройства по-прежнему будут выпускаться Samsung – партнером IBM по производству.

Тестовый чип, представленный IBM, содержит около 50 млрд транзисторов. В целом, по заявлению IBM, новый техпроцесс увеличит производительность 2-нм чипов на 45% или уменьшит их энергопотребление на 75% по сравнению с современными 7-нм кристаллами. IBM также первой продемонстрировала тестовые чипы, выполненные по нормам 7 и 5 нм.

Гонка между Samsung и TSMC не замедлилась. Теперь в нее вступает Intel. Хотя Samsung не может быть первой компанией, которая начнет массовое производство по 3-нм процессу, но у нее нового транзистора с круговым затвором GAA должны быть лучшие характеристики по сравнению с 3-нм FinFET у TSMC. Задача Samsung – сохранить лидерство после того, как TSMC развернет свой 2-нм процесс N2 с GAAFET в 2023 г., а Intel – свою технологию 20A с RibbonFET в 2024 г.

Противостояние между этими компаниями происходит не только в разработке новых технологий, но и в расширении производительности фабрик. Samsung заявила о том, что к 2026 г. планирует увеличить свои мощности в 3,2 раза, включая открытие новой фабрики в США. Samsung не сообщает местоположение, размер или сроки запуска производства американской фабрики, но она уже располагает предприятием S2 в Остине (шт. Техас). Южнокорейский гигант также рассматривает возможность масштабного расширения зрелых технологий, по которым ощущался текущий дефицит микросхем. TSMC взяла на себя обязательство построить новую фабрику в Фениксе (шт. Аризона) для процесса N4, а Intel подготовила почву для новой передовой фабрики в Чандлере (шт. Аризона).

В очередном интервью Пэт Гелсингер затронул тему закона Мура. По его утверждению, «... закон Мура жив и здоров. Мы

прогнозируем, что в течение следующего десятилетия будем придерживаться этого закона или даже опережать его. Мы как проводники закона Мура будем неустанно стремиться к инновациям» [47]. Гелсингер указал на две новые разработки, которые помогут Intel догнать или даже обойти TSMC и Samsung. Первая из них – архитектура RibbonFET. В этой конструкции используются четыре затвора для управления током, текущим через транзисторы. Вторая разработка называется PowerVia. Она касается внутренних соединений. Технология позволяет транзисторам потреблять электроэнергию с одной стороны микросхемы, используя другую сторону для подключения к каналам передачи данных.

Сегодняшние конструкции микросхем содержат транзисторы, которые пытаются выполнять обе функции с одной и той же стороны, что сокращает возможности разработчиков упростить процесс, а также ограничивает миниатюризацию. С учетом всех наработок, считает глава Intel, компания догонит TSMC и Samsung уже в 2024 г. и обойдет их в 2025 г.

Сложно прогнозировать, насколько успешными окажутся достижения Intel, но еще недавно до прихода Гелсингера в компанию казалось, что она безнадежно отстала в технологиях от конкурентов. Пока что результаты компании не вызывают оптимизма. По прогнозу IC Insights, Intel вместе с японской Sony будут единственными среди первых 25 мировых компаний, объемы продаж которых снизятся относительно 2020 г. (1% и 3%, соответственно) [48]. У Sony, в отличие от Intel, падение связано с сокращением выпуска игровых консолей из-за мирового дефицита микросхем. Лидером с ростом 65% станет процессорный конкурент Intel – компания AMD. В III кв. 2021 г. Intel осуществила первые отгрузки клиентам продукции по новому бизнесу Intel Foundry Service, на который компания возлагает большие надежды.

На рисунке 5 приведены расчетные показатели плотности транзисторов на 1 мм^2 для техпроцессов 16–3 нм, представленные WikiChip [49]. Плотность транзисторов, изготовленных по техпроцессу 5 нм, увеличивается на 87% (по оценке TSMC, – на 84%) в сравнении с процессом N7, а для технологии 3 нм относительно 5 нм – на 70%. Таким образом, плотность транзисторов, изготовленных по 3-нм процессу, достигнет почти 300 млн/мм², хотя у не так давно освоенной технологии 16 нм этот показатель составил «всего» 28,88 млн/мм².

Европейская компания ASML, монопольный производитель литографического EUV-оборудования, оптимистично заявляет, что ее оборудование с увеличенной числовой апертурой с 0,33 до 0,55 NA, которое она планирует поставлять с 1-й половины 2023 г. для технологии 2 нм, продлит действие закона Мура как минимум на 10 лет [50].

Еще одним средством повышения степени интеграции в корпусе, а не в кристалле, являются новые сборочные технологии, применяемые не только OEM-производителями, но и фаундри-компаниями с использованием чиплетов, плиток, 2,5D и 3D сборочных процессов. Samsung относит эти варианты упаковки к диапазону вне действия закона Мура для гетерогенной интеграции. Компания предложит 3D ИС, микробампы, гибридный монтаж и варианты 3,5D, чтобы идти в ногу с Intel и TSMC. TSMC имеет большой план стратегического развития и опыт работы по сборке со своими технологиями CoWoS, InFO и SoIC. Эта компания сделала сборку главной темой выступлений на своем недавнем саммите по технологиям. Технологии Intel Foveros и EMIB также преподносятся как отличительная особенность компании.

Три года назад в декабре 2018 г. во время презентации стратегического плана развития технологии 10 нм и сборочных процессов Intel главный архитектор компании Раджа Кодури (Raja Koduri) предположил, что отрасль вступает в ту эпоху, когда потребуются инновации во всей архитектуре системы, чтобы обойти ограничения законов физики. Большая часть улучшения системной

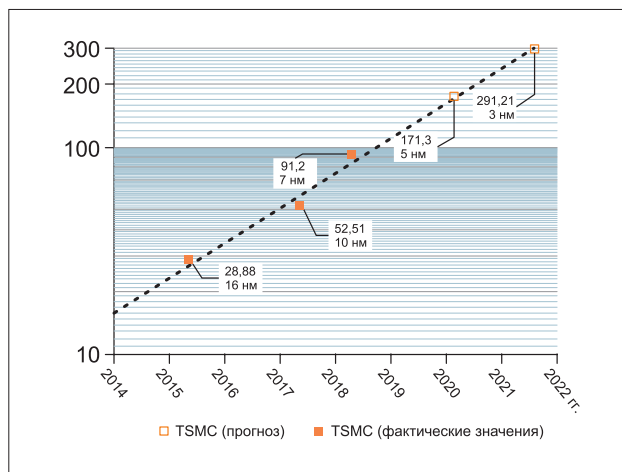


Рис. 5. Повышение количества транзисторов на 1 мм^2 для 16–3 нм процессов TSMC

архитектуры обеспечивается технологическим процессом. Intel обычно имеет два технологических варианта.

Один процесс оптимизирован под производительность вычислений, а другой – под системы ввода/вывода и системы на кристалле (СнК). Технологические процессы, в т. ч. по вине компаний Intel, TSMC и др., постоянно хвастающихся повышением плотности транзисторных ячеек, представляют как средство создания однородных транзисторов. На самом деле, архитектура транзисторов различается у высокопроизводительных процессоров, ПЛИС, и они имеют разные показатели соотношения производительности/мощности в сравнении с транзисторами для графических процессоров, энергоэффективных ПЛИС и требуют разных техпроцессов. Это позволяет проводить разработку отдельных чиплетов и сборку крупных ИС из более мелких чипов, изготовленных по разным технологиям. Ключевой особенностью сборочной технологии Foveros является встречная (face-to-face, F2F) вертикальная двухкристальная компоновка через шариковые микровыводы с очень мелким шагом 36 мкм (чаще всего, с использованием медных контактных столбиков) (см. рис. 6а–б) [51].

Foveros – сложная сборочная технология, которая создана благодаря большому сборочному опыту Intel как OEM-производителя. Ее основными преимуществами являются повышение плотности и уменьшение паразитных параметров межсоединений, что необходимо высокопроизводительным приложениям подобным тем, которые используются Intel. В этой технологии один логический чип устанавливается на другой вне кристалла памяти или несколько чипов – поверх базового логического чипа.

Каждая из этих сборочных технологий имеет свои особенности, но все они совместно с новыми суперсовременными техпроцессами производства чипов позволят повысить степень интеграции и поддержать следование закону Мура не только в рамках стратегии More Moore (период времени, когда закон Мура еще работает), но и More than Moore (новая область микро-, наноэлектронных и других устройств, не связанная с собственно миниатюризацией полупроводников). Таким образом, отказ от следования закону Мура, гласящего об удвоении количества элементов каждые два года, который предсказывался вначале на техпроцессе 28 нм, а затем на 14 нм, откладывается до худших времен в полупроводниковой микроэлектронике. К счастью, они пока не наступили.

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА СТАЛА СТРАТЕГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛЮЮ

Все действия и решения руководства ведущих мировых стран и корпораций в 2020–2021 гг. четко показывают, что

полупроводниковая отрасль является стратегической не только в экономической, но и в политической сферах. Это было понятно еще после принятия США после Второй мировой войны программы КОКОМ по ограничению поставок в СССР стратегических товаров. К ним относился довольно широкий перечень товаров, и не только электронных. В то время в программе участвовало 17 государств.

В 1994 г. после перестройки в СССР эта программа прекратила свое существование. После исчезновения двупольного мира и развала СССР США как самая крупная мировая экономика решает эти вопросы самостоятельно. Наиболее отчетливо это проявилось в санкциях, наложенных на предприятия электронной промышленности Китая и России. Но если российская электронная промышленность не является стратегической в отечественной промышленности, то в Китае она относится к базовой и стратегической, определяющей нынешнее лицо нового Китая. Удар по ней – лучшее средство для экономического торможения Поднебесной. И США это прекрасно понимают.

