

Индустрия кремниевых заводов: некоторые аспекты развития

М. Макушин¹

УДК 621.37 | ВАК 05.27.06

Индустрия кремниевых заводов стала одной из немногих отраслей, продемонстрировавших в 2020 году высокие темпы роста доходов. Она всё в большей мере становится производственной базой полупроводниковой промышленности. Игроки рынка покрывают весь диапазон технологических запросов поставщиков ИС. Перспективы отрасли достаточно устойчивы, но в ближайшем будущем на них может повлиять политика США в области высоких технологий.

Модель кремниевого завода (foundry) – это основная форма контрактного производства ИС в микроэлектронике (полупроводниковой промышленности). Она предполагает изготовление ИС по спецификациям заказчика с предоставлением ему широкого спектра услуг использования инструментальных средств фирм-союзников из числа поставщиков САПР для проектирования собственных ИС с использованием базы библиотек стандартных элементов различных fabless- и IDM-фирм (по контрактам foundry с последними), платформ и сложнофункциональных (СФ/ИР) блоков (на тех же условиях). Кремниевые заводы могут заниматься разработкой новейших технологических процессов, но разработкой собственных конструкций ИС, как правило, не занимаются.

Данная модель отличается высокой капиталоемкостью, поэтому зачастую создание кремниевых заводов происходило при участии государства. Так, Taiwan Semiconductor Manufacturing Co. (TSMC) и United Microelectronics Co. (UMC) возникли на базе лабораторий государственного Научно-исследовательского института промышленных технологий Тайваня (ITRI) по результатам программ субмикронных НИОКР: UMC – в 1979 году, TSMC – в 1986 году. Аналогично, с участием инвестиционной корпорации правительства эмирата Абу-Даби (Advanced Technology Investment Company, ATIC) в 2009 году возникла и GlobalFoundries (Санта-Клара, штат Калифорния) – сначала как СП с американской корпорацией AMD, а затем полностью перешедшая в собственность ATIC.

По мере масштабирования ИС растет значение модели foundry-fabless (проектирование ИС) в ущерб традиционной модели IDM (разработка, проектирование, производство и маркетинг ИС). На кремниевые заводы сейчас приходится около 60% производимых в мире ИС в натуральном выражении (с точки зрения начальных этапов

обработки пластин). Крупнейшие IDM – Intel и Samsung – вынуждены использовать модель foundry – Intel для избранных партнеров, ранних пользователей ее новейших технологий, а Samsung даже создал автономное подразделение – Samsung Foundry.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РЫНКА КРЕМНИЕВЫХ ЗАВОДОВ Современное состояние рынка

По прогнозам исследовательской группы TrendForce (Тайбэй, Тайвань), общая стоимость услуг кремниевых заводов по итогам 2020 года должна была составить 84,6 млрд долл., а рост по сравнению с 2019 годом – на 23,7%. Специалисты TrendForce сделали три следующих предположения относительно спроса на услуги кремниевых заводов в 2021 году:

- во-первых, вызванный пандемией спрос на сетевые продукты и со стороны «надомной» экономики (надомные, дистанционные работа, учеба и т. п.) будет сохраняться из-за неопределенности с эффективностью вакцин от COVID-19 и их побочных эффектов;
- во-вторых, американо-китайская «Холодная технологическая война» продолжится;
- в-третьих, мировая экономика в 2021 году будет восстанавливаться после спада в 2020 году.

Спрос на электронные компоненты, скорее всего, вырастет не только благодаря прогнозируемому в следующем году росту на рынках смартфонов, серверов, ноутбуков, телевизоров и автомобилей в пределах 2–9%, но и благодаря продолжающемуся развертыванию сетей следующего поколения, включая технологии 5G базовых станций и Wi-Fi 6.

Таким образом, ожидается, что индустрия кремниевых заводов в 2021 году достигнет рекордных доходов, которые увеличатся на 6% (рис. 1).

Коэффициент использования мощностей крупнейшего кремниевого завода, TSMC (рис. 2), обрабатывающих

¹ ЦНИИ «Электроника», главный специалист, mmackushin@gmail.com.

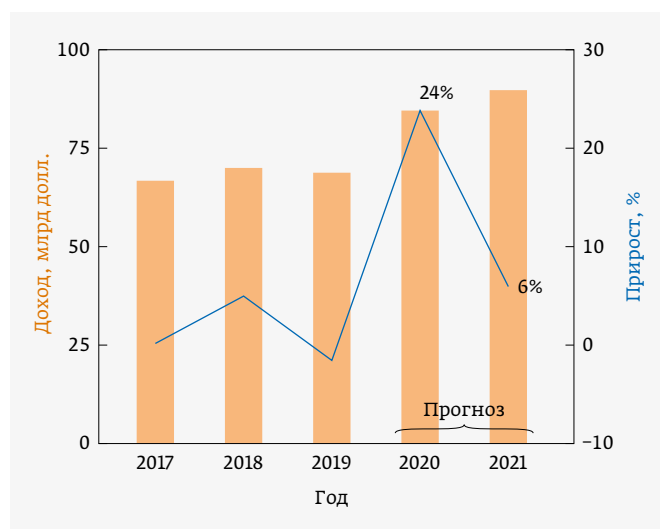


Рис. 1. Динамика доходов кремниевых заводов в период 2017–2021 годов (млрд долл.). Источник: TrendForce

пластины по перспективным процессам с проектными нормами 5 нм и ниже, составляет около 90%. Это обусловлено тем, что из-за санкций США TSMC не может выполнять на этих мощностях заказы корпорации HiSilicon (микроэлектронное подразделение китайской корпорации Huawei), а заказы на 5-нм ИС основного клиента TSMC на данном технологическом уровне, корпорации Apple, не могут полностью компенсировать отсутствие заказов HiSilicon, на которую ранее приходилось

до 24% заказов по данным проектным нормам [1]. Аналогичная ситуация складывается и по 7-нм процессам. Но там долю HiSilicon успешно заменяют китайские стартапы, не попавшие под санкции. Например, недавно корпорация Cambricon Technologies (Пекин, дочерняя фирма АН КНР, поддерживаемая Alibaba Group) заказала TSMC изготовление 7-нм блока машинного обучения MLU 290. Он содержит 46 млрд транзисторов, поддерживает обучение искусственного интеллекта (нейронных сетей), формирование выводов ИИ или гибридные задачи ускорения вычислений ИИ. Ранее она уже производила на мощностях TSMC 16-нм приборы для облачных вычислений [2].

