

Рынок технологического оборудования, проблемы EUV-литографии и перспективных методов корпусирования

М. Макушин¹

УДК 621.37 | ВАК 05.27.06

Продажи полупроводникового оборудования, возможно, будут увеличиваться третий год подряд. При этом рост продаж ожидается как по оборудованию для изготовления ИС как по перспективным, так и зрелым проектным нормам. Освоение технологий 2,5D- и 3D-корпусирования начинает сдвигать центр тяжести создания добавленной стоимости от начальных этапов обработки пластин к завершающим этапам изготовления ИС и полупроводниковых приборов. Движущими факторами дальнейшего развития рынка оборудования являются расширение использования EUV-литографии и перспективных методов корпусирования.

Продажи полупроводникового оборудования тесно связаны с планами фирм-изготовителей по развитию производственной базы. Необходимость ее расширения диктуется растущим спросом на полупроводниковые приборы и ИС различного назначения и реализованных по различным проектным нормам. Это связано с процессами цифровизации экономики, распространением Интернета вещей, появлением новых областей применения ИС и конечных электронных систем, а также многими другими факторами. Соответственно, текущая конъюнктура рынка диктует производителям необходимость расширения производственных мощностей не только по обработке 300-мм пластин, но и по обработке пластин меньших диаметров. Продолжается тенденция перевода производства ряда типов аналоговых ИС, мощных полупроводниковых приборов на 300-мм пластины – с целью снижения издержек производства. В то же время по ряду направлений наблюдается «ренессанс» 200-мм производств – для приборов, не требующих при изготовлении новейших технологий с минимальными проектными нормами.

Дальнейшее масштабирование ИС связано с расширением применения EUV-литографии^{*}, но у ее методов однократного формирования рисунка окно применений оказалось ограниченным. Дальнейшее направление развития – методы многократного формирования рисунка

и использование установок с увеличенной числовой апертурой. В то же время EUV-литография демонстрирует высокий уровень монополизации – EUV-степперы изготавливаются всего одним поставщиком. Большое значение для дальнейшего прогресса микроэлектроники имеет и освоение перспективных методов и платформ корпусирования. На этом направлении, благодаря гетерогенной интеграции, возможно создание не менее эффективных изделий, чем при использовании EUV-литографии.

РАЗВИТИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БАЗЫ КАК СТИМУЛ РЫНКА ОБОРУДОВАНИЯ

Особенностью настоящего времени является то, что развитие производственной базы полупроводниковой промышленности (микроэлектроники) во многом обусловлено высоким спросом не только на ИС с новейшими, минимальными проектными нормами, но и на ИС и другие полупроводниковые приборы, реализованные по более зрелым технологиям. В первом случае речь идет о производителях средств связи и вычислительной техники, таких как смартфоны, планшетные ПК, ноутбуки, настольные ПК, а также об изготовителях широкого круга потребительской электроники, включая носимую электронику (wearables^{**}). Во втором случае разговор уже о производителях автомобильной электроники, средств Интернета вещей, силовой электроники и т. п. Здесь не требуются минимальные проектные нормы и кристаллы необходимых ИС и полупроводниковых приборов вполне можно формировать на пластинах диаметром 200 мм и менее.

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

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

** Wearable electronics, wearables – носимые устройства, например, микродисплей, встроенный в очки, или датчики и другие устройства, вмонтированные в одежду или обувь.

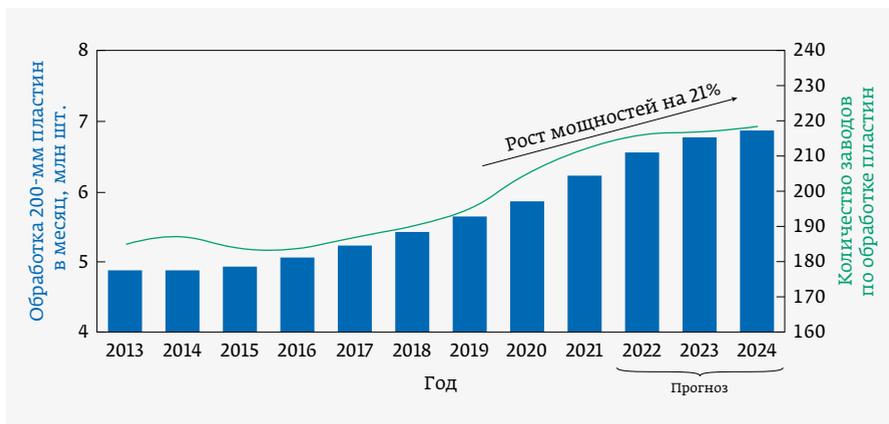


Рис. 1. Расширение мощностей по обработке пластин диаметром 200 мм (число и суммарная мощность заводов по обработке пластин, исключая линии по обработке эпитаксиальных пластин, вероятность введения в строй / продолжения работы существующих линий >50%)

Заводы по обработке пластин относятся к сектору начальных этапов производства ИС, завершающими этапами их производства занимаются предприятия по сборке, корпусированию и тестированию ИС. В этом секторе также наблюдается рост числа как вводимых в строй предприятий, так и парка установленного оборудования.