В 2021 г. санкционная война между США и Китаем несколько утихла. Этому способствовали две причины. Во-первых, тотальный дефицит электронных компонентов, значительная часть которых производится в Китае и экспортируется в США, вследствие чего страдает сама американская экономика. Многие автопроизводители США, ранее закупавшие автоэлектронику в Европе, Японии и Южной Корее, после возникновения дефицита были вынуждены переключиться на поставки из Китая. Во-вторых, как и прогнозировалось, смена администрации в Белом доме, избрание президентом Джона Байдена, большинство демократов в Конгрессе и Сенате снизили уровень конфронтации между двумя странами.

Подтверждением этого служит выдача 321 лицензии на сумму 103 млрд долл. американским компаниям на поставки полупроводниковой продукции и разных компонентов китайским компаниям Huawei и SMIC, находящимся под санкциями [52]. При этом республиканцы не успокоились – они будут использовать любую возможность для возобновления и продолжения санкционной войны.

Доля Евросоюза снижается в мировом полупроводниковом производстве в течение последних 10 лет. Если в 2003–2004 гг. она составила около 12%, то с 2009 г. этот показатель снизился до 8–9% [53], что вызывало обеспокоенность руководства Евросоюза, но не сопровождалось практическими и результативными решениями по этой проблеме.

В Европе имеются мощные мировые исследовательские институты IMEC (Бельгия), LETI/CEA (Франция), Фраунгофер (Германия) по выполнению НИОКР по самым передо-

вым полупроводниковым направлениям, но отсутствуют самые современные производства кристаллов по 5–7-нм технологиям. Кроме того, Европа стала в значительной мере зависеть от производства кристаллов в Азии и в т. ч. в Китае. Санкции США против Китая и ограничения на использование американского оборудования привели к усилению регионализации и нарушению цепочек международных поставок, что окончательно убедило руководство Европы в необходимости обеспечения технического и технологического суверенитета и независимости.

Декларация под названием «Закон о европейских чипах» (которое копирует американский вариант документа) была провозглашена президентом Европейской комиссии Урсолой фон дер Ляйен в обращении к государствам Евросоюза 15 сентября 2021 г. [54]. «Мы зависим от современных микросхем, производимых в Азии. Это не только вопрос нашей конкурентоспособности, но и технологического суверенитета» – заявила фон дер Ляйен. Европейская инициатива предусматривает развитие мегафабрик, способных масштабировать и наращивать объемы производства микросхем, начиная с 2-нм процесса.

Энергоэффективные ИС – еще один приоритет, поскольку рынок электромобилей набирает обороты по всей Европе. Однако самостоятельно без привлечения и помощи мировых технологических гигантов Евросоюз не сможет решить эту задачу. Раунд переговоров с TSMC завершился безрезультатно. Теперь основные надежды у Европы – на компанию Intel, глава которой подтвердил желание построить в Европе мегафаб [55]. В течение ближайших 10 лет Intel планирует вложить около 80 млрд евро в расширение своего бизнеса в Европе. Однако для этого Intel самой придется сделать технологический рывок, т. к. в настоящее время процессорный гигант не располагает даже собственной фабрикой на 7 нм. Таким образом, эта задача на ближайшее десятилетие.

В мировой полупроводниковой электронике в 2021 г. обозначились две параллельные тенденции. Правительства передовых мировых стран озабочены необходимостью достижения национального суверенитета и независимости путем создания новых фабрик в своих странах во избежание проблем с поставками товаров из других мировых регионов. В то же время транснациональные компании стремятся расширить производственные возможности, сократить затраты и себестоимость производства за счет строительства заводов за пределами своих национальных границ. Компании делали это и прежде, но усиливающаяся в последние годы регионализация усложняет такое расширение. Еще в 2019 г. на фоне санкций США казалось, что национальный суверенитет и регионализация в производстве необратимы.

Однако мировая пандемия и тотальный дефицит электроники, негативно отразившиеся на многих отраслях мировой экономики, изменили ситуацию и потребовали резкого увеличения полупроводникового производства. В связи с этим фактор суверенитета отошел на второй план, но не исчез: правительства многих стран начали соревноваться в предоставлении инвестиций и льгот крупным транснациональным компаниям для создания полупроводниковых фабрик на своих территориях.

Заметим, что эта тактика пока успешно работает. Однако это временное перемирие, которое может закончиться, когда текущий ажиотаж спадет и американцы получат на своей территории мегафабрики. В то же время противостояние с Китаем никуда не исчезнет, и США снова будут готовы прибегнуть к функциям мирового законодателя. Некоторые текущие действия властей США и Китая подтверждают это.

Власти США по-прежнему призывают американских производителей переносить предприятия из-за рубежа в свою страну, издавать распоряжение о создании запасов продукции, оборудования, сырья для оборонного сектора, а китайские

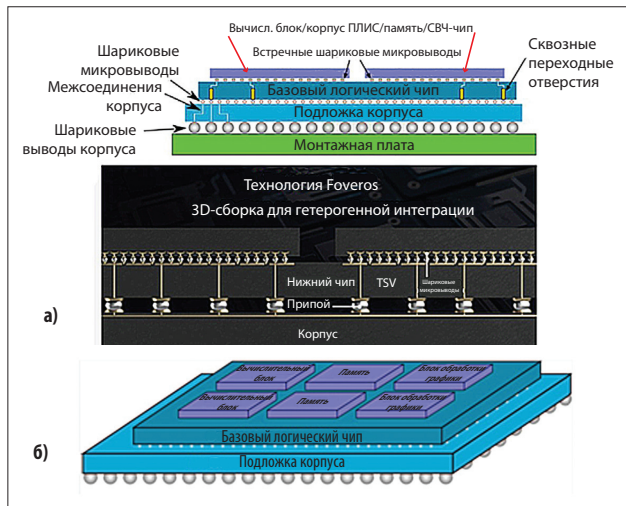


Рис. 6. а) 3D-сборка Foveros компании Intel; б) пример компоновки разных чипов

власти на фоне дефицита электроники призывают к созданию внутренней безопасной и контролируемой цепочки поставок с предоставлением приоритета китайским компаниям и отказам зарубежным. От этих действий проблема дефицита электроники только усиливается. Стремление локализовать производство электронных автокомпонентов в США подтверждает также стратегическое соглашение между Ford и GlobalFoundries о выпуске последней многофункциональных микросхем для линейки автомобилей Ford [56].

Впрочем, опасность этой гонки государственных субсидий полупроводниковым компаниям уже начинают замечать, и из Евросоюза доносятся призывы к США ограничить их, поскольку за это придется платить американским и европейским налогоплательщикам, которым эти инвестиции сулят очень малую выгоду [57].

В увлечении полупроводниковых грандов массовым строительством новых фабрик действительно есть риски. Серьезное торможение мировой экономики в силу разных причин неминуемо отразится на электронной промышленности, а создание инвестиционного «пузыря» может привести к тем же последствиям, что и ипотечный «пузырь», ставший спусковым крючком для мирового экономического кризиса в 2008–2009 гг.

Хотя эти две ситуации отличаются, следует учитывать, что предыдущий мировой кризис появился из-за ипотечного «пузыря» в одной стране, тогда как в настоящее время много стран накачивает электронную промышленность большими деньгами. Остается надеяться, что риски для отрасли диверсифицируются тем, что она во время мировых кризисов сокращается намного слабее и восстанавливается быстрее мировой экономики, чему мы неоднократно были свидетелями все последние десятилетия. Однако эффект триггера от этого не исчезает.

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

С каждым годом полупроводниковые приборы на основе SiC и GaN все глубже проникают в нашу жизнь. Минувший

2021 г. позволил им сделать впечатляющий рывок и заложить основу для роста их потребления в ближайшие пять лет и далее. Основным драйвером для этого роста является автомобильный рынок, а точнее, гибридные и электрические автомобили.

- Европейским и мировым лидером по темпам продаж и перехода к автомобилям с электрическим приводом является Норвегия. Полный отказ от продажи автомобилей с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) в Норвегии запланирован на 2025 г. Однако уже сейчас Норвегия опережает этот график. В начале осени доля продаж электромобилей на первичном рынке в Норвегии достигла 80%, а полный отказ от авто с ДВС может состояться уже в 2022 г. [58]. В ноябре доля продаж в стране автомобилей с гибридным- и электроприводом достигла 94,9%. В Норвегии активно строятся зарядная и сервисная инфраструктура, а многочисленные налоговые льготы для граждан, покупающих электромобили, стимулируют отказ от автомобилей с ДВС.

Электромобилям следующего поколения требуются силовые устройства, способные повысить эффективность автотранспортного средства (с последующим увеличением дальности действия) и скорость зарядки батареи. На рисунке 7 приведены основные узлы автомобиля, где могут применяться электронные компоненты из SiC и GaN [59]. SiC-инверторы оказались ключевым решением, отвечающим этим требованиям. Помимо преобразования входного постоянного тока в переменный, инвертор регулирует уровень подаваемой двигателю мощности в соответствии с потребностями вождения. Роль инвертора повышается с постепенным переходом автомобильного электрического транспорта с 400 на 800 В. Эффективность передачи энергии батареи двигателю у традиционного инвертора составляет 97–98%, а КПД инвертора на основе SiC достигает 99%. Заметим, что повышение эффективности на один или два десятичных знака дает очень значительные преимущества всему транспортному средству. Рисунок 8, на котором сравниваются коммутационные потери при включении Si IGBT и SiC MOSFET, подтверждает, что SiC позволяет снизить