На производственные мощности TSMC под 7-нм технологии и 7-/5-нм мощности корпорации Samsung предъявляют высокий спрос корпорации AMD / MediaTek и Nvidia / Qualcomm соответственно. Это, в свою очередь, обеспечит почти полную загрузку данных мощностей приблизительно до II кв. 2021 года. В период со второй половины 2021 года по 2022-й TSMC и Samsung планируют активно расширить свои 5-нм мощности в соответствии с высоким спросом клиентов на компоненты для высокопроизводительных вычислений (HPC), ожидаемым в 2022 году.

Хотя спрос на обработку пластин со стороны большинства этих клиентов, как правило, будет увеличиваться с конца 2021 года по 2022-й, вполне возможно, что коэффициенты использования 5-нм мощностей этих двух кремниевых заводов во второй половине 2021 года

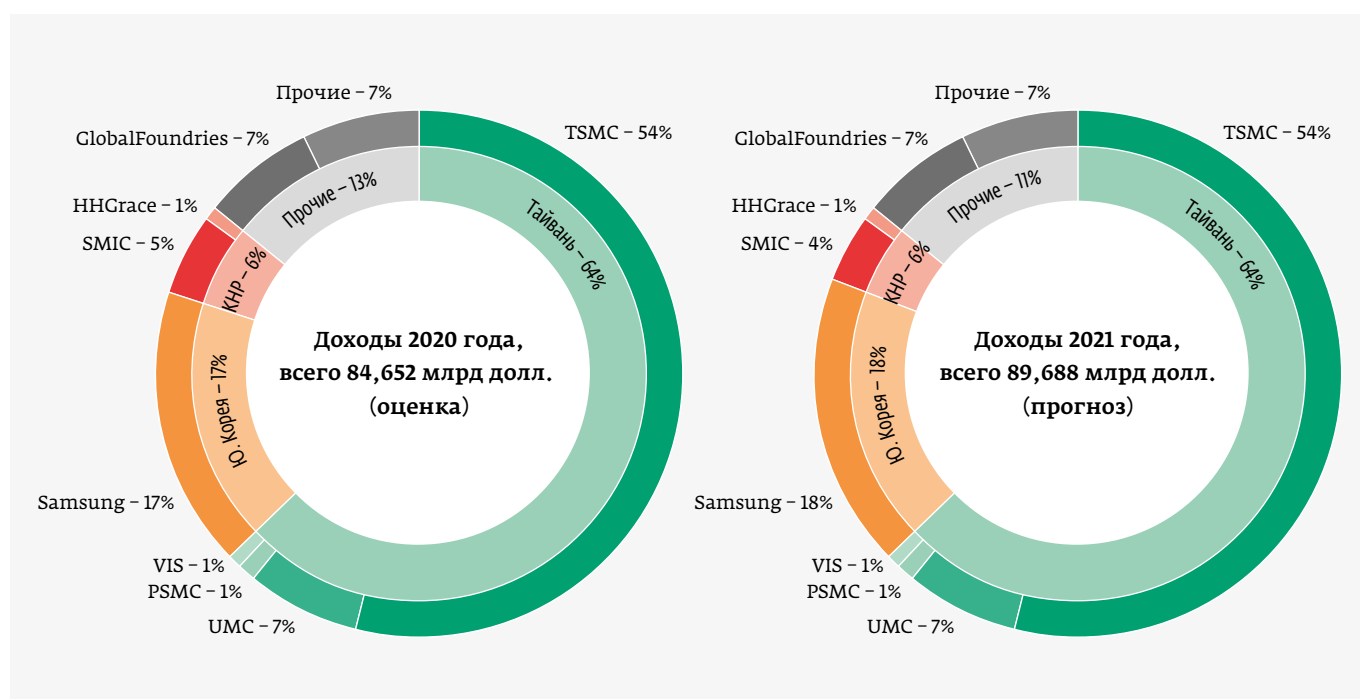


Рис. 2. Структура рынка кремниевых заводов в 2020–2021 годах. Источник: TrendForce

могут немного снизиться (из-за неравномерности поступления заказов). Специалисты TrendForce считают, что в 2022 году снова возникнет острый дефицит производственных мощностей под новейшие процессы, учитывая быстрый рост рынка НРС и увеличение заказов от корпорации Intel, которая ускоряет аутсорсинг своего производства.

Производители комплектного оборудования (ОЕМ) активно закупают компоненты, используемые в различных конечных продуктах, включая КМОП-формирователи сигналов изображения, ИС для сенсорных экранов, ИС входных РЧ-каскадов, ТВ ИС, Wi-Fi и Bluetooth-компоненты.

Другим ключевым фактором, влияющим на изменение производственных мощностей в индустрии кремниевых заводов, являются санкции США против крупнейшего и наиболее современного китайского кремниевого завода SMIC. Так, американские корпорации Broadcom и Qualcomm являлись основными клиентами SMIC из США до 10 сентября 2020 года, когда министерство торговли США объявило о планах включить SMIC в санкционный список (Entity List). После этого Broadcom и Qualcomm перенаправили заказы, которые первоначально предназначались для SMIC, на другие кремниевые заводы за пределами КНР. Кроме того, корпорация GigaDevice, являющаяся клиентом SMIC на внутреннем рынке, изменила структуру своих заказов таким образом, что большинство ее продуктов вместо SMIC будет производить другой китайский кремниевый завод – HHGrace.

