

Современное состояние производственной базы микроэлектроники

Ключевые слова: завод по обработке пластин, микроэлектроника, оборудование, производственная база, технологический процесс.

В настоящее время производственная база микроэлектроники демонстрирует разнонаправленные тенденции. С одной стороны, идет освоение новых технологических процессов, характеризующихся все меньшими топологическими нормами, что приводит к сооружению новых, все более дорогостоящих производств по обработке 300-мм пластин. С другой стороны, возрождается интерес к 200-мм пластинам. Сформированные на них чипы востребованы в применениях, не требующих новейших ИС – например, в Интернете вещей, электромобилях и т. д.

МИРОВЫЕ ЛИДЕРЫ ПО УСТАНОВЛЕННОМУ ОБОРУДОВАНИЮ ОБРАБОТКИ ПЛАСТИН

Корпорация IC Insights недавно опубликовала новое исследование – Global Wafer Capacity 2020–2024 report, – в котором проводится детальный анализ современного состояния и перспектив развития производственной базы микроэлектроники. Мощности даются в разбивке по диаметру обрабатываемых пластин, применяемым технологическим процессам (с учетом топологических норм), типам производимой продукции и географическому размещению.

В исследовании также представлен рейтинг 25 крупнейших фирм с точки зрения установленных мощностей по обработке пластин (месячная обработка в натуральном выражении по состоянию на декабрь 2019 г.) в пересчете на эквивалент 200-мм структур. У пяти мировых лидеров мощность превышает

1 млн пластин, начатых обработкой, в месяц (табл. 1). По состоянию на конец 2019 г. на них в совокупности приходится 55% установленных мощностей. В 2009 г. этот показатель для пяти лидирующих полупроводниковых фирм составлял 36%. Мощности других ведущих поставщиков полупроводниковых приборов за пределами пятерки, таких как Intel (817 тыс. пластин в месяц), UMC (753 тыс. пластин в месяц), GlobalFoundries, Texas Instruments и STMicroelectronics, быстро падают.

Относительно указанных фирм IC Insights приводит еще ряд данных.

- По состоянию на декабрь 2019 г. Samsung обладала самой большой базой установленного оборудования по обработке пластин, что соответствовало 15% мирового



ТАБЛИЦА 1
ЛИДЕРЫ ПО ОБЪЕМУ УСТАНОВЛЕННЫХ МОЩНОСТЕЙ ПО ОБРАБОТКЕ ПЛАСТИН (В ПЕРЕСЧЕТЕ НА ЭКВИВАЛЕНТ 200-М СТРУКТУР)

| Место | | Фирма | Установленные мощности, млн пластин в месяц | | Прирост, % | Доля в мире, % |
|---------|---------|------------------------|---|-----------------|------------|----------------|
| 2019 г. | 2018 г. | | Декабрь 2019 г. | Декабрь 2018 г. | | |
| 1 | 1 | Samsung (Южная Корея) | 2,935 | 2,934 | 0 | 15,0 |
| 2 | 2 | TSMC* (Тайвань) | 2,505 | 2,439 | 3 | 12,8 |
| 3 | 3 | Micron** (США) | 1,841 | 1,685 | 9 | 9,4 |
| 4 | 4 | SK Hynix (Южная Корея) | 1,743 | 1,630 | 7 | 8,9 |
| 5 | 5 | Kioxia/WD (Япония) | 1,406 | 1,361 | 3 | 7,2 |

* Включая доли в совместных предприятиях SSMC и VIS.

** Включая долю в СП IM Flash в 2018 г.

парка. Около двух третей обрабатываемых пластин использовалось для изготовления ДОЗУ и флэш-памяти NAND-типа. Основные проекты сооружения новых заводов по обработке пластин реализуются на территориях существующих производственных комплексов в Хвасоне, Пхентхэке (Южная Корея) и Сиане (КНР).