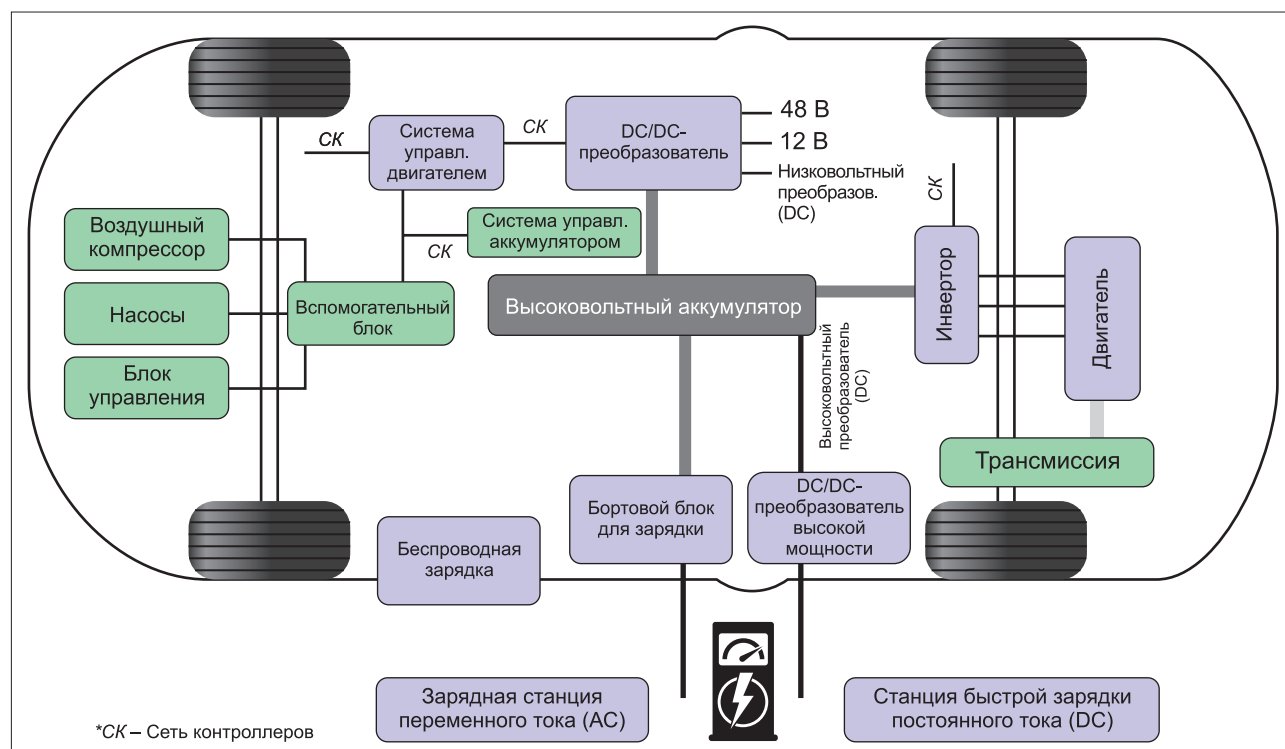


Рис. 7. Основные узлы для применения электронных компонентов на основе SiC и GaN в электромобиле

потери на 76% по сравнению с кремнием. SiC-инверторы идеально подходят для таких применений, поскольку они выдерживают высокие напряжения и температуры, позволяя уменьшить размер всех других компонентов. При использовании аккумуляторов с напряжением 800 В необходимый ток уменьшается, и можно задействовать кабели меньшего размера, что снижает затраты, вес транспортного средства и сокращает время сборки электрической системы. В итоге улучшается не только дальность, но и эффективность электромобилей. Время зарядки аккумуляторов на 800 В благодаря использованию мощных SiC DC/DC-преобразователей можно сократить до одной пятой части времени, которое требуется аккумуляторам на 400 В. Высокий КПД первых позволяет максимально увеличить количество энергии, передаваемой батареям во время зарядки при незначительных потерях мощности.

Именно сферы автомобильного применения ускорили совершенствование карбидкремниевых электронных компонентов, которое несколько притормозило в последние годы из-за их высокой стоимости, а также позволили создать хорошую рыночную основу для использования нитрида галлия. Компания YOLE прогнозирует рост мирового рынка для SiC к 2026 г. до 4 млрд долл., из которых около 60%, или более 2,5 млрд долл., придется на автомобильный рынок (см. рис. 9) [60]. Изделия на основе GaN начали развиваться на 10 лет позже, чем SiC. Их рыночные объемы достигнут 1 млрд долл. к 2026 г., а автомобильное применение станет вторым по значению после потребительского сегмента (см. рис. 10). Зарядные устройства, преобразователи напряжения, инверторы, усилители и другие устройства составляют основную сферу применения GaN-компонентов для потребительской, промышленной, транспортной, солнечной, мобильной электроники и систем связи. Системы управления питанием, инверторы, зарядные устройства, электроприводы с использованием SiC- и GaN-полупроводников – то, без чего нельзя представить легковые и грузовые гибридные и электромобили. Нет ни одного серьезного мирового автопроизводителя, не намеревающихся в своих текущих и перспективных планах увеличить выпуск автомобилей с электрическим приводом, что подтвердили результаты 2021 г., а переход на применение электронных блоков и модулей с использованием SiC и GaN стал массовым [61].

Компания Tesla положила начало рынку силовых устройств на основе

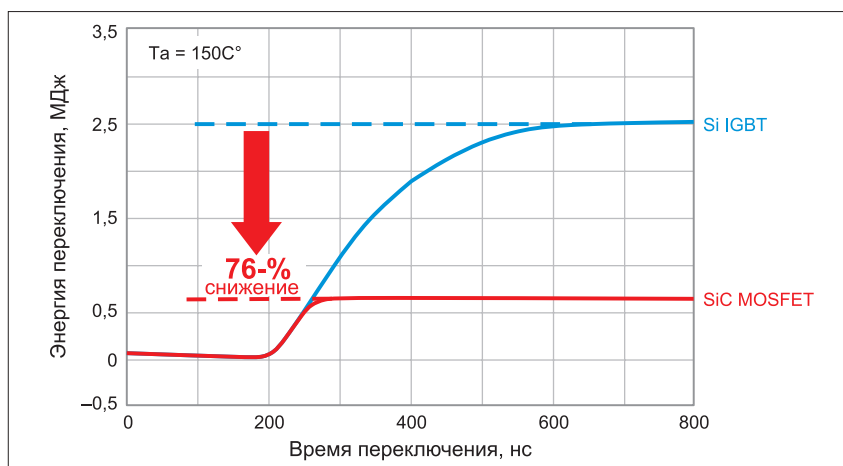


Рис. 8. Потери Si IGBT в сравнении с SiC MOSFET

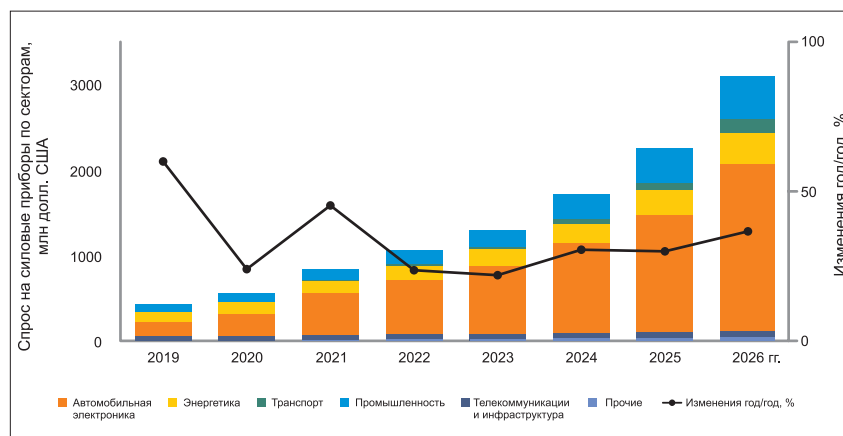


Рис. 9. Мировой рынок SiC-приборов в 2019–2026 гг. по данным от компании Yole

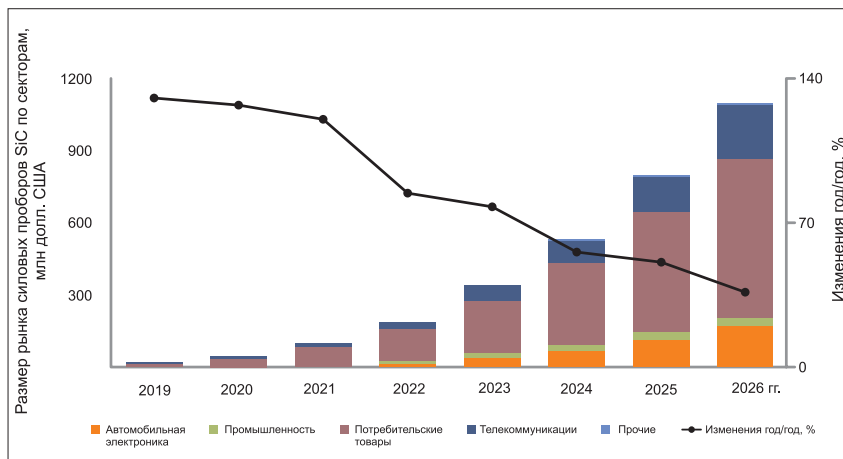


Рис. 10. Мировой рынок GaN-приборов изделий в 2019–2026 гг. по данным от компании Yole

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

Китайская компания Geely Automobile недавно заявила о сотрудничестве с японской ROHM в создании тяговых преобразователей на основе SiC для своих электромобилей, а NIO, как китайский ответ компании Tesla,

также внедрит в свои автомобили систему электропривода на основе карбида кремния. В то же время автопроизводитель и производитель полупроводников BYD разрабатывают SiC-модули для всей своей линейки электромобилей. В прошлом году китайский производитель электрических автобусов Yutong сообщил, что будет использовать силовые SiC-модули производства StarPower China в силовых агрегатах автобусов. Прежде в модулях использовались SiC-устройства от Wolfspeed.

Hyundai интегрирует в свои электромобили силовой модуль Infineon

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

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

После нескольких лет разработки компания Bosch, мировой лидер автомобильной электроники, приступила к массовому изготовлению силовых полупроводников из карбида кремния для производителей автомобилей по всему миру [62]. «... У полупроводников из карбида кремния светлое будущее. Мы хотим стать мировым лидером в производстве SiC-чипов для электромобилей», – заявил Харальд Крёгер (Harald Kroeger), член правления Robert Bosch. Два года назад компания заявила, что продолжит разработку SiC-чипов и начнет их производство. С этой целью компания Bosch разработала собственные очень сложные производственные процессы для изготовления SiC-компонентов с начала 2021 г., которые пока будут служить в качестве образцов для проверки потребителями. По словам Крёгера списки заказов заполнены благодаря буму на электромобили. В будущем Bosch намеревается расширить свои производственные мощности по силовым SiC-полупроводникам до сотен миллионов компонентов. Имея это в виду, компания начала расширять производство на своем заводе в Ройлингене. Параллельно ведется работа над более эффективными SiC-чипами 2-го поколения, которые должны быть готовы к серийному производству к 2022 г. Bosch получает поддержку в разработке этих инновационных производственных процессов изготовления

SiC-полупроводников от Федерального министерства экономики и энергетики Германии (BMWi) в рамках программы «Важный проект микроэлектроники общих европейских интересов (IPCEI)».