Министерство торговли США теперь требует от американских поставщиков получать специальную лицензию для поставок SMIC их продукции (прежде всего это касается полупроводниковых оборудования и материалов). При рассмотрении лицензионных заявок на оборудование, используемое в производственных процессах с проектными нормами 10 нм и менее, фактически используется «презумпция отказа».

При этом китайские поставщики могут предложить оборудование под процессы с проектными нормами до 90 нм, но не меньше. Кроме того, в краткосрочной перспективе вероятность достижения китайской полупроводниковой промышленностью самодостаточности по всем типам оборудования, используемого при обработке пластин, крайне мала [1].

Рентабельность ведущих кремниевых заводов

Большое, как никогда ранее, разнообразие предлагаемых при переходе к меньшим топологическим нормам новых технологических процессов затрудняет их сопоставление. Кроме того, стали регулярно появляться «плюсовые» или производные версии каждого поколения процесса и полуступи между основными технологическими уровнями. Пример – 14LPP (low power plus), версия с расширенными

параметрами 14-нм процесса изготовления приборов с малой потребляемой мощностью.

В мире кремниевых заводов обладание передовыми производственными мощностями дает явные преимущества. В 2019 году корпорация TSMC была единственным кремниевым заводом, производящим ИС по 7-нм процессу. Не случайно, ее валовой доход на одну обработанную пластину значительно увеличился, так как ведущие fabless-фирмы выстроились в очередь за изготовлением их новейших ИС по 7-нм процессу. TSMC был единственным «чистым» кремниевым заводом, удельная стоимость обработанных пластин которого в 2019 году увеличилась по сравнению с 2014-м (на 13%). В то же время стоимость пластин GlobalFoundries, UMC и SMIC (наименьшие топологические нормы 12/14 нм) снизилась за данный период на 2, 14 и 19% соответственно (рис. 3).

Передовые технологии, помимо кремниевых заводов и производителей логических ИС, также используются поставщиками схем памяти, такими как Samsung, Micron, SK Hynix и Kioxia/WD, для изготовления ДОЗУ и флеш-памяти NAND-типа (в том числе 3D). Независимо от типа приборов микронная промышленность эволюционировала до такой степени, что только очень небольшая группа компаний может разрабатывать передовые технологические процессы и изготавливать по ним ИС. Растущие проблемы проектирования и производства, а также затраты разделили мир ИС на «имущих» и «неимущих». Увеличивается степень монополизации рынка, когда крупнейшие и технологически передовые игроки занимают все большую долю, а сокращающееся число «малых сил» довольствуется сжимающимися остатками [3].

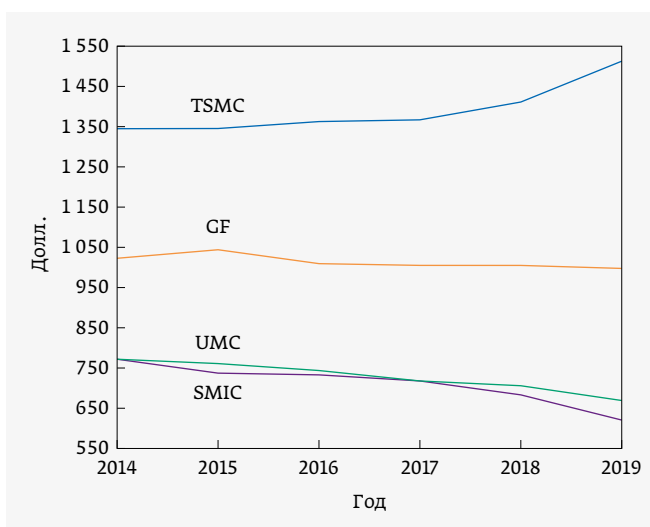


Рис. 3. Динамика стоимости обработанных пластин основных кремниевых заводов. Источник: отчеты фирм, IC Insights



ИСПЫТАНИЯ НА ЭМС

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ
РЭА И ТС В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

ТЕСТПРИБОР

125480, г. Москва
ул. Планерная, д. 7А
тел./факс: (495) 657-87-37
testpribor@test-expert.ru
www.test-expert.ru

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ МОЩНОСТИ ОСНОВНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ЗАВОДОВ

Среди рассматриваемых далее основных кремниевых заводов нет тайваньской UMC. Это сделано намерено, так как по объемам доходов она сопоставима с GlobalFoundries – они в последние годы попеременно занимают 2 и 3 места рейтинга кремниевых заводов. Кроме того, их бизнес-стратегии схожи (обе отказались от дальнейшего масштабирования на рубеже 14-/12-нм проектных норм в пользу глубокой модернизации существующих процессов), а пример GlobalFoundries просто интереснее.

TSMC

Специалисты TSMC ожидают, что основным фактором роста ее доходов в ближайшие несколько лет будут ИС для НРС. По объему заказов они превзойдут ИС для смартфонов, являющихся в настоящий момент главной статьей прибыли. Этот крупнейший в мире кремниевый завод, благодаря достигнутому технологическому превосходству, сумел по итогам III кв. 2020 года получить такой объем заказов на ИС для 5G сетей/средств связи, который позволил увеличить квартальную прибыль на 30%.

С точки зрения освоения перспективных процессов отмечается, что по итогам 2020 года на 5-нм ИС придется 8% доходов, а в следующем году этот показатель увеличится до 20%. На рынке ИС, изготовленных по 7-нм технологии, на продукцию TSMC в настоящее время приходится 88% мировых продаж. Единственным конкурентом TSMC в производстве 7-/5-нм ИС является Samsung Foundry.

Факторами, которые в ближайшее время также будут оказывать воздействие на объем получаемых TSMC заказов, являются возможное увеличение аутсорсинга со стороны корпорации Intel и изменения в политике США относительно Huawei. Кроме того, решение AMD передать TSMC часть заказов, ранее исполнявшихся GlobalFoundries, является причиной увеличения доли ИС для НРС в структуре заказов TSMC. Помимо ИС для НРС наблюдается увеличение заказов на изготовление микросхем для игровых приставок, ускорителей искусственного интеллекта (ИИ) и персональных компьютеров (ПК).