- Крупнейший в мире «чистый» кремниевый завод TSMC осуществляет строительство новых мощностей (Fab 15, этапы 9/10 сооружения) в Тайчжуне (Тайвань) и нового завода (Fab 18) рядом с производственным комплексом Fab 14 в Тайнани (Тайвань).
- Для корпорации Micron основным событием 2019 г. с точки зрения производственных мощностей стало открытие нового завода по обработке 300-мм пластин в Сингапуре. Также была выкуплена доля корпорации Intel в совместном предприятии в Лихае (шт. Юта). В 2020 г. Micron планирует открыть второй завод в Манассасе (шт. Вирджиния).
- Южнокорейская корпорация SK Hynix более 80% обрабатываемых пластин ис-

пользует для производства ДОЗУ и флэш-памяти NAND-типа. В 2019 г. фирма завершила сооружение новых заводов по обработке пластин M15 (Чхонджу, Южная Корея) и C2F (Уси, КНР). Следующий крупный производственный комплекс (Fab M16) будет построен в Инчхоне (Южная Корея).

- Корпорация Kioxia (ранее Toshiba Memory) обладает значительными мощностями по изготовлению флэш-памяти NAND-типа, ее партнером по расширению производственных мощностей и совершенствованию технологических процессов является корпорация Western Digital (Ирвайн, шт. Калифорния). В мощностях Kioxia не учитываются данные Toshiba Electronic Devices.
- Крупнейшие пять «чистых» кремниевых заводов – TSMC, GlobalFoundries, UMC, SMIC и Powerchip (включая Nexchip) входят в число 12 крупнейших обладателей производственных мощностей. В целом на них в декабре 2019 г. пришлось около 4,8 млн обработанных пластин, что составило примерно 24% общемирового показателя [1].

ОСВОЕНИЕ НОВЕЙШИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Успех на рынке и распространение ИС во многом зависели от способности производителей и дальше предлагать все больше производительности и функциональности за те же деньги. Снижение удельной стоимости ИС (на функцию или единицу производительности) неизбежно связано с растущим арсеналом технологий и методов обработки пластин, поскольку основные КМОП-процессы достигают своих пределов развития с теоретической, практической и экономической точек зрения.

По данным исследовательской корпорации IC Insights за январь 2020 г., многие поставщики ИС в настоящее время разрабатывают высокопроизводительные микропроцессоры,

прикладные процессоры и перспективные логические приборы на основе 10-нм и 7-нм технологий (рис. 1) [2].

Важным фактором освоения новых технологических процессов стало внедрение EUV-литографии. Недавно корпорация Samsung Electronics начала массовое изготовление ИС с использованием EUV-литографии на новой производственной линии V1, предназначенной для выпуска ИС с топологическими нормами 7 нм и менее. Ее сооружение было начато в феврале 2018 г., опытное производство открыто в июле 2019 г. Сейчас здесь делаются современные микросхемы для мобильной техники по 7-нм и 6-нм технологиче-