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

В автомобильном секторе основная ниша для GaN – бортовые зарядные устройства и DC/DC-преобразователи [64]. Канадская компания GaN Systems поставляет свои устройства американскому стартапу электромобилей Sapoo для бортовых зарядных устройств, а также сотрудничает с канадским поставщиком электромоторов FTEX для интеграции силовых устройств GaN на 650 В в системы для электронных скутеров. Компания GaN Systems с темпами роста в 485% заняла 266-е место в рейтинге Deloitte Technology Fast 500 самых быстрорастущих компаний Северной Америки в 2021 г. среди компаний в области технологий, телекоммуникаций, биологических наук, финансовых технологий и энергетики. Она также заняла 1-е место в Северной Америке по темпам роста в полупроводниковом секторе [65].

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

ло за недавним объявлением о стратегическом соглашении GaN Systems с BMW на 100 млн долл. на поставку силовых устройств на основе GaN для ее электромобилей:

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

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

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

Ожидается, что STMicroelectronics будет поставлять Renault свои устройства, которые еще не прошли квалификацию для электромобилей. Компания EPC, в настоящее время поставляющая низковольтные устройства на основе GaN для автомобильной промышленности, работает с французской компанией

Brightloop над созданием преобразователей питания для внедорожных и коммерческих автомобилей.

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

Основными особенностями SiC MOSFET STPOWER являются:

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

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

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

В этом новом одноступенчатом изолированном преобразователе на основе GaN напряжение питания 28-В шины преобразуется непосредственно в точке нагрузки, что исключает использование нескольких каскадов, понижающих напряжения до 0,8 В. В отличие от двухкаскадных преобразователей, общий КПД которых обычно составля-

ет 80%, одноступенчатый преобразователь CAES использует преимущества GaN-технологии, повышая КПД до 90% не только при полной, но и при 50%-нагрузке. Эти преобразователи с малыми массогабаритными показателями способны работать в параллельном режиме с токами выше 50 А из расчета на каждый преобразователь, не испытывая трудностей с терморегулированием в условиях низких и высоких космических орбит. Следующим этапом совершенствования преобразователей CAES станет серия с более высоким напряжением питания 100 В, что соответствует запросам космической отрасли.

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

Все эти примеры убедительно свидетельствуют о том, что OEM-производители серьезно относятся к электронике на основе полупроводников с широкой запрещенной зоной и перспективам GaN-технологии. Дополнительным подтверждением этого являются продолжившиеся в минувшем году покупки крупными компаниями разработчиков электронных компонентов на основе GaN и SiC и производителей самих материалов. В феврале компания Renesas сообщила о приобретении британского разработчика GaN-электроники Dialog Semiconductor за 4,9 млрд евро. В августе эта сделка была завершена [72]. В это же время третий по размерам в Южной Корее холдинг SK Holdings приобрел за 24 млн долл. 33,6% акций южнокорейского разработчика силовых SiC-изделий Yes Power Technix [73], а в ноябре крупный американский производитель СВЧ-изделий Qorvo анонсировал покупку американского разработчика силовых SiC-приборов UnitedSiC [74]. Заметим, что для SK Holdings и Qorvo профиль приобретенных компаний является новым направлением в каталоге продукции. Крупнейший мировой полупроводниковый производитель OnSemi в августе анонсировал приобретение за 415 млн долл. компании GT Advanced Technologies (GTAT) – производителя карбида кремния для пластин диаметром 150 и 200 мм [75].

Приведенные примеры союзов полупроводниковых компаний с производителями автомобильных устройств с финансированием последними иссле-

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

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

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

Еще одним подтверждением того, что этот прогресс не замедлится, являются усилия по снижению стоимости изделий на основе SiC. Со стороны производственного процесса, одной из самых сложных проблем до сих пор был переход от 100- к 150-мм пластинам. С одной стороны, увеличение размера пластины позволяет резко снизить удельную стоимость компонентов, а, с другой, создает серьезные проблемы, связанные с устранением дефектов и повышением надежности изделия. Переход SiC-пластин со 100 на 150 мм не обошелся без проблем, связанных с трудностью сохранения того же качества и выхода годных. Основная проблема при производстве SiC-компонентов связана с характеристиками материала. Из-за почти алмазоподобной твердости карбидокремниевые кристаллы требуют для роста и обработки более высокой температуры, больше энергии и больше времени. Кроме того, наиболее широко используемая кристаллическая структура 4H-SiC характеризуется высокой прозрачностью и высоким показателем преломления, что затрудняет проверку материала на наличие поверхностных дефектов, которые в дальнейшем могут повлиять на эпитаксиальный рост или выход годных. Основными дефектами, которые могут возникнуть при изготовлении SiC-подложек, являются дефекты упаковки кристаллов, микротрубки, ямки, царапины, пятна и поверхностные частицы. Эти факторы, отрицательно влияющие на характеристики SiC-приборов, чаще проявляются на пластинах диаметром

150 мм, чем на пластинах 100 мм. Поскольку SiC является очень хрупким и третьим по твердости композитным материалом в мире, при его производстве возникают сложные проблемы, связанные со временем цикла и себестоимостью.

Можно с уверенностью предсказать, что переход на 200-мм пластины повлечет за собой серьезные проблемы. Фактически, необходимо будет гарантировать такое же качество подложки при неизбежно более высокой плотности дефектов. Однако именно переход на больший диаметр пластин является главным способом снижения себестоимости полупроводниковых изделий из материалов всех типов. В последний раз это наглядно продемонстрировал GaN-на-кремнии за счет довольно быстрого перехода на пластины диаметром 200 мм, что значительно повлияло на совершенствование изделий, выполненных по данной технологии. По этой причине передовые мировые компании вкладывают значительные инвестиции в подготовку производства для перехода на 200-мм SiC-пластины.

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

200-мм подложек с целью увеличить производительность в 30 раз [80]. По последней информации, Wolfspeed начнет производство силовых SiC-полупроводников на своей новой 200-мм фабрике Mohawk Valley в Марси (шт. Нью Йорк) в начале 2022 г. [81].

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

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

Компания Applied Materials, флагман мирового полупроводникового машиностроения, представила два новых вида оборудования для карбидокремнивого производства, позволяющего производителям перейти на использование 200-мм пластин [84]. В системе химико-механической планаризации (CMP) Mirra Durum объединены опе-

рации полировки, контролируемого удаления материала, очистки и сушки пластин. Утверждается, что новая система позволила в 50 раз уменьшить шероховатости на поверхности готовой пластины по сравнению с механически шлифованными SiC-пластинами и в три раза снизить шероховатости по сравнению с системами пакетной CMP. Система «горячей» ионной имплантации VIISta 900 3D, рассчитанная на SiC-пластины диаметрами 150 и 200 мм, позволяет легировать полупроводниковый кристалл с минимальным повреждением кристаллической решетки, что сокращает удельное сопротивление более чем в 40 раз по сравнению с имплантацией при комнатной температуре.

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

Несмотря на то, что спустя 10 лет после появления SiC-компонентов начали совершенствоваться приборы и технологии на основе GaN, карбидокремниевые изделия отстают по максимальному диаметру используемых пластин. Разработка техпроцесса многослойной GaN-эпитаксии на кремниевых пластинах диаметром 200 мм состоялась раньше, чем у изделий на карбидокремниевой подложке такого же диаметра. Это дало мощный импульс развитию силовых GaN-полупроводников. Следующим очевидным шагом должна была стать разработка техпроцесса эпитаксиального наращивания GaN на крем-

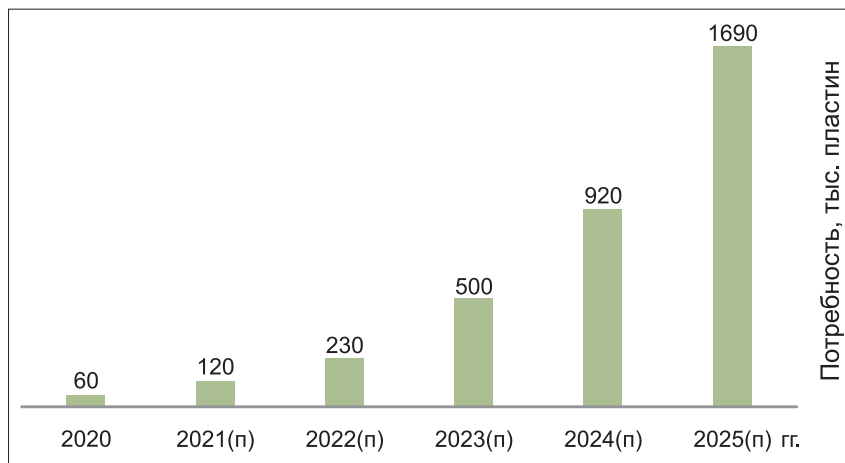


Рис. 11. Мировая потребность в 150-мм SiC-пластинах за период 2020–2025 гг.; (n) – прогноз

ниевых пластинах диаметром 300 мм. В сентябре 2021 года китайская компания Enkris Semiconductor представила серию многослойных эпитаксиальных GaN-структур на кремниевых 300-мм пластинах для производства HEMT-транзисторов на 200, 650 и 1200 В [86]. По информации Enkris, у полученных эпитруктур – равномерная толщина, низкая дефектность, а деформация пластин не превышает 50 мкм. По заверению Enkris, «благодаря оптимизированному слою зародышеобразования AlN можно изготавливать HEMT-эпитруктуры на основе GaN без трещин; эти структуры удовлетворяют требованиям по току утечки на подложках кремния до 300 мм». Несмотря на проблемы, связанные с процессом эпитаксии, управлением деформацией и контролем дефектов при переходе на пластины размером 300 мм, обеспечивается превосходное качество и электрические характеристики структур AlGaIn-GaN HEMT-транзисторов. Это, безусловно, будет стимулировать разработку мощных интегральных схем для создания систем-на-кристалле и дальнейшего снижения стоимости силовых устройств на основе GaN». Применение 300-мм пластин GaN-на-кремнии обеспечивает их совместимость с КМОП-технологией производства на современных производственных линиях.