Отмечается, что в конце 2020 года и начале 2021-го объем товарно-материальных запасов клиентов TSMC будет находиться на более высоком уровне, чем обычно. Это связано с необходимостью обеспечения устойчивости цепочек поставок в условиях сохраняющейся неопределенности (пандемия, ожидание политических и экономических проблем) [4].

Капиталовложения TSMC в 2021 году достигнут 25–28 млрд долл. (в 2020 году они составили 17,2 млрд долл.). Около 80% этой суммы предназначено для освоения и расширения производственных процессов по изготовлению ИС с проектными нормами 7, 5 и 3 нм, а 10% предназначены

для технологий этажирования и корпусирования 3D ИС. Большая часть средств предназначена для 3-нм процессов, производство ИС с использованием которых должно начаться во втором полугодии 2022 года [5].

Следующим «основным» или «полным» технологическим процессом TSMC станет 3-нм технология. По сравнению с 5-нм процессом она позволяет увеличить плотность размещения логических элементов на 70%, увеличить производительность на 15% и снизить потребляемую мощность на 30%. Опытное производство по 3-нм процессу начнется в 2021 году, а серийное – во второй половине 2022 года.

В долгосрочном плане для TSMC остается неопределенным вопрос, в какой мере ее мощности будут использоваться корпорацией Intel. Все более вероятным становится перенос на мощности TSMC до 100% аутсорсинга Intel по производству центральных процессоров [4]. Предполагается, что в 2022 году Intel будет заказывать TSMC производство своих CPU по 4-нм процессу (возможно размещение аналогичных заказов на мощностях foundry-отделения Samsung), для чего TSMC построит отдельный завод по обработке 300-мм пластин [6].

GlobalFoundries

Отказавшись в 2018 году от дальнейшего масштабирования ИС на уровне 14-/12-нм проектных норм, GlobalFoundries сосредоточилась на глубокой модернизации имеющихся процессов. Ее представители утверждают, что с экономической точки зрения, 22-нм ИС GlobalFoundries третьего поколения эффективнее 10-нм приборов ее основных конкурентов. Учитывая, что современные конечные электронные системы различного назначения (самоуправляемые автомобили, автономные транспортные средства, оснащенные ИИ промышленное оборудование, экзаразмерные суперкомпьютеры, приборы крайних вычислений, носимая электроника (wearables) и т. п.) требуют подстройки некоего «базового» функционала под конкретные требования заказчика, корпорация перешла на платформенный подход, когда для обеспечения создания самых разнообразных возможностей вполне достаточно внедрения новых библиотек элементов и/или новых модулей с последующей аттестацией.

Технологические платформы

Сейчас основной подобной «расширяемой» технологической платформой является платформа 22FDX, основанная на 22-нм технологическом процессе с использованием полностью обедненного «кремния-на-изоляторе» (FD-SOI). Эта платформа была представлена в середине 2015 года в качестве недорогой альтернативы 14-/16-нм процессам на основе FinFET. Первоначально GlobalFoundries предлагала четыре варианта своей платформы для различных рынков: 22FD-ULP (с ультранизкой потребляемой мощностью), 22FD-ULL (с ультранизким током утечки), 22FD-UHP



ГРУППА КОМПАНИЙ

ЭЛЕКТРОННОЕ СПЕЦИАЛЬНОЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

АО НПП ЭСТО (Группа компаний ЭСТО) – объединение ведущих российских предприятий, специализирующихся на разработках, производстве, модернизации, продаже и сервисном обслуживании специального технологического оборудования.

Направления деятельности группы «ЭСТО»

Разработка и производство технологического оборудования (лазерное, вакуумное, сборочное, нестандартное) и внедрение технологий

Организация поставок как отдельных единиц зарубежного технологического оборудования, так и комплексных законченных технологий «под ключ»

Комплексная и частичная модернизация российского и зарубежного технологического оборудования любой сложности

Сервисное обслуживание российского и зарубежного технологического оборудования

Проектирование и строительство производств микроэлектроники

Обучение специалистов заказчика

Технологический аудит производства

Группа компаний ЭСТО более 20 лет производит оборудование для микроэлектроники в собственном инженерно-производственном комплексе метражом в 5000 кв.м в г. Зеленограде

Акционерное общество
«Научно-производственное
предприятие «Электронное
специальное технологическое
оборудование»

124460, Москва, Зеленоград,
просп. Георгиевский, д. 5, стр. 1
тел.: (499) 729-77-51,
(499) 479-12-39
info@nppesto.ru
www.nppesto.ru



(с ультравысокой производительностью) и 22FD-RFA (для интеграции РЧ и аналоговых приборов). Со временем для увеличения универсальности платформы в нее была добавлена технология магнитной (магниторезистивной) памяти – MRAM.

Одним из основных преимуществ платформы 22FDX является ее методика программно-управляемого адаптивного смещения (напряжения) подложки (adaptive body bias, ABB), которая позволяет точно подстраивать пороговое напряжение транзисторов ИС и находить правильный баланс между напряжением прямого смещения подложки (FBB), потребляемой мощностью и током утечки (reverse body bias, RBB). К дополнительным преимуществам ABB относится возможность оптимизации занимаемой кристаллом ИС площади и увеличение надежности, что значительно влияет на издержки. Функция ABB очень важна для кристаллов ИС с ультранизкой потребляемой мощностью, используемых в приборах Интернета вещей и носимой электронике.

Перспективная платформа GlobalFoundries – платформа 12FDX, представленная в 2016 году, которая, в соответствии с маршрутной картой развития FDX-технологии GlobalFoundries, должна была быть внедрена в производство в первом полугодии 2019 года. Процесс 12FDX будет «полностью масштабированной» версией процесса 22FDX, способной обеспечивать производительность приборов 10-нм класса (10–19 нм) при снижении издержек и потребляемой мощности.