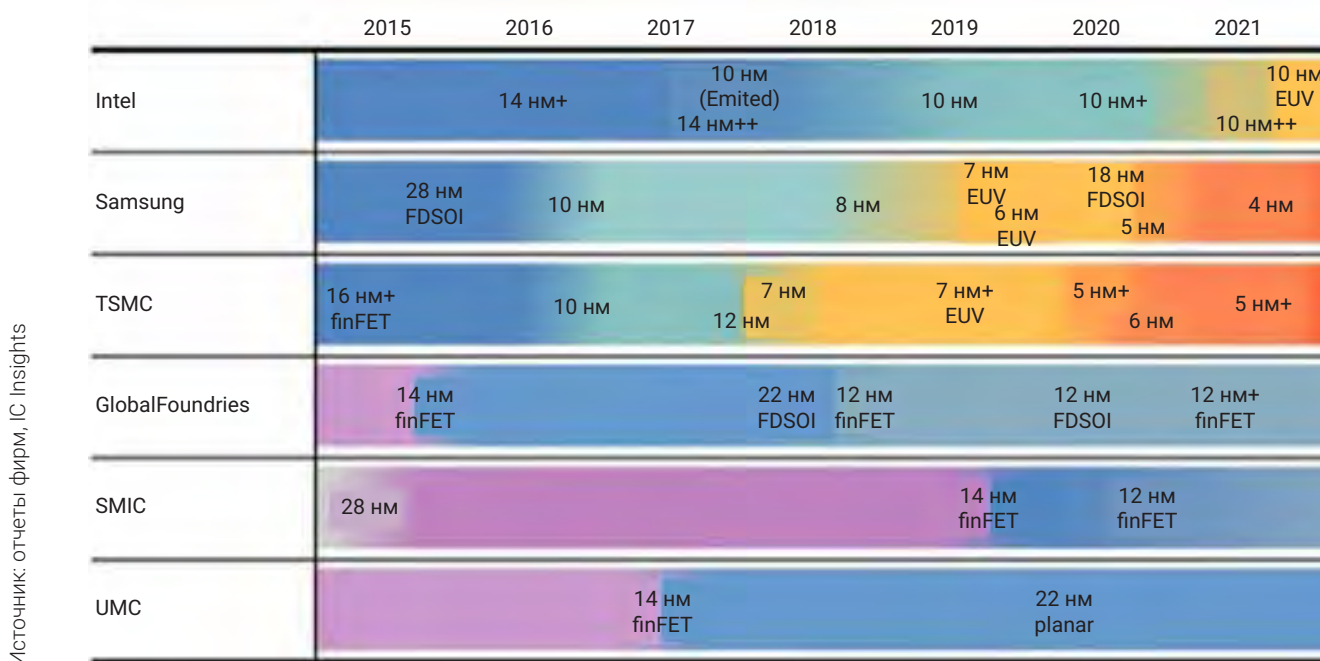


Рисунок 1. Маршрутные карты разработки перспективных технологических процессов для серийного производства

Примечание. Знаки «+»/«++» после топологической нормы означают усовершенствованные варианты базовой технологии (с малой потребляемой мощностью или высокой производительностью).

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

** FDSOI – полностью обедненный «кремний-на-изоляторе».

*** FinFET – полевой МОП-транзистор с двумя изолированными затворами, созданный на КНИ-подложке. Затвор расположен на двух, трех или четырех сторонах канала или окружает канал, формируя таким образом структуру двойного затвора. Форма области истока и стока на поверхности кремния напоминает спинной плавник рыбы (fin).



ТАБЛИЦА 2
ЛИНИИ SAMSUNG, ОКАЗЫВАЮЩИЕ УСЛУГИ КРЕМНИЕВОГО ЗАВОДА

| Производственный комплекс, линия | Технологический процесс, нм | Диаметр обрабатываемых пластин, мм |
|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| Остин, шт. 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, Южная Корея, 6-Line | 65–180 | 200 |
| Хвасон, Южная Корея, V1-Line | 7 и менее | 300 |

Источник: Samsung

ским процессам, в дальнейшем планируется освоить 3-нм процесс. С пуском V1 число линий Samsung в Южной Корее и США, оказывающих услуги по контрактному производству ИС на пластинах диаметром 200 и 300 мм, достигло шести (табл. 2). Стоит отметить, что если на момент формирования автономного foundry-подразделения Samsung к нему относились только линии тexasского комплекса, то сейчас в его распоряжении и линии в Южной Корее.

К концу 2020 г. суммарные инвестиции в линию V1 достигнут 6 млрд долл., а общий объем производственных мощностей, способных производить ИС с топологиями 7 нм и менее, по сравнению с концом 2019 г. более чем

утроится. Совместно с линией S3 линия V1, как ожидается, сыграет важную роль в удовлетворении быстро растущего спроса на услуги кремниевого завода по проектным нормам менее 10 нм. По мере перехода полупроводниковой промышленности к технологиям со все меньшими размерами топологических элементов растет важность освоения EUV-литографии, обеспечивающей масштабирование сложных структур кристаллов ИС на пластинах, и происходит ускорение ее внедрения. Микросхемы, изготовленные при помощи данной технологии, – оптимальный выбор для таких применений, как сети и средства связи 5G, искусственный интеллект и автомобильная электроника [3].