Мощности по обработке 200-мм пластин

По данным SEMI, производители полупроводниковых приборов намерены за период с 2020 года до конца 2024 года увеличить мощности по обработке 200-мм пластин на 1,2 млн шт. в месяц или на 21% (рис. 1). В конце прогнозируемого периода мощность обработки пластин составит 6,9 млн шт. в месяц. После роста расходов на оборудование обработки 200-мм пластин до 5,3 млрд долл. в прошлом году, в 2022 году они составят 4,9 млрд долл., а в 2023 году – более 3,0 млрд долл., поскольку загрузка мощностей по обработке таких пластин остается на высоком уровне, а мировая полупроводниковая промышленность работает над преодолением дефицита ИС.

За пять лет будет создано 25 новых 200-мм линий, чтобы помочь удовлетворить растущий спрос на ИС и другие полупроводниковые приборы, для таких применений, как сети/средства связи 5G, автомобильная электроника и приборы Интернета вещей. Ассортимент новых линий – аналоговые ИС, ИС управления режимом электропитания, задающие

ИС для дисплеев, МОП-транзисторы, микроконтроллеры и датчики. Что касается мирового парка установленных мощностей по обработке 200-мм пластин, то в 2022 году на кремниевые заводы (foundry, контрактное производство ИС) будет приходиться более 50%, на производителей аналоговых ИС – 19%, изготовителей дискретных полупроводниковых приборов и мощных полупроводниковых приборов – 12%. С точки зрения географического распределения 200-мм производственных мощностей в 2022 году мировое лидерство по-прежнему останется за КНР – 21%, далее следуют Япония (16%), Тайвань (15%), регион Европы и Ближнего Востока (15%).

Инвестиции в оборудование заводов и линий по обработке 200-мм пластин, по прогнозам, в 2023 году останутся на уровне более 3 млрд долл., при этом на сектор кремниевых заводов придется 54%, за которым следуют изготовители дискретных / силовых полупроводниковых приборов (20%) и аналоговых приборов (19%) [1].

Рост числа заводов по обработке пластин диаметром 300 мм

В конце 2021 года в мире было 153 завода по обработке 300-мм пластин. Они производили ИС, включая КМОП-формирователи сигналов изображения, а также прочие полупроводниковые приборы, включая мощные



Рис. 2. Расширение мощностей по обработке пластин диаметром 300 мм

Таблица 1. Перечень заводов по обработке 300-мм пластин, открывающихся в 2022 году

Фирма	Название завода	Дислокация	Продукция
CR Micro	Runxin Microelectronics	Чунцин, КНР	Мощные полупроводниковые приборы
Silan	Xiamen Silan	Сямынь, КНР	Мощные полупроводниковые приборы, датчики
SK Hynix	M15, 2-я очередь	Чхонджу, Ю. Корея	Флеш-память NAND-типа
SMIC	SMIC Shenzhen	Шэньчжэнь, КНР	Кремниевый завод
STMicroelectronics/ Tower Semiconductor	Agrate300	Аграте, Италия	Цифро-аналоговые ИС, мощные полупроводниковые приборы, услуги кремниевого завода
Texas Instruments	RFAB2	Ричардсон, шт. Техас	Аналоговые ИС
TSMC	FAB 18, 4-я очередь	Тайнань, Тайвань	Кремниевый завод
TSMC	FAB 16, 2-я очередь	Нанкин, КНР	Кремниевый завод
TSMC	FAB 18, 5-я очередь	Тайнань, Тайвань	Кремниевый завод
Winbond	Kaohsiung Fab, 1-я очередь	Гаосюн, Тайвань	ДОЗУ

дискретные полупроводниковые приборы. В 2021 году открылось 14 новых заводов. В 2022 году планируется открыть 10 заводов (табл. 1), в 2023-м еще 13 и 10 в 2024-м. По прогнозам, к 2026 году в мире будет работать более 200 заводов / линий по обработке 300-мм пластин (рис. 2).