Однако пока технология 22FDX пользуется растущим успехом, GlobalFoundries не намерена делать 12-нм платформу официально доступной или же объявлять предполагаемое время ее вывода на рынок. Официальная позиция GlobalFoundries состоит в том, что пока по платформе 12FDX ведутся НИОКР. Маршрутная карта развития этой платформы сформирована. Но до тех пор, пока не появятся рыночные сегменты, в которых можно будет диверсифицировать платформу 12FDX, ее вывод на рынок будет преждевременен. И для GlobalFoundries, и для ее клиентов.

Расширение производственных мощностей и государственно-частное партнерство

Основными производственными комплексами GlobalFoundries являются заводы в Дрездене (Fab 1, ФРГ) и в округе Мальта (Fab 8, штат Нью-Йорк). Специалисты отмечают, что чуть больше 50% имеющихся площадей комплекса Fab 1 можно использовать для расширения мощностей. Предполагается, что в рамках государственно-частного партнерства инвестиции в расширение Fab 1 будут осуществлять не только сама GlobalFoundries, но и правительство федеральной земли Саксония и, возможно, правительство ФРГ.

На протяжении своего существования GlobalFoundries инвестировала в собственные заводы по обработке

пластин миллиарды долларов. По отчетам корпорации, на модернизацию Fab 1, покупку и модернизацию сингапурского кремниевого завода Chartered Semiconductor Manufacturing и на завершение строительства производственного комплекса в штате Нью-Йорк в период до 2013 года было затрачено около 12 млрд долл. Имеющиеся сейчас в распоряжении GlobalFoundries производственные мощности нуждаются в модернизации – это одна из причин того, что компания никогда не сообщала о получении чистой прибыли. Но при этом она не может прекратить инвестиции – конкуренты постоянно расширяются. Обычно она тратит на модернизацию около 700 млн долл. в год, но в 2021 году эту сумму планируется довести до 1,4 млрд долл. (включая затраты на Fab 1 и Fab 8).

Отличительной чертой современного этапа инвестиционной политики GlobalFoundries является то, что она намерена осуществлять капиталовложения только при поддержке местных органов власти. Это не удивительно – производство полупроводниковых приборов является очень капиталоемкой отраслью.

Подготовка к IPO

Корпорация GlobalFoundries готовится к преобразованию в акционерное общество открытого типа путем первичного размещения акций на фондовом рынке (IPO) во второй половине 2022 года. Правда, перед этим корпорация намерена достичь определенных финансовых показателей, что позволит привлечь посредством IPO больше сторонних финансовых средств. Некоторые аналитики отмечают, что данный шаг, возможно, отражает трудности, с которыми столкнулся эмират Абу-Даби, являющийся владельцем GlobalFoundries, из-за падения цен на нефть. Правда и создание этого кремниевого завода являлось одним из шагов эмирата по подготовке к переходу на «постнефтяную» экономику. Кроме того, в планах развития GlobalFoundries первоначально предполагалось создание центра НИОКР в области микро- и нанoeлектроники на территории эмирата, а также завода по обработке пластин диаметром 300 мм. Эта часть плана не отменена – ее реализация отложена на неопределенное время. Соответственно, связывать подготовку к IPO GlobalFoundries только с падением доходов эмирата от нефтяного сектора не совсем верно. Тем более, что подготовка к IPO уже проводилась несколько лет назад, когда корпорация расширяла производственные мощности в штате Нью-Йорк, доставшиеся ей от AMD. Однако в то время GlobalFoundries сумела обойтись собственными средствами [7].

SMIC

Производственные мощности

В настоящее время в распоряжении SMIC имеется семь предприятий: три – по обработке 200-мм пластин и четыре – по обработке пластин диаметром 300 мм. Кроме того,

предполагается создание еще одного 300-мм предприятия (табл. 1).

Заводы по обработке 200-мм пластин используются SMIC для изготовления ИС по зрелым логическим процессам, а также специализированным технологиям с различными проектными нормами. По специализированным технологиям изготавливаются цифро-аналоговые ИС и радиоприборы, MEMS, ИС управления режимом электропитания и энерго-независимые ИС ЗУ. Все эти технологии пользуются большим спросом и, как ожидается, в ближайшие годы спрос на мощности по обработке 200-мм пластин вырастет.

Мощности первых заводов по обработке 300-мм пластин у SMIC не так велики, как у «гигафабрик» TSMC. Но последние предприятия, построенные корпорацией в Пекине и Шанхае, уже больше и могут вместить большой парк технологического оборудования. Например, завод по обработке 300-мм пластин Fab SN1 в Шанхае после полного оснащения и увеличения мощности до 70 тыс. пластин, начатых обработкой, в месяц будет стоить около 10 млрд долл. Разумеется, подобные предприятия требуют государственных инвестиций.

Технологии SMIC

В 2001 году на первом заводе корпорации, Fab 1, был освоен 0,25-мкм процесс. Здесь же уже в 2002 году был внедрен 0,18-мкм логический процесс. К I кв. 2008 года SMIC освоила большое число различных технологических процессов, реализуемых с использованием широкого спектра проектных норм. Она даже представила собственную 65-нм технологию. В конце концов, SMIC

Таблица 1. Заводы по обработке пластин SMIC по состоянию на III кв. 2020 года

Завод	Диаметр обрабатываемых пластин, мм	Технологический процесс	Мощность, тыс. пластин в месяц
Fab 2 P1, Пекин	300	55–180 нм	52,0
Fab 2 P2, Пекин	300	28–40 нм	50,0
Fab 1, Шанхай	200	90–350 нм	115,0
Fab 8 P 1, Шанхай	300	До 28 нм	2,0
Fab SN1, Шанхай	300	14 нм и менее	4,0
Fab 5, Шеньчжень	200	90–350 нм	55,0
Fab «X», Шеньчжень (планируется)	300	Н/д	Н/д
Fab 7 P1, Тяньцзинь	200	90–350 нм	63,0

начал изготавливать в 2012 году 40-нм ИС, в 2015 году приступил к выпуску линейки 28-нм приборов, а под занавес 2019 года предложил заказчикам 14-нм ИС, реализованные по FinFET-технологии. При всем этом ведущий китайский кремниевый завод всегда отставал от TSMC примерно на четыре года (табл. 2).