РЕНТАБЕЛЬНОСТЬ ВЕДУЩИХ КРЕМНИЕВЫХ ЗАВОДОВ

Разнообразие предлагаемых при переходе к меньшим топологическим нормам новых технологических процессов высоко как никогда ранее, что затрудняет их сопоставление. Кроме того, стали регулярно появляться «плюсовые» или производные версии каждого поколения процесса и полуэтапы между основными технологическими уровнями. Например, 14LPP (low power plus) – это версия с расширенными параметрами 14-нм процесса из-

готовления приборов с малой потребляемой мощностью.

В мире кремниевых заводов обладание передовыми производственными мощностями дает явные преимущества. В 2019 г. корпорация TSMC была единственным кремниевым заводом, производящим ИС по 7-нм процессу. Ее валовой доход на одну обработанную пластину значительно увеличился, так как ведущие fabless-фирмы выстроились в очередь



за изготовлением их новейших ИС. TSMC стал единственным «чистым» кремниевым заводом, удельная стоимость обработанных пластин которого в 2019 г. увеличилась по сравнению с 2014 г. на 13%, в то время как стоимость пластин GlobalFoundries, UMC и SMIC (наименьшие топологические нормы 12/14 нм) снизилась за указанный период на 2, 14 и 19% соответственно (рис. 2).

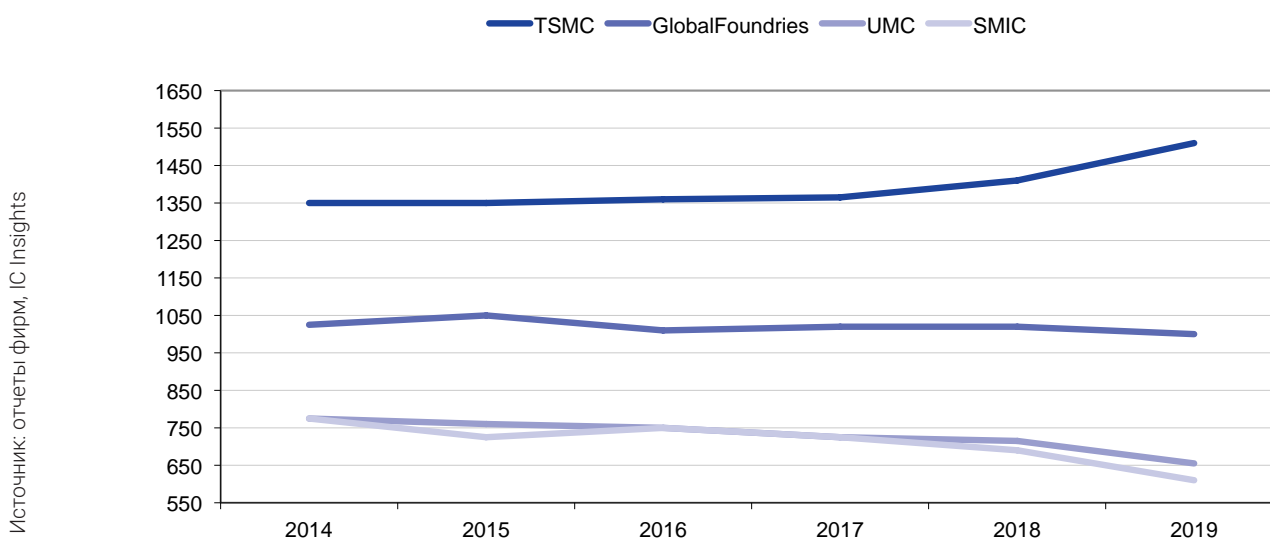
Помимо кремниевых заводов и производителей логических ИС передовые технологии также применяют поставщики схем памяти, такие как Samsung, Micron, SK Hynix и Kioxia/WD, – для изготовления ДОЗУ и флэш-памяти