Отраслевые аналитики отмечают, что все большее число заводов по обработке 300-мм пластин создается для изготовления полупроводниковых приборов, отличных от ИС, и, в частности, мощных транзисторов. Преимущества снижения удельных и полных издержек производства при формировании кристаллов ИС на пластинах большего диаметра начинают проявляться при изготовлении кристаллов большего размера и большими объемами изготовления. К подобным ИС относятся ДОЗУ, флеш-память, КМОП-формирователи сигналов изображения, сложные логические ИС, микропроцессоры, микроконтроллеры, ЦОС-процессоры, процессоры канала прямой (безмодуляционной) передачи сигнала, аудиокодеки и задающие ИС для дисплеев. Что касается крупных мощных транзисторов, то хотя они все еще малы по сравнению с размерами кристаллов перечисленных ИС, их требуется производить в больших объемах, и они достаточно габаритны, чтобы поддерживать необходимый уровень загрузки мощностей по обработке 300-мм пластин. По данным IC Insights, спрос на силовые транзисторы в 2021 году в натуральном выражении достиг 43,5 млрд шт. по мощным полевым МОП-транзисторам

(MOSFET) и 2,2 млрд шт. по биполярным транзисторам с изолированным затвором (IGBT).

Чуть меньше трети новых 300-мм заводов, открывающихся в этом году, строится крупнейшим кремниевым заводом – TSMC, который пытается удовлетворить высокий спрос на услуги контрактного производства увеличил в 2021 году свои капитальные затраты на 74% – до 30 млрд долл. Большая часть этих расходов пошла на оснащение технологическим оборудованием линий 4-й и 5-й очереди в производственном комплексе Fab 18 в Тайване. TSMC также заканчивает строительство второго завода комплекса Fab 16 в Нанкине – для удовлетворения спроса на зрелые технологии, особенно 28-нм КМОП- процессы.

Texas Instruments и STMicroelectronics (и ее новый партнер Tower Semiconductor) завершают строительство заводов по обработке 300-мм пластин и производству аналоговых и цифро-аналоговых ИС. Texas Instruments увеличила свои капиталовложения 2021 года на 279%, их большая часть была потрачена на покупку нового оборудования для второго завода компании в Ричардсоне, пуск которого более чем удвоит производительность данного комплекса.

Интересно, что только два из новых заводов по обработке 300-мм пластин, открывающихся в 2022 году, предназначены для изготовления схем памяти. Это вторая очередь завода SK Hynix в Чхонджу по производству 3D-флеш-памяти NAND-типа и завод Winbond по изготовлению ДОЗУ в Гаосюне [2].

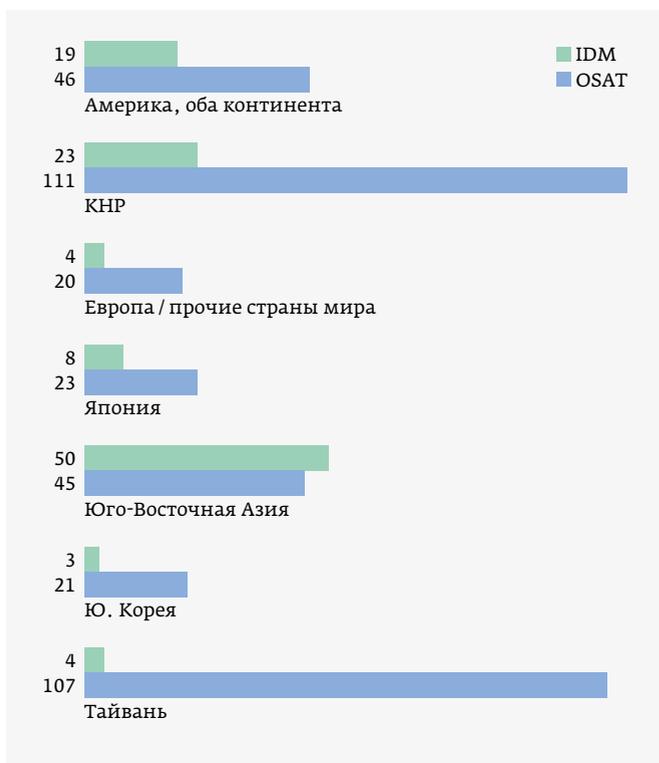


Рис. 3. Географическая структура размещения заводов по сборке, корпусированию и тестированию ИС на IV кв. 2021 года

Число заводов по сборке, корпусированию и тестированию ИС достигло 475

SEMI и TechSearch International сообщили, что число заводов по сборке и тестированию ИС достигло 475 (рис. 3). Эти заводы принадлежат фирмам, занимающимся (в разных сочетаниях) сборкой, корпусированием и тестированием ИС (OSAT), а также традиционным фирмам полного цикла, проектирующим и производящим ИС (IDM). Таких фирм насчитывается более 200. Из этих 475 заводов более 325 обладают возможностью тестирования, более 100 предлагают корпусирование соразмерно размеру кристалла ИС (CSP), более 80 занимаются формированием столбиковых выводов (в т.ч. более 50 на 300-мм пластинах), более 90 используют технологию WLCSP. Новые заводы также обладают технологиями FOWLP и FOPLP.