В настоящее время на зрелые технологии, характеризующиеся проектными нормами от 40/45 до 250/350 нм, приходится 92% доходов SMIC. На технологии с проектными нормами 28 и 14 нм – 6,5 и 1,3% доходов соответственно.

Отраслевые специалисты отмечают, что SMIC может пропустить 12-нм процесс и сразу перейти к 7-нм процессу. Правда «перескок» с 14-нм на 7-нм технологии не удался до сих пор и наиболее передовым микроэлектронным корпорациям (Intel, Samsung, TSMC) – они, как правило, перешагивали одно-два технологических поколения.

Таблица 2. Сопоставление мощностей TSMC и SMIC по первоначальному освоению массового производства

Технология	65 нм	40/45 нм	28 нм НКMG*	14/16 нм	12 нм	7 нм DUV**	7 нм EUV
TSMC	2 кв. 2006	4 кв. 2008	4 кв. 2011	2 кв. 2015	4 кв. 2017	2 кв. 2018	2 кв. 2019
SMIC	3 кв. 2010	4 кв. 2012	3 кв. 2015	4 кв. 2019	Н/д	4 кв. 2021(?)	Н/д
Отставание	4 года и 3 месяца	4 года	4 года	4 года и 6 месяцев	Н/д	3 года и 6 месяцев	Н/д

* НКMG (high-k metal gate (process)) – процесс формирования ИС с металлическим затвором и высоким значением диэлектрической проницаемости диэлектрика.

** DUV (deep ultraviolet) – «глубокий» ультрафиолет, излучение эксимерных лазеров с длинами волн от 248 до 193 нм, используемое в литографических системах для формирования минимальных размеров топологических элементов ИС порядка 90 нм и менее (до уровня 45–10 нм, далее предполагалось использовать EUV-излучение).

Таблица 3. Улучшение параметров 14-нм FinFET-процесса SMIC

Показатель	Улучшение параметров процесса N+1 по сравнению с базовым процессом
Увеличение производительности	20%
Снижение энергопотребления	57%
Сокращение площади SoC, занимаемой логическими элементами	63%
Сокращение общей площади SoC	55%

Характеристики разрабатываемой сейчас улучшенной версии 14-нм FinFET-процесса SMIC, получившей наименование N+1, существенно улучшены (табл. 3). По утверждениям специалистов SMIC, процесс N+1 с точки зрения потребляемой мощности и стабильности сравним с 7-нм IC, выпущенными на рынок корпорациями Samsung и TSMC.

Затраты на НИОКР

В последние годы корпорация довольно быстро наращивает свои расходы на НИОКР – если в 2014 году компания потратила на них 189,7 млн долл. (9,5% доходов от продаж), то в 2019 году этот показатель вырос до 629 млн долл. (20,7% прибыли) (табл. 4).

Изменение формы собственности

SMIC прошла путь от многонациональной корпорации к почти полностью контролируемой государством компании. Она была основана в апреле 2000 года как многонациональная корпорация с участием зарубежных инвесторов, таких как международные банки и TSMC. Когда SMIC в 2004 году было проведено IPO, выяснилось, что правительство владеет примерно 14,75% ее акций. К середине 2012 года доля KHP в SMIC выросла до 36,9%, к концу 2018 года правительство контролировало, по меньшей мере, 46,36% корпорации. Зарубежные инвесторы теперь либо владеют очень маленькими долями SMIC, либо полностью распродали их. Устойчивая финансовая поддержка имеет решающее значение для SMIC, но получение денег от различных контролируемых правительством организаций увеличивает риски попадания под санкции США.

Таблица 4. Динамика затрат SMIC на НИОКР

Показатель	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
Затраты, млн долл.	187,9	237,2	318,2	427,1	558,1	629
Доля затрат в доходах, %	9,5	10,6	10,9	13,8	16,6	20,7

Таблица 5. Линии Samsung, оказывающие услуги кремниевому заводу. Источник: Samsung

Производственный комплекс / линия	Технологический процесс, нм	Диаметр обрабатываемых пластин, мм
Остин, штат Техас, США		
S1-Line	8–65	300
S2-Line	11–65	300
S3-Line	10 и менее	300
S4-Line	65 и менее	300
Гионг, Ю. Корея, 6-Line		
	65–180	200
Хвасон, Ю. Корея, V1-Line		
	7 и менее	300

Проблемы SMIC

Основные проблемы связаны не с финансами, а с доступом к передовым технологиям, материалам и оборудованию. Это то, что попало под санкции США. Например SMIC купила в 2019 году у фирмы ASML установку EUV^{*}-литографии (ASML – монопольный производитель этого оборудования), но она до сих пор не поставлена [8]. Это не позволяет осваивать разработку и производство IC с проектными нормами 7 нм и менее.

Samsung Foundry

Как известно, корпорация Samsung стала единственным IDM, не только оказывающим услуги кремниевому заводу на свободных мощностях, но и создавшим для этого специализированное, автономное подразделение – Samsung Foundry. Сейчас число линий Samsung в Ю. Корею и США, оказывающих услуги кремниевому заводу на пластинах диаметром 200 и 300 мм, достигло шести (табл. 5). При этом стоит отметить, что если ранее к автономному foundry-подразделению (на момент его формирования) Samsung относились только линии техасского

* EUV (extreme ultraviolet) – наиболее коротковолновая часть ультрафиолетовой области спектра (предельной УФ-области спектра). Длина волны излучения EUV-степперов – 13,5 нм.