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

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

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

В настоящее время все высоковольтные силовые приборы с рабочим напряжением выше 1000 В, создаваемые по кремниевым (MOSFET, IGBT, FRD) и SiC-технологиям, имеют вертикальную архитектуру чипов, когда электрически активная зона протекания тока направлена не вдоль поверхности (как при латеральной конструкции), а в вертикальной плоскости кристалла. При латеральной конструкции поверхностный электрический пробой является серьезной проблемой, требующей специальных методов пассивации. Кроме того, ее не удастся до конца решить при высоких напряжениях. Латеральная конструкция транзисторов на основе GaN является основной для СВЧ- и низковольтных (до 650 В) электронных компонентов, создаваемых по этой технологии (см. рис. 12а). Таким образом, вертикальная архитектура считается основной для высоковольтных GaN-изделий. Главным преимуществом полупроводников с широкой запрещенной зоной и нитрида галлия является то, что их напряженность электрического пробоя почти на порядок превышает аналогичный параметр кремния и близка к SiC, а по возможностям достижения высоких обратных напряжений пробоя GaN даже теоретически превосходит SiC [87].

В отличие от латеральной конструкции, с которой начиналось производство вначале СВЧ, а затем и силовых HEMT до 650 В, вертикальная архитектура пока не находится на такой стадии проработки. Только несколько компаний в мире выпускает изделия с использованием вертикальной GaN-технологии. И одной из наиболее известных является американская Nexgen Power Systems с головным офисом в Калифорнии [88]. Odyssey Semiconductor, вторая компа-

ния из США, оптимистично заявляет, что с 2022 г. начнет производство транзисторов с вертикальной структурой, рассчитанных на напряжение 1200–1500 В, а в перспективе – до 10 кВ [89]. Алекс Бехфар (Alex Behfar), генеральный директор Odyssey Semiconductor, надеется на то, что «компания внесет свой вклад в диапазон частот и напряжений, недоступный для карбида кремния из-за емкости и некоторых других проблем. В ближайшее время мы предоставим устройства для промышленных двигателей и солнечных батарей. Мы намерены улучшить электронику для электромобилей за счет меньшего веса и устройств с высокой производительностью. В долгосрочной перспективе будут обеспечены такие функции как зарядка на ходу».

Существуют два технологических подхода для реализации вертикальной конструкции. В первом из них, который представляют Nexgen и Odyssey, применяется структура GaN-на-GaN, в которой подложкой служит нитрид-галлиевая пластина с нанесенным слоем GaN (см. рис. 12б). За счет применения однотипного материала подложки и эпителки с максимально близкими параметрами кристаллической решетки уменьшается дефектность и внутренние напряжения в конечной структуре. Однако такая технология является более дорогой в сравнении с GaN-на-Si и пока ограничена максимальным диаметром пластин в 100 мм, в отличие от 200 мм для последней.

Во втором подходе вертикальная архитектура создается в структуре GaN-на-Si, два примера которой показаны на рисунке 13а–б [90–91]. В полностью вертикальной структуре, как и в случае с GaN-на-GaN, исток и затвор находятся на лицевой поверхности чипа, а сток – на нижней (см. рис. 13а). В квазивертикальной структуре все три

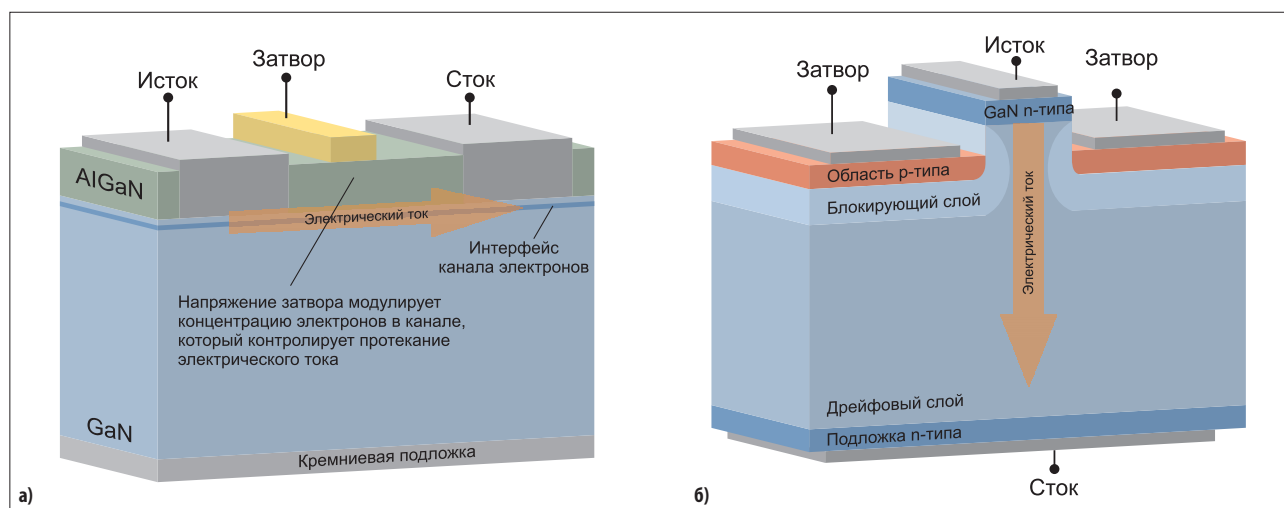


Рис. 12. а) латеральный транзистор GaN-на-Si; б) полностью вертикальный транзистор GaN-на-GaN

контакта выведены на лицевую сторону, но контакт к стоку формируется путем травления верхнего эпитаксиального слоя и нанесения верхней металлизации на n-GaN (см. рис. 13б). Однако обе последние конструкции пока не получили окончательного технологического и промышленного завершения и еще находятся на стадии исследований и разработки. Основным их преимуществом является меньшая себестоимость изготовления за счет уже промышленно освоенной технологии GaN-на-Si на пластинах 200 мм для низковольтных приборов и реальных перспектив перехода на пластины 300 мм. Очевидно, что между этими решениями и развернется противостояние за возможность составить конкуренцию SiC-компонентам в области напряжений до 10 кВ.

Вертикальные транзисторы имеют несколько важных преимуществ перед латеральными: они являются трехмерными устройствами; для повышения обратного напряжения толщина GaN увеличивается, а для повышения тока увеличивается площадь чипа. В латеральных транзисторах с этой целью повышаются топологические размеры для более высокого напряжения и большей площади чипа для увеличения тока. В любом случае увеличивается площадь. В конечном итоге, при равнозначном токе и обратном напряжении площадь чипов латеральных транзисторов может в несколько раз превысить площадь кристаллов с вертикальной конструкцией. Вторым важным преимуществом вертикальной архитектуры является более высокая устойчивость к вторичному пробою и скачкам напряжения. Устройства обладают эффектом самозащиты – в случае скачка напряжения на них или тока через них работа продолжается в обычном режиме. Третьим преимуществом является то, что вертикальные устройства на основе GaN предназначены для проведения тока через дрейфовый слой, который находится внутри объема транзистора. Следовательно, не существует механизма динамического изменения сопротивления $R_{DS(ON)}$, которое создается зарядами, захваченными из-за примесей на поверхности раздела, что наблюдается в латеральных устройствах.

Однако не все разделяют оптимизм в отношении перспектив вертикальных GaN-транзисторов. В фаундри-компаниях UMC признают, что, исходя из физических законов, вертикальные силовые устройства всегда в состоянии обеспечить более высокую выходную мощность, чем латеральные приборы. Однако объемные GaN-подложки по-прежнему дороги, а размер пластины ограничен 4 дюймами. Поскольку фаундри-компании уже выпускают

конкурентоспособные силовые устройства с использованием 6- и 8-дюймовых технологических процессов, вариант с пластинами меньшего диаметра станет шагом назад. Из-за вертикальной транспортировки носителей необходимо контролировать качество и минимизировать дефекты в эпителке и подложке, иначе надежность устройств будет низкой. Если же размер пластин является одним из определяющих факторов для контрактных производителей чипов, то проблема дефектности возникает при использовании материалов всех типов, включая Si, SiC, GaN-на-Si, GaN-на-SiC, особенно с повышением диаметра пластин. И ее с течением времени решают.

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

Однако именно на вертикальную конструкцию на основе технологии GaN-на-Si сделан упор в европейской программе

YESvGaN. Евросоюз – один из главных мировых автопроизводителей, заинтересованный в производстве электронных компонентов на 600–1200 В и более для электромобилей. Важнейшая роль среди этих компаний отводится разработке и организации выпуска высоковольтных вертикальных GaN-транзисторов. В 2021 г. была принята трехлетняя программа YESvGaN по их созданию с бюджетом около 27 млн евро [92]. Ее участниками стали 22 европейские компании и институты, среди которых AIXTRON, Fraunhofer, XFAB, STMicroelectronics и др. Координатором программы является ведущий производитель автоэлектроники – компания Robert Bosch.