У OSAT более 110 заводов в КНР, более 100 – на Тайване и более 45 в странах Северной и Южной Америки.

У IDM более 50 центров сборки и тестирования в странах ЮВА, около 25 в КНР и около 20 в Северной и Южной Америке [3].

Расширение производственных мощностей как в сегменте начальных, так и в сегменте завершающих этапов производства ИС, стимулирует рост спроса как на оборудование для обработки пластин диаметром 300 мм, так и на оборудование обработки пластин меньших диаметров, а также на оборудование сборки, корпусирования и тестирования. Отмечается, что с расширением применения методов 2,5D- и 3D-интеграции центр тяжести формирования добавленной в процессе обработки стоимости ИС начинает смещаться из сектора начальных этапов в сектор завершающих этапов производства ИС.

КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И РЫНОК ОБОРУДОВАНИЯ

Капиталовложения полупроводниковой промышленности включают в себя затраты как на строительство зданий и сооружений полупроводниковых предприятий, так и ассигнования на капитальное оборудование, а также средства, выделяемые на НИОКР. При этом расходы на оборудование больше расходов на здания и сооружения, особенно если учесть, что многие микроэлектронные предприятия не строятся с нуля, а расширяются и/или модернизируются. По данным IC Insights, капиталовложения полупроводниковой промышленности после роста на 36% в 2021 году вырастут в 2022 году на 24% до нового рекорда в 190,4 млрд долл. (рис. 4). Это на 86% больше, чем всего тремя годами ранее, в 2019 году. Более того, если капиталовложения затраты увеличатся в 2022 году на 10% и более, впервые с периода 1993–1995 годов будет



Рис. 4. Динамика капиталовложений полупроводниковой промышленности в период 2008–2022 годов

Таблица 2. Географическая структура продаж полупроводникового оборудования

Регион	Объем продаж, млрд долл.		Прирост, %
	2021	2020	
КНР	29,62	18,72	58
Южная Корея	24,98	16,08	55
Тайвань	24,94	17,15	45
Япония	7,8	7,58	3
Северная Америка	7,61	6,53	17
Прочие страны мира	4,44	2,48	79
Европа	3,25	2,64	23
Всего	102,64	71,19	44

наблюдаться трехлетний рост этих расходов, выражаемый двузначными показателями.

В 2022 году 13 фирм увеличат свои капиталовложения на 52% до 91,8 млрд долл. В прошлом году они затратили 60,6 млрд долл., что на 62% больше, чем в 2020 году. Три крупнейших поставщика памяти (Samsung, SK Hynix и Micron) отсутствуют в рейтинге, а три ведущих «чистых» кремниевых завода (TSMC, UMC и GlobalFoundries – контрактное производство ИС) там есть. Там же и четыре из пяти ведущих поставщиков аналоговых ИС (Texas Instruments, Analog Devices, Infineon и STMicroelectronics) [4].

По данным SEMI мировые расходы на полупроводниковое оборудование в 2022 году вырастут на 18% до 107 млрд долл., это будет третий год роста подряд (в 2021 году эти расходы выросли на 44% (табл. 2). Впервые будет превышен уровень в 100 млрд долл., в 2023 году данные расходы также будут выше данного показателя [5]. Ранее рост три года подряд наблюдался в 2016–2018 годах, а до этого в середине 1990-х годов. Причины – расширение производителями возможностей удовлетворения спроса на широкий спектр ИС для новейших технологий, включая искусственный интеллект, автономные машины и квантовые вычисления, а также на электронику для удаленной работы и обучения, телемедицины и т. п. [6]. Возвращаясь к итогам 2021 году, стоит отметить, что продажи оборудования для обработки пластин выросли на 44%, а в других сегментах начальных этапов обработки пластин – на 22%. В сегменте завершающих этапов обработки пластин сектор оборудования сборки и корпусирования показал рост во всех регионах, а в целом увеличился на 87%. Объем продаж оборудования тестирования вырос на 30% [7].