комплекса, то сейчас в его распоряжении и линии в Ю. Корее.

Важным фактором освоения новых технологических процессов является освоение корпорацией Samsung Electronics EUV-литографии. В феврале 2020 года было начато массовое изготовление ИС (опытное – с июля 2019 года) с ее использованием на новой производственной линии – VI. Она предназначена для выпуска ИС по 7- и 5-нм технологическим процессам для мобильной техники. Сооружение линии было начато в феврале 2018 года, в дальнейшем планируется освоить 3-нм процесс.

К концу 2020 года суммарные инвестиции в линию VI достигнут 6 млрд долл., а общий объем производственных мощностей, способных производить ИС с топологиями 7 нм и менее по сравнению с концом 2019 года более чем утроится. Совместно с линией S3 линия VI, как ожидается, сыграет важную роль в удовлетворении быстро растущего спроса на услуги кремниевого завода по проектным нормам менее 10 нм [9].

В настоящее время Samsung планирует расширить свои 5-нм мощности в 2021 году. Это обусловлено ростом производственных заказов от Nvidia на графические процессоры GeForce, основанные на архитектуре Horner. Также по этим проектным нормам изготавливаются процессоры Snapdragon 885 для корпорации Qualcomm и собственные (Samsung) флагманские «системы-на-кристалле» (SoC) Exynos. Несмотря на это, Samsung, как ожидается, будет отставать от TSMC примерно на 20% с точки зрения мощностей по производству 5-нм ИС (рис. 4).

Отмечается, что на данный момент производить ИС с проектными нормами 7 нм и менее могут только TSMC и Samsung [10].

ОСВОЕНИЕ НОВЫХ СФЕР ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Освоение все меньших проектных норм при производстве ИС идет параллельно с растущим использованием технологий интеграции разнородных (гетерогенных) кристаллов ИС, что требует все более широкого применения 2,5-/3D-методик корпусирования. Кремниевые заводы активно пытаются выйти на рынок услуг сборки/корпусирования, который традиционно был областью деятельности OSAT-фирм (аутсорсинговые услуги по сборке и тестированию полупроводниковых приборов) и IDM (рис. 5). Методики перспективного корпусирования переходят с уровня подложек на уровень кремниевых пластин, что дает возможность кремниевым заводам использовать

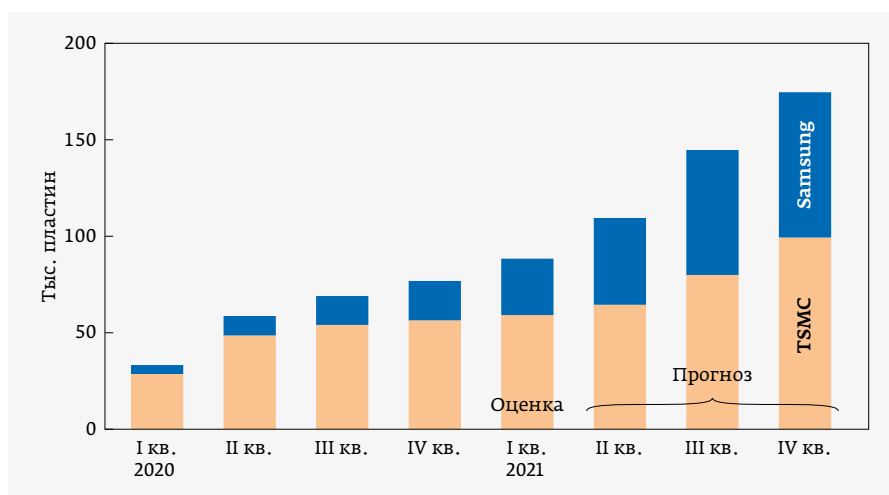


Рис. 4. Структура мировых мощностей по обработке пластин с использованием 5-нм техпроцесса (тыс. пластин, начатых обработкой, в месяц).

Источник: TrendForce

в сегменте перспективного корпусирования свои производственно-технологические преимущества и стать основными разработчиками инновационных методов корпусирования ИС. TSMC, в частности, стала лидером в широкой области разработки инновационных перспективных платформ корпусирования – от InFO* до 2,5D-технологии корпусирования с использованием кремниевых интерпозеров (CoWoS) и 3D SoIC (система-на-ИС).

В текущем рейтинге доходов от услуг корпусирования TSMC занимает 4-е место среди поставщиков услуг OSAT. Другие кремниевые заводы, такие как UMC, SMIC, GlobalFoundries и XMC, также осуществляют инвестиции в перспективные технологии корпусирования [11].

* * *

Итак, крупнейшим кремниевым заводом, обладающим наиболее передовыми технологическими процессами и наибольшими объемами продаж, по-прежнему является TSMC. Ее основными целями на ближайшую перспективу является расширение выпуска 5-нм ИС, доработка и освоение 3-нм процесса. GlobalFoundries явно сделал ставку на технологии FD-SOI, большим успехом пользуется его платформа 22FDX, из-за чего вывод на рынок

* InFO (Integrated Fan-Out) – технология кремниевого завода TSMC, интегрированное корпусирование на уровне пластины с разветвлением, один из видов компромисса между корпусированием на уровне кристалла и корпусированием на уровне пластины. Полупроводниковая пластина режется на кристаллы и отдельные кристаллы ИС встраиваются в новую «искусственную» пластину. В полученной встраиваемой структуре между отдельными кристаллами образуется достаточно места, что позволяет формировать разветвленный слой перераспределения. Вариант технологии FO WLP.