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

Программа YESvGaN нацелена на реализацию новой технологии недорогих силовых транзисторов с широкой запрещенной зоной для создания высокоэффективных силовых электронных систем для электромобилей, промышленных приводов, ВИЭ и ЦОД. Во многих приложениях, где требуются силовые транзисторы с высоким номинальным напряжением и током (600–1200 В, 100 А),

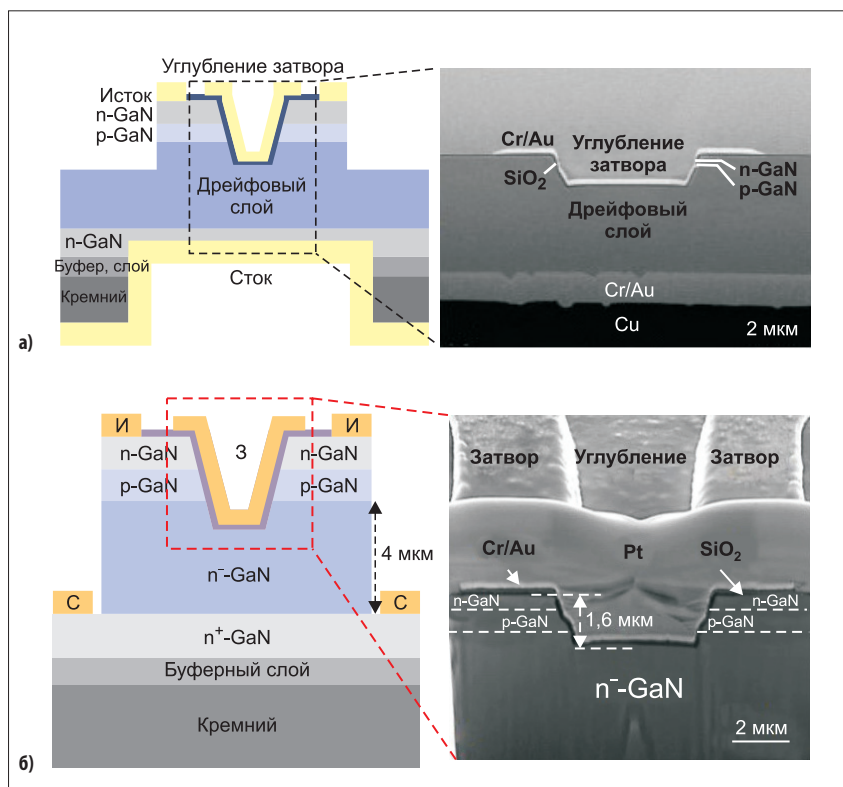


Рис. 13. а) полностью вертикальный; б) квазивертикальный MOSFET GaN-на-Si

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

SiC- И GaN-ЭЛЕКТРОНИКА В РОССИИ

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

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

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

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

В СССР за счет наличия хорошей научной школы на первом этапе мы не только составляли конкуренцию зарубежным центрам по пионерским исследованиям, но и часто опережали

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

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

В текущей российской действительности это выглядит по-другому и намного хуже. В России потеряна советская преемственность даже в том, что со скрипом выполнялось в СССР, а развал академической и отраслевой науки сделал практически невозможными пионерские исследования на первом этапе. За 30 последних лет ни один наш ученый не получил Нобелевскую премию в области естественных наук за исследования. Ученые Ж.И. Алферов, А.А. Абрикосов, В.Л. Гинзбург получили премии за исследования советского периода, а наш соотечественник К.С. Новоселов – за работы по графену за рубежом. В то же время, в России был создан прообраз венчурного капитализма в лице компании «Роснано», задачей которого являлось быстрое освоение не только отечественных, но и зарубежных высоких технологий. Итогом работы «Роснано», которая около 15 лет получала крупное государственное финансирование и госгарантии [97], стал полный провал и финансовая несостоятельность. При этом само государство годами не замечало отчетов своей же контрольной госструктуры – Счетной палаты – о неэффективности и злоупотреблениях в корпорации. И причина даже не в том, что «Роснано» руководил «эффективный менеджер» Анатолий Чубайс, далекий от прикладной науки и промышленности. Ущербность этой идеи в том, что руководство страны, тоже далекое от практической науки, промышленности и экономики, рассчитывало (насколько искренне?) созданием единственной крупной госкорпорации без частного капитала решить проблемы освоения высоких технологий в стране. Так в мире не работают. Именно частный венчурный капитал, а не государство снижает риск неудач, которые неизбежны в таком бизнесе, и не позволяет множить убытки десятилетиями, как это происходило в «Роснано». Кроме того, в условиях рыночной экономики таких компаний должны быть десятки, а не одна, и в большинстве – частные. Так что не только «Чубайс во всем виноват», хотя он может служить хорошим громоотводом. Подобное мы наблюдаем и в Сколковском инновационном

центре, так и не ставшем за 11 лет, вопреки обещаниям властей, российской «Кремниевой долиной». Он и не мог ею стать при полном отсутствии в России спроса на инновации и приверженности сырьевой идеологии.

Еще одна поучительная история развития бизнеса на новых материалах связана с искусственным сапфиром, пластины которого являются подложками для выращивания на них GaN-эпиструктур для светодиодов. СССР в этой сфере также имел хорошую научную школу, которая начала разваливаться в конце 1980-х и в 1990-е гг. И, как и в истории с карбидом кремния, отечественные ученые и специалисты уехали в США. На их знаниях в 2000 г. появилась и выросла компания Rubicon Technology, специализировавшаяся на технологии выращивания сапфира по усовершенствованному методу Киропулоса, которая довольно быстро заняла ведущие позиции в сапфировом бизнесе [98]. Однако сильная конкуренция на мировом рынке, мировой кризис 2008–2009 гг., большие перепады цены пластин сапфира для светодиодов в 2008–2016 гг. и неспособность к конкуренции с более дешевыми азиатскими производителями отрицательно отразились на состоянии компании. Ее капитализация к 2016 г. и в настоящее время резко снизилась [99].

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

Важнейшей особенностью полупроводниковых технологий для создания электронных компонентов на основе SiC и GaN, в отличие от суперсовременных кремниевых нанометровых технологий, являются зрелые проектные нормы топологии 0,25–0,5 мкм, отсутствие необходимости в очень дорогих технологиях, оборудовании для EUV-литографии и в соответствующих им процессах высокоточного плазменного травления. Это значит, что стоимость производственных линий для SiC- и GaN-электроники снижается более чем на порядок. Основными в данной технологии являются процессы MOCVD SiC и GaN, CVD и атомно-слоевое осаждение диэлектрических и металлических материалов, высокоэнергетическая ионная имплантация, а также высокотемпературная активация примесей. Многие из них имеются в России, а создание или приобретение недостающего оборудования не являлись неразрешимыми проблемами, в отличие от EUV-литографии и высокоточного плазменного травления. Хотя в настоящее время, особенно после осложнения отно-

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

Электронные компоненты на основе полупроводников с широкой запрещенной зоной очень перспективны для космической и военной областей, особенно для высокотемпературной и радиационно-стойкой космической электроники. Очевидно, что это направление станет основным для некоторых отечественных предприятий. В настоящее время в России только несколько предприятий ведет работы по упомянутым полупроводникам. Брянское АО «Кремний» является единственным предприятием, ведущим практические работы по разработке и освоению технологии производства высоковольтных SiC-диодов Шоттки, а в перспективе и транзисторов на пластинах диаметром 100 мм. Воронежское АО «НИИЭТ» занимается разработкой силовых и СВЧ-транзисторов по технологиям GaN-на-Si и GaN-на-SiC. НИИЭТ уже представил на рынок соответствующие изделия и является российским лидером этого направления.

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

и продвижения на глобальный рынок конкурентной экспортно-ориентированной продукции, как это происходит во всем мире [102].

Снова будет много разговоров о том, что в мире освоена 5-нм технология, а в нашей стране только 90 нм, и необходима фабрика на 28 нм, а также гигантское финансирование. При этом необходимого и достаточного рынка потребления электронных изделий нет ни на 90, ни на 28 нм. В то же время в мире большими скачками развивается направление, в котором наша страна вела пионерские исследования. Россия могла бы стать мировым флагманом, освоив его на многих отечественных полупроводниковых предприятиях без гигантских затрат и с перспективами выхода на мировой рынок. Однако это только умозрительный вывод: на самом деле, при текущем состоянии экономики, науки, системы управления шансов было немного. Наш удел в электронике – пытаться пешком догонять быстро уходящий электромобиль и не понимать, что через 10 лет наши топливно-сырьевые ресурсы такому транспорту не понадобятся. Несколько лет назад эти ресурсы можно было разменять на развитие и освоение технологии полупроводников с широкой запрещенной зоной, но мы этого не сделали. Теперь эти полупроводники будут постепенно обнулять транспортную востребованность нашего топливного сырья в мире. Современные электромобили развиваются гигантскими темпами, уже имеют внутреннее энергопитание благодаря использованию SiC- и GaN-электроники, искусственное зрение с помощью лидаров на основе GaN-полупроводников, искусственный интеллект и электронную беспилотную систему вождения, а мы, имея природные зрение и интеллект, десятилетиями не видим очевидного и блуждаем, как обреченные, по историческому кругу неудач, не в состоянии покорить ни один даже самый скромный барьер.