NAND-типа (в том числе 3D). Независимо от типа приборов микроэлектронная 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 колоссальные затраты разделили мир производителей ИС на «имущих» и «неимущих». Увеличивается степень монополизации рынка, когда крупнейшие и технологически передовые игроки занимают все большую долю, а сокращающееся число «малых сих» довольствуется сжимающимися остатками [2].

ОЖИДАЕТСЯ РОСТ СПРОСА НА ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ МОЩНОСТИ ПО ОБРАБОТКЕ 200-ММ ПЛАСТИН

В ближайшие месяцы возможно возникновение дефицита производственных мощностей и оборудования – из-за растущего спроса на них. Долгие годы рынки ИС, производимых на 200-мм пластинах, и оборудования для их обработки были очень крупными. Сейчас заво-

ды по обработке 200-мм пластин представляют собой в основном устаревшие предприятия, производящие ИС по зрелым технологиям с топологическими нормами в диапазоне от 350 нм (0,35 мкм) до 90 нм. Подобных производств в мире около двухсот. Более современные за-



Источник: отчеты фирм, IC Insights

Рисунок 2. Динамика стоимости обработанных пластин основных кремниевых заводов, долл.



МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА

Планы развития производственных мощностей наглядно демонстрируют, что драйверами развития рынка полупроводниковой промышленности остаются продуктовые ниши DRAM и NAND-памяти. Объемы производства микросхем современного технологического уровня растут: все ведущие мировые производители расширяют свои производственные мощности, строят производства, ориентированные на новые технологические уровни 10 нм и менее (Samsung сообщает о стремлении к 2021 г. перейти на 3 нм). Показательно и то, что технологические лидеры внедряют на новых производствах с технологическим уровнем 7 нм и менее EUV-фотолитографию, что свидетельствует о том, что они взяли курс на исключение принципа мультипаттернирования (а точнее квадрупаттернирования) в пользу формирования фоторезистивной маски одним фотошаблоном методом EUV-фотолитографии. Это уменьшает себестоимость производства за счет снижения количества используемых фотошаблонов и фотолитографий критических слоев, а также уменьшает время производственного цикла, что позволяет фабрикам увеличить выпуск пластин на тех же производственных площадях. Еще одним фактором развития являются технологи-



ческие процессы с низкопотребляющими опциями, например 14++ нм фирмы TSMC. Они актуальны для реализации мобильных применений, стоящих на втором месте после микросхем памяти в числе основных драйверов.

Павел Игнатов, директор по развитию технологий АО «НИИМЭ»

воды производят ИС на 300-мм пластинах, однако в зависимости от года их запуска и ассортимента продукции на них могут применяться технологии с проектными нормами 65 нм и более, а на самых современных предприятиях – технологии с размерами критических элементов 16/14 нм и менее.

Развитие Интернета вещей и ряда других секторов конечного потребления ИС меняет ситуацию. Для подобных применений не нужны сверхсовременные технологии с минимальными топологиями – вполне подходят ИС, выпускаемые на 200-мм производствах. Соответственно, в ближайшее время возмож-

но сооружение 10–17 заводов по обработке 200-мм пластин (табл. 3) – при том что потребуются решить проблемы с оборудованием для них. Отмечается, что большинство новых производств может появиться в КНР.

Сегодня заводы по обработке 200-мм пластин являют собой пеструю картину – во многом все определяется коэффициентом использования производственных мощностей. У кремниевых заводов он составляет 80–100%, а у предприятий полного цикла (IDM) – 50–100%. При этом 200-мм линии китайских кремниевых заводов демонстрируют загрузку своих мощностей на уровне более 90%.