Рис. 5. Тенденция каннибализации рынка услуг OSAT. *Источник: Yole Développement*

платформы 12FDX откладывается. Также GlobalFoundries готовится к IPO на бирже NASDAQ во второй половине 2022 года. Автономное подразделение корпорации Samsung – Samsung Foundry – вышло в последнее время в число лидеров рынка услуг кремниевых заводов. В 2021 году Samsung планирует расширить свои 5-нм мощности. SMIC остается опорой выполнения национальных программ КНР в области микроэлектроники. Однако введенные против него санкции США существенно осложняют освоение технологических процессов с проектными нормами менее 14/12 нм. Последние данные о намерении Intel изготавливать 4-нм процессоры на мощностях TSMC говорит и о возможном переходе Intel на fabless-модель, и о ее технологическом отставании от TSMC и Samsung. Если переход на fabless-модель состоится, то он скорее всего будет происходить через этап fablite*.

В ближайшее время на рынке кремниевых заводов могут произойти подвижки. В течение всего 2020 года в Конгрессе США обсуждались проекты «Закона о создании полезных стимулов разработки и производства полупроводниковых приборов в Америке» (Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors (CHIPS) for America Act) и «Закона об американских кремниевых заводах» (American Foundries Act). Оба в начале января 2021 года одобрены Конгрессом в рамках преодоления вето Трампа на очередной бюджет МО США. Первый закон предусматривает выделение субсидий на создание заводов по обработке пластин в размере более 10 млрд долл. Кроме того, предусматривается пакет налоговых льгот и стимулов, которые при сложении с субсидиями дают в сумме порядка 22 млрд долл. Второй – позволяет субсидировать строительство перспективного кремниевого завода на сумму

* Fablite (fab-lite) – так называемая стратегия «легких активов», используемая IDM. Существует в двух вариантах. Первый – на уровне топологий до 90–65 нм предусматривала продолжение производства на собственных мощностях только новейших ИС (с высокой добавленной стоимостью) по наиболее передовым процессам; производство ИС со средним и меньшим уровнем добавленной стоимости передавалось сторонним фирмам в рамках использования модели fabless-foundry. При переходе на топологии 45 нм и менее предусматривает продолжение функционирования своих наиболее передовых

и экономически эффективных производств, отказ от строительства собственных заводов под топологии порядка 45 нм и менее в пользу использования на уровне этих топологий модели fabless-foundry. Является промежуточным этапом при переходе от IDM к fabless-фирме (пример – ADM). Второй – при переходе на топологии 45–32 нм и менее оставляются только новейшие опытно-экспериментальные мощности для отработки перспективных технологий (FD SOI например), а серийное производство отдается на кремниевые заводы или свободные мощности IDM (пример – STMicroelectronics).

до 5 млрд долл. Данный вопрос, как и «Холодная технологическая война» США и КНР, применительно к микроэлектронике, заслуживает отдельного рассмотрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **David Manners.** 2020 foundry revenue up 23.7% on 2019. Electronics News, 29th December 2020
<https://www.electronicsworld.com/uncategorised/2020-foundry-revenue-23-7-2019-2020-12/>
2. Cambricon's first AI training chip starts mass production with TSMC's 7nm process. January 21, 2021 By: Tom Kang
<https://cncpost.com/2021/01/21/cambricons-first-ai-training-chip-starts-mass-production-with-tsmcs-7nm-process/>
3. Revenue per Wafer Rising As Demand Grows for sub-7nm IC Processes. Design&Reuse, February 20, 2020
<https://www.design-reuse.com/news/47566/revenue-per-wafer-rising-as-demand-grows-for-sub-7nm-ic-processes.html>
4. **Patterson A.** TSMC Sees HPC As Next Inflection Point. EE Times, 10.20.2020
https://www.eetimes.com/tsmc-sees-hpc-as-next-inflection-point/?utm_source=newsletter&utm_campaign=link&utm_medium=EETimesDaily-20201022&oly_enc_id=5245B7817912J8Z
5. **Manners D.** TSMC budgets \$25-28bn capex. Electronics Weekly, 14th January 2021
<https://www.electronicsworld.com/uncategorised/tsmc-bud-gets-25-28bn-capex-2021-01/>
6. For the release of 4-nm Intel products, TSMC will have to allocate an entire enterprise. World Today News, January 09, 2021
<https://www.world-today-news.com/for-the-release-of-4-nm-intel-products-tsmc-will-have-to-allocate-an-entire-enterprise/>
7. **Shilov A.** GlobalFoundries Offers Ambitious Tech Plans, While Eying an IPO. EE Times, 10.21.2020
https://www.eetimes.com/globalfoundries-offers-ambitious-tech-plans-while-eying-an-ipo/?utm_source=newsletter&utm_campaign=link&utm_medium=EETimesDaily-20201022&oly_enc_id=5245B7817912J8Z
8. **Shilov A.** SMIC: Advanced Process Technologies and Gov't Funding. EE Times, 07.17.2020
<https://www.eetimes.com/smic-advanced-process-technologies-and-govt-funding/>
9. Samsung Electronics Begins Mass Production at New EUV Manufacturing Line. Semiconductor Digest, February 20, 2020
<https://www.semiconductor-digest.com/2020/02/20/samsung-electronics-begins-mass-production-at-new-euv-manufacturing-line/>
10. **Manners D.** Foundry revenue to grow 23.8% this year. Electronics Weekly, 19th November 2020
<https://www.electronicsworld.com/news/business/foundry-revenue-grow-23-8-year-2020-11/>
11. **Kumar S.** Status of the Advanced Packaging Industry. Semiconductor Digest, December 1, 2020
<https://www.semiconductor-digest.com/2020/12/01/status-of-the-advanced-packaging-industry/>

Надежные тестовые решения требуют лучших технологий

РАЗРАБОТКА

Получайте полностью работоспособные опытные образцы

ПРОИЗВОДСТВО

Сделайте производственную линию совершенной с технологиями JTAG

СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ

Ремонтируйте цифровые платы даже при отсутствии CAD-данных на них

We *are* boundary-scan.®

www.jtag.com • www.jtaglive.com • +7 812 602 09 15 • russia@jtag.com

№1 (00202) 2021

ЭЛЕКТРОНИКА НАУКА | ТЕХНОЛОГИЯ | БИЗНЕС

77