ВЫВОДЫ

1. Опустошение складов производителей и потребителей электронных компонентов (ЭК) во время мировой пандемии COVID-19, резко возросшая потребность в ЭК после возобновления работы и ажиотажный спрос создали в 2021 г. ранее небывалый дефицит электронных компонентов, крайне отрицательно сказавшийся на многих отраслях мировой экономики и, в первую очередь, на автомобильной промышленности.
2. Мировая полупроводниковая отрасль не справилась с возросшими заказами, которые привели к некоторым последствиям. К положительным последствиям следует отнести увеличение объемов производства и поставок компонентов, материалов, оборудования, строительство и запуск новых заводов, а к отрицательным – значительное увеличение сроков поставок, рост цен, отказы и введение предоплаты за заказы, что прежде массово не практиковалось.
3. Мировые поставки полупроводников в 2021 г. на фоне их дефицита во всех сегментах продукции и регионов стремительно увеличатся на 25,1% до 550 млрд долл. относительно 2020 г. и впервые в истории отрасли превзойдут рубеж в 500 млрд долл.
4. Прогнозы мирового полупроводникового рынка на ближайшие пять лет положительные и оптимистичные. Некоторые компании ожидают достижение рынком к 2026 г. невероятных показателей в 778 млрд долл. Однако, по другим прогнозам, в 2023–2024 гг. возможно перепроизводство, затоваривание складов и временное падение мирового полупроводникового рынка. Но оно не отразится на снижении рынка контрактных услуг и продукции по суперсовременным технологиям 3–5–7–10 нм из-за отсутствия достаточных конкурентных предложений от ограниченного количества таких компаний на рынке.
5. Увеличение спроса на продукцию по относительно недорогому и востребованному для многих изделий техпроцессу 28 нм на пластинах диаметром 300 мм без использования транзисторных структур FinFET приведет к запуску новых фабрик и переводу производства с технологии 40 на 28 нм и с пластин диаметром 200 на 300 мм.
6. Крупные полупроводниковые гранды для увеличения производительности фабрик инвестируют огромные средства в строительство новых 300-мм предприятий в своих странах и за их пределами, что вызывает озабоченность некоторых стран и опасность создания инвестиционного «пузыря».
7. 2019–2021 гг. еще раз продемонстрировали, что полупроводниковая промышленность является стратегической как в экономической, так и в политической сфере, способной не только оказать сильное влияние на многие отрасли мировой экономики, но и за счет санкций, ограничений или преференций быть оружием политического воздействия даже на страны с крупной экономикой.
8. Бурный рост мирового полупроводникового рынка и создание новых производств четко обозначили дефицит кадров для полупроводниковой промышленности и рост спроса на них во всех мировых регионах. Это плохой знак для России, поскольку дефицит приведет к новому оттоку за рубеж наиболее квалифицированных и мобильных специалистов, недостаток которых испытывает и наша страна.
9. Значительный дефицит электронных компонентов всех типов спровоцировал не только рост их цен до 50%, но и повышение цен на все сопутствующие материалы и услуги. Эта тенденция продолжится в 2022 г. и вместе с увеличением цен на нефть, газ, металлы, древесину и т.д. окажет заметное влияние на рост общемировой инфляции.
10. Запросы общества на зеленую энергетику и высокое потребление воды фабриками производства чипов привели к необходимости регенерации, повторного использования водных ресурсов и финансированию этих проектов мировыми полупроводниковыми гигантами. В результате появилась возможность построить п/п фабрики в засушливых регионах. Кроме того, местные власти могут применить эти технологии для бытовых нужд населения.
11. В 2021 г. продолжилось пока не выявившее победителя тактическое противостояние компаний TSMC и Samsung, которые выбрали разную архитектуру транзисторов (FinFET и GAAFET) для 3-нм процесса. 2022–2023 гг. покажут, оправдан ли риск Samsung, сделавшей ставку на новую архитектуру MBCFET (GAAFET), чтобы обогнать конкурента.
12. Конкурентная борьба компаний TSMC, Samsung, Intel при активном техническом участии IBM за освоение суперсовременных технологий 1–3 нм в сочетании с новыми процессами 3D-сборки обеспечат следование закону Мура в полупроводниковой микроэлектронике в ближайшие годы.
13. В 2021 г. сохранился подход государств с сильной экономикой к регионализации производства электроники и обеспечению национального суверенитета. Однако сильный дефицит электронных компонентов, необходимость быстрого увеличения их выпуска и стремление извлечь из него максимальную пользу, снизить себестоимость производства, привлечь инвестиции и софинансирование государств привели к усилению тенденций по строительству новых заводов транснациональными компаниями за пределами их национальной прописки.
14. Несмотря на все намерения руководства Евросоюза, обеспокоенного падением его доли в мировой отрасли,

- построить в Европе суперсовременную фабрику на 7 нм и менее, шансы на ее реализацию после проваленных переговоров с TSMC в ближайшие годы невелики. В среднесрочной перспективе – надежды только на компанию Intel, подтвердившей такие планы.
15. Дефицит электронных компонентов и победа демократов на выборах в США способствовали ослаблению санкционной войны между США и Китаем и положительно отразились на мировом полупроводниковом рынке.
 16. Бурный рост мирового автомобильного рынка с постепенным преобладанием выпуска гибридных и электромобилей гарантирует ускоренное развитие и дальнейшее снижение стоимости полупроводниковых приборов на основе SiC и GaN.
 17. Оценивая хорошие рыночные перспективы SiC- и GaN-изделий, крупные зарубежные компании продолжают увеличивать инвестиции в их производство, а также в приобретение компаний-разработчиков этих изделий и материалов, в т. ч. и для начала производства у себя новых, ранее отсутствующих в этих компаниях направлений электронных компонентов.
 18. Развитие электронных компонентов на основе GaN проходит эволюцию от создания более простых силовых дискретных компонентов (транзисторы, диоды и т. д.) и управляющих микросхем (драйверов, контроллеров) к более сложным интегрированным решениям с высокой энергоэффективностью, в т. ч. для применения в жестких условиях космоса.
 19. Повышение диаметра SiC-пластин до 200 мм, которое произойдет в 2022 г. несмотря на технические трудности, является главным средством, которое позволит уменьшить себестоимость и цену производства карбидокремниевых ЭК.
 20. Представленные на рынке в 2021 г. первые эпитаксиальные GaN-пластины на кремниевой подложке диаметром 300 мм с высокой однородностью и низкой дефектностью позволят в дальнейшем уменьшить себестоимость производства и цены электронных GaN-компонентов.
 21. Эволюция и прогресс в промышленной разработке технологии вертикальных структур GaN-на-GaN и GaN-на-Si для активных компонентов с низкой себестоимостью в перспективе позволят создать конкуренцию не только кремниевым IGBT-, но и SiC-транзисторам, диодам в области высоких напряжений до 10 кВ.
 22. Несмотря на мировое лидерство советской научной школы по карбиду кремния во времена СССР, современное состояние науки и системы управления в России при отсутствующем рынке потребления не позволяют создать в стране конкурентную на мировом рынке электронику на основе SiC- и GaN-полупроводников с широкой запрещенной зоной. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. *The Worldwide Semiconductor Market is expected to show an outstanding growth-rate of 25.1 percent in 2021.* WSTS. San Jose. California. August 16. 2021//www.wsts.org.
2. *Semiconductor Market to Grow By 17.3% in 2021 and Reach Potential Overcapacity by 2023.* IDC Reports. September 19. 2021//www.idc.com.
3. *Surges Seen in Sensors and Discrete Semiconductors This Year.* IC Insights. October 26. 2021//www.icinsights.com.
4. *Немецкие автомобильные компании разоряются из-за нехватки чипов. Российские также пострадали.* Geekwille. 01.11.2021//www.geekwille.ru.
5. *Глава Apple оценил потери компании от сбоя в поставках чипов в 6 млрд долл.* Forbes. 29.10.2021//www.forbes.ru.6. *Shortages related to semiconductors to cost the auto industry \$210 billion in revenues this year, says new AlixPartners forecast.* September 23. 2021//www.alixpartners.com.
7. *The Wait for Semiconductors Turns Ominous for Automakers.* Bloomberg. October 07. 2021//www.bloomberg.com.
8. *Caïm TSMC*//www.tsmc.com.
9. *Chinese foundry pushes 300mm IGBT production.* eeNews Automotive. July 31. 2020//www.eenewsautomotive.com.
10. *Shift from 8" Wafer Fabs to 12" Could Ease IC Shortages.* EETimes. May 18. 2021//www.eetimes.com.
11. *Global Silicon Wafer Shipments Projected to Log Robust Growth Through 2024.* SEMI Reports. SEMI. October 18. 2021//www.semi.org.
12. *Highlights of the September 2021/Q3 Edition of the Fab Databases.* SEMI. September 01. 2021//www.semi.org.
13. *Foundry Revenue Expected to Increase by 23.8% YoY in 2020, with Advanced Nodes and 8-Inch Capacities Being Key to Industry Competitiveness in 2021.* TrendForce. November 18. 2020//www.trendforce.com.
14. *Semiconductor Market Report: Trends, Forecast and Competitive Analysis.* ReportLinker. August 2021//www.reportlinker.com.
15. *IC Insights Forecasts a 21% Surge in IC Unit Shipments This Year.* IC Insights. July 28. 2021//www.icinsights.com.
16. *TSMC website*//www.tsmc.com.
17. *Exclusive TSMC looks to double down on U. S. chip factories as talks in Europe falter.* Reuters. May 14. 2021//www.reuters.com.
18. *Japan readies multiyear support package for TSMC's new chip plant.* Nikkei Asia. October 21. 2021//asia.nikkei.com.
19. *TSMC Annual Reports Third 2010.* TSMC//www.tsmc.com.
20. *TSMC Reports Third Quarter 2021.* TSMC. October 14. 2021//www.tsmc.com.
21. *У Intel колоссальная проблема с кадрами. Процессоры производят вчерашние школьники.* CNews. 6.10.2021//www.cnews.ru.
22. *Основатель TSMC: возрождение национальной полупроводниковой промышленности будет не по карману США.* 3D News. 27.10.2021//www.3dnews.ru.
23. *TSMC to build new fab in Japan together with Sony.* Evertiq. November 09. 2021//evertiq.com.
24. *TSMC: How a Taiwanese chipmaker became a linchpin of the global economy.* Financial Times//www.ft.com.
25. *Micron Announces Over \$150 Billion in Global Manufacturing and R&D Investments to Address 2030 Era Memory Demand.* October 20. 2021//investors.micron.com.
26. *Texas Instruments to buy Micron's Utah factory for \$900 million.* Reuters. June 30. 2021//www.reuters.com.
27. *Micron вбухает в расширение производства чипов 150 млрд долл.* Время электроники. 22.10.2021//russianelectronics.ru.
28. *Texas Instruments closing two fabs, building one.* eeNews Analog. February 06. 2020//eenewsanalog.com.
29. *TI might not be done with Sherman.* Evertiq. October 07. 2021//evertiq.com.
30. *Texas Instruments to begin construction next year on new 300-mm semiconductor wafer fabrication plants.* DALLAS, November 17. 2021//news.ti.com.
31. *Глава Infineon: цены на чипы сильно вырастут – деньги нужны на расширение производств.* 3D News. 17.09. 2021//www.3dnews.ru.
32. *Производители чипов столкнулись с резким ростом цен на кремниевые пластины.* 3D News. 16.11.2021//3dnews.ru.
33. *Green Manufacturing.* TSMC//www.tsmc.com.
34. *Water Management Innovation is Central to the Future of ICs.* EETimes. July 30. 2021//www.eetimes.com.
35. *Sustainable Semiconductor Technologies and Systems.* Imec//www.imec-int.com.
36. *Apple joins as first public partner in new Imec research program that helps entire semiconductor value chain reduce its ecological footprint.* IMEC. October 28. 2021//www.imec-int.com.
37. *TSMC Reports Third Quarter 2021.* TSMC. October 14. 2021//www.tsmc.com.
38. *Боднар Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2020. Часть 3. Марафонская полупроводниковая гонка к 1 нм//Электронные компоненты. № 2. 2021.*
39. *Samsung представил 3-нм чип 256-Мбит SRAM.* Время электроники. 16.03.2021//russianelectronics.ru.