ТАБЛИЦА 3 ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ ЗАВОДОВ ПО ОБРАБОТКЕ 200-ММ ПЛАСТИН

Источник: Semiconductor Engineering

| Год | Число заводов |
|------|---------------|
| 1995 | 62 |
| 2007 | 193 |
| 2016 | 189 |
| 2017 | 193 |
| 2022 | 213 |

Конъюнктура рынка побуждает поставщиков сооружать новые линии по обработке 200-мм пластин, но этому препятствует дефицит оборудования. Действительно, промышленности требуется более 2–3 тыс. новых или модернизированных инструментальных средств, а доступно только 500. Корпорации Lam Research, TEL, Applied Materials и ряд других поставщиков оборудования приступили к производству новых инструментальных средств с целью удовлетворения существующего спроса. Разработку 200-мм инструментальных средств начали и китайские производители. Поставщики бывшего в использовании оборудования также пытаются извлечь выгоды из сложившейся ситуации. Тем не менее пока оборудование для обработки 200-мм пластин трудно найти, или же оно оказывается слишком дорогим.

Спрос на 200-мм оборудование стимулируется не только Интернетом вещей, но и поставщиками мощных полупроводниковых приборов и рынком электромобилей. В настоящее время многие производители SiC-приборов, изготавливающие их на пластинах диаметром 150 мм, пытаются перейти на обработку 200-мм пластин – с целью снижения издержек производства (при увеличении диаметра на пластине можно разместить в 1,3–1,8 раза больше кристаллов при тех же проектных нормах, а при одновременном уменьшении топологий этот показатель существенно возрастает).

Построить новые 200-мм заводы для изготовления мощных SiC-приборов планируют фирмы Cree, Rohm и STMicroelectronics. Заметим, что мощные SiC-приборы часто используются в различных узлах электромобилей.

Для производства наиболее сложны литографические системы обработки 200-мм пластин. Сейчас их поставляет – как новые, так и модернизированные – корпорация Nikon и еще несколько фирм. Nikon, в частности, предлагает платформы с длиной волны излучения 365 и 248 нм. Специалисты корпорации считают, что дефицит установок литографии для 200-мм пластин продлится весь 2020 г.

Корпорация Lam Research продолжает производить оборудование осаждения, травления и очистки для заводов по обработке 200-мм пластин. Интересно отметить, что некоторые системы осаждения и удаления резиста выводились на рынок в качестве решений, предназначенных только для 300-мм пластин. Теперь специалисты корпорации предлагают версии этих установок для обработки 200-мм пластин, что, как ожидается, расширит возможности и повысит производительность 200-мм линий.

Также большое значение для заводов по обработке 200-мм пластин имеет контрольно-измерительное и метрологическое оборудование. Здесь, по оценкам отраслевых обозревателей, ситуация легче, так как многие подобные системы не привязаны жестко к диаметру обрабатываемых пластин.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гонка за все меньшими топологиями с точки зрения создания перспективных производств давно превратилась в дорогостоящее занятие, которое под силу только крупнейшим корпорациям. Правда, современные инструментальные средства САПР позволяют проектировать ИС с новейшими технологиями достаточно большому числу fabless-фирм разных разме-

ров, основным фактором успеха для которых становится гарантированный доступ к соответствующим производственным мощностям. В то же время у владельцев зрелых производственных мощностей остается достаточно пространства для маневра – за счет развивающихся применений, не требующих использования ИС с минимальными топологиями.



1. *Five Semiconductor Companies Hold 53% of Global Wafer Capacity. IC Insights, February 13, 2020: <http://www.icinsights.com/news/bulletins/Five-Semiconductor-Companies-Hold-53-Of-Global-Wafer-Capacity/>*

2. *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>*

3. *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/>*

4. *LaPedus Mark. Demand Picks Up For 200mm. Semiconductor Engineering, February 20, 2020: <https://semiengineering.com/demand-picks-up-for-200mm/>*