Наибольшие затраты в 2022 году придутся на Тайвань – 35 млрд долл. (+56%), за ним последует Южная Корея с 26 млрд долл. (+9%) и КНР – 17,5 млрд долл. (–30%). По прогнозам, в этом году в Европе и на Ближнем Востоке будут зафиксированы рекордно высокие расходы в размере 9,6 млрд долл., что на 248% выше показателей 2021 года. В Северной и Южной Америке расходы на оборудование заводов по обработке пластин (начальные этапы) достигнут максимума к 2023 году – 9,8 млрд долл. [5]. На сектор кремниевых заводов придется 46% расходов, у производителей ДОЗУ они сократятся, а у поставщиков флеш-памяти NAND-типа будут расти (за счет заводов по выпуску 3D-приборов). Затраты на оборудование изготовителей микропроцессоров увеличатся на 47%. С географической точки зрения на первом месте окажется Южная Корея, далее – Тайвань и КНР, суммарные затраты которых составят 73% общих расходов на оборудование заводов по обработке пластин [6].

Важно отметить, что пока наиболее динамично развивается рынок технологического оборудования для полупроводниковой промышленности в странах Азиатско-Тихоокеанского региона. По данным фирмы Graphical Research, рынок полупроводникового оборудования в странах АТР будет устойчиво расти в течение 2020–2026 годов. Общие продажи оборудования к концу данного периода превысят 60 млрд долл. Одна из основных причин – растущий местный спрос на 5G-приборы, для которых требуются соответствующие чипсеты, обладающие малыми размерами, быстрыми процессорными ядрами и энергоэффективностью. Для удовлетворения растущего спроса на 5G-чипсеты расширятся производственные мощности. Так, Samsung Electronics сооружает завод по производству 5-нм 5G-чипсетов с поддержкой технологии ИИ.

Кроме того, ряд производителей выводит свои предприятия из КНР в другие страны АТР (Индия, Тайвань, Южная Корея и Япония), что также стимулирует спрос на полупроводниковое оборудование. Правительства этих стран вводят стимулы и налоговые льготы для создания благоприятной среды иностранным инвесторам. Наибольшие темпы роста у сегмента оборудования литографии, захватившего почти 30% рынка [8].

ОСНОВНЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Как известно, долгие годы развитие полупроводниковой промышленности (микроэлектроники) определялось так называемым «законом Мура» (Moore's Law). Это эмпирическое наблюдение, а не природный (физический) закон – удвоение числа транзисторов на кристалле каждые 18 месяцев (потом эти сроки растянулись до 24 месяцев) без увеличения удельной стоимости функций



Разработка и производство конденсаторов

оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы

K50-15, K50-17, K50-27, K50-37, K50-68, K50-77, K50-80, K50-81, K50-83, K50-84, K50-85, K50-86, K50-87, K50-88, K50-89, K50-90, K50-91, K50-92, K50-93, K50-94, K50-95(чип), K50-96, K50-97(чип), K50-98, K50-99, K50-100, K50-101(чип), K50-102, K50-103, K50-104, K50-105, K50-106

объемно-пористые танталовые конденсаторы

K52-1, K52-1M, K52-1BM, K52-1B, K52-9, K52-11, K52-17, K52-18, K52-19, K52-20, K52-21, K52-24, K52-26(чип), K52-27(чип), K52-28, K52-29, K52-30

оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы

K53-1A, K53-7, K53-65(чип), K53-66, K53-68(чип), K53-69(чип), K53-71(чип), K53-72(чип), K53-74(чип), K53-77(чип), K53-78(чип), K53-82

суперконденсаторы (ионисторы)

K58-26, K58-27, K58-28, K58-29, K58-30, K58-31, K58-32, K58-33

накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ

Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям ISO 9001



для конечного потребителя. Сформулировано в конце 70-х годов XX века Гордоном Муром, одним из основателей и ведущих специалистов корпорации Intel. При переходе к проектным нормам в диапазоне от 28 до 22/20 нм реализация данного закона разделилась на две тенденции. Первая – «Больше Мура!» (More Moore!) – направлена на обеспечение дальнейшего действия «закона Мура», которое может закончиться при достижении традиционной кремниевой технологией своих физических пределов. Обеспечить продление его действия предполагается за счет новых материалов (углеродные нанотрубки, графен и т. д.) и приборных архитектур (молекулярная электроника, спинтроника и т. п.). Этот путь, путь дальнейшего масштабирования и погони за «последним нанометром», выбрали крупнейшие производители – Intel, Samsung, TSMC и ряд фирм-разработчиков (fabless). Правда, они активно осваивают и второй подход. Их путь – развитие оборудования и технологии EUV-литографии и других подходов к масштабированию. Второй подход