40. From FinFET to GAA: Samsung's fab journey to 3 nm and 2 nm. EDN. October 11. 2021//www.edn.com.
41. Samsung Foundry Promises Gate All-Around in '22. EETimes. October 14. 2021//www.eetimes.com.
42. Apple and Intel become first to adopt TSMC's latest chip tech. Nikkei Asia. July 2. 2021//asia.nikkei.com.
43. Intel Is in Talks to Buy GlobalFoundries for About \$30 Billion. The Wall Street Journal. July 15. 2021//wsj.com.
44. Тесное сотрудничество TSMC и Apple заставило AMD задуматься о выборе Samsung в качестве производителя чипов. 3DNews. 21.11.2021//www.3dnews.ru.
45. Intel Announces 20Å Node: RibbonFET Devices, PowerVia, 2024 Ramp. WikiChip Fuse. July 26. 2021//fuse.wikichip.org.
46. IBM Unveils World's First 2 Nanometer Chip Technology, Opening a New Frontier for Semiconductors. IBM Newsroom. May 06. 2021//ibm.com.
47. Intel will outpace Moore's Law, CEO Pat Gelsinger says. Cnet. October 27. 2021//www.cnet.com.
48. Annual Revenue Growth to Skyrocket among Top 25. IC Insights. November 17. 2021//www.icinsights.com.
49. TSMC Ramps 5nm, Discloses 3nm to Pack Over a Quarter-Billion Transistors Per Square Millimeter. WikiChip Fuse. April 17. 2020//fuse.wikichip.org.
50. Moore's Law Could Ride EUV for 10 More Years. EETimes. September 30. 2021//www.eetimes.com.
51. Intel Looks to Advanced 3D Packaging for More-than-Moore to Supplement 10-and 7-Nanometer Nodes. WikiChip Fuse. December 22. 2018//fuse.wikichip.org.
52. США выдали лицензии на поставки чипов и компонентов для Huawei и SMIC на десятки миллиардов долларов, несмотря на санкции. 3D News. 22.10.2021//www.3dnews.ru.
53. Semiconductor Industry Association (SIA) Factbook 2019//www.semiconductors.org.
54. 2021 State of the Union Address by President von der Leyen. An official website of the European Union. September 15. 2021//ec.europa.eu.
55. Intel to invest up to 80 bln euros in boosting EU chip capacity-CEO. Reuters. September 07. 2021//www.reuters.com.
56. GlobalFoundries, Ford to Address Auto Chip Supply and Meet Growing Demand. Ford Media Center. November 18. 2021//media.ford.com.
57. U. S., EU must avoid subsidy race amid chip shortage – EU's Vestager. Reuters. November 13. 2021//www.reuters.com.
58. В ноябре доля электромобилей на первичном рынке Норвегии достигла 73,8%. 3D News. 05.12.2021//3dnews.ru.
59. SiC Technology: Challenges and Future Perspectives. Power Electronics News. October 12. 2021//www.powerelectronicsnews.com.
60. Compound Semiconductor Quarterly Market Monitor. YOLE Report. Q3 2021//www.yole.fr.
61. SiC and GaN: A Tale of Two Semiconductors. EETimes. October 19. 2021//eetimes.com.
62. Longer range as standard: Bosch gives go-ahead for volume production of silicon carbide chips. BOSCH. December 02. 2021//www.bosch-presse.de.
63. Популярность GaN-зарядок очень быстро растет – к 2025 г. они займут больше половины рынка. 3D News. 26.10.2021//www.3dnews.ru.
64. SiC and GaN: A Tale of Two Semiconductors. EETimes. October 19. 2021//www.eetimes.com.
65. GaN Systems Listed on 2021 Deloitte Technology Fast 500, the Fastest-Growing Companies in North America. GaN Systems News//gansystems.com.
66. GaN Systems raises \$150m in growth capital funding. Semiconductor Today. November 18. 2021//www.semiconductor-today.com.
67. GaN Systems' power transistor prices drop below \$1. Semiconductor Today. March 10. 2021//www.semiconductor-today.com.
68. Infineon and Panasonic accelerate GaN technology development for 650 V GaN power devices. Infineon. September 02. 2021//Infineon.com.
69. STPOWER SiC MOSFETs. STMicroelectronics//www.st.com.
70. STMicroelectronics Drives the Future of EVs and Industrial Applications with New Silicon-Carbide Devices. STMicroelectronics. December 09. 2021//www.globenewswire.com.
71. 28V GaN, Single-Stage, Isolated DC-DC Converter. CAES//caes.com.
72. Renesas Completes Acquisition of Dialog Semiconductor. Renesas. August 31. 2021//renesas.com.
73. SK Holdings acquires 33,6% in Korea's only SiC Chip Maker Yes Power Technix for \$24 mn. I-Micronews. February 04. 2021//www.i-micronews.com.
74. Qorvo Acquires United Silicon Carbide (UnitedSiC), a Leading Provider of Silicon Carbide Power Semiconductors. Qorvo. November 03. 2021//www.qorvo.com.
75. OnSemi to Acquire GT Advanced Technologies. OnSemi. August 25. 2021//www.onsemi.com.
76. Из-за дефицита полупроводниковой продукции Hyundai Motor снова пришлось остановить завод в Южной Корее. 12.09.2021//ixbt.com.
77. Sony Explores Selling EVs, Joining Tech Rush Into Red-Hot Arena. Bloomberg. January 4. 2022//www.bloomberg.com.
78. STMicroelectronics Manufactures First 200mm Silicon Carbide Wafers. STMicroelectronics. July 27. 2021//www.st.com.
79. Cree|Wolfspeed and STMicroelectronics Expand Existing 150mm Silicon Carbide Wafer Supply Agreement. Wolfspeed. August 17. 2021//www.wolfspeed.com.
80. Cree to Invest \$1 Billion to Expand SiC Capacity. Wolfspeed. May 07. 2019//www.wolfspeed.com.
81. Cree Inc. Rebrands as Wolfspeed Inc., Strikes Deal with GM. Photonics Media. October 13. 2021//www.photonics.com.
82. Annual 6-inch SiC Wafer Demand from EV Market Expected to Reach 1.69 Million Units in 2025 as 800V Charging Architecture Nears, Says TrendForce. TrendForce. December 01. 2021//www.trendforce.com.
83. Soitec acquires NOVA SiC to strengthen its Silicon Carbide wafer technology. Soitec. October 2021//www.soitec.com.
84. New Applied Materials Technologies Help Leading Silicon Carbide Chipmakers Accelerate the Transition to 200 mm Wafers and Increase Chip Performance and Power Efficiency. Applied Materials. September 08. 2021//www.appliedmaterials.com.
85. EU project TRANSFORM: AIXTRON drives the green economy. AIXTRON. December 08. 2021//aixtron.com.
86. CMOS Compatible High-voltage GaN-on-Silicon HEMT reaches 300 mm. Enkris Semiconductor News. September 23. 2021//enkris.com.
87. Боднар Д. Нитрид галлия – премьер среди новых материалов полупроводниковой микроэлектроники. Компоненты и технологии. 2018. № 4.
88. Nexgen Power Systems//www.nexgenpowersystems.com.
89. Odyssey Semiconductor Presentation//www.odysseysemi.com.
90. Fully Vertical GaN-on-Si power MOSFETs. IEEE Electron Device Letters. Vol. 40. No. 3. March. 2019//www.researchgate.net.
91. 'First' quasi-vertical gallium nitride trench MOSFET on 6-inch silicon. Semiconductor TODAY Compounds & Advanced Silicon. Vol. 13. Issue 1. February 2018//www.semiconductor-today.com.
92. Vertical GaN on Silicon: Wide Band Gap Power at Silicon Cost. European Commission. November 19. 2021//cordis.europa.eu.
93. Боднар Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2020. Часть 4. Широкозонные полупроводники как главный инструмент повышения энергоэффективности электроники. Электронные компоненты. 2021. № 3.
94. Vertical GaN on Silicon: Wide Band Gap Power at Silicon Cost. YESvGaN Project//www.yesvga.eu.
95. Рубан О. Америка доказала, что мы можем. Эксперт. № 45. 12–18 ноября. 2012.
96. SiC-электроника. Прошлое, настоящее, будущее. Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 5.
97. «Роснано» в шаге от дефолта: во всем опять виноват Чубайс? EADaily. 25 ноября. 2021//eadaily.com.
98. Rubicon Technology//www.rubicontechnology.com.

99. Rubicon Technology – [Wikipedia//en.wikipedia.org/wiki/Rubicon_Technology](https://en.wikipedia.org/wiki/Rubicon_Technology).

100. Поляков В. О том, как стать первым на рынке сапфиров и не разориться. *Harvard Business Review Россия*. 22 июля. 2016//hbr-russia.ru.

101. Боднар Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2020. Часть 2. Российская микроэлектроника и ее фантомные цели. *Электронные компоненты*. № 1. 2021.

102. Боднар Д. Ориентация на экспорт как средство повышения конкурентоспособности отечественной электроники. *Электронные компоненты*. № 4. 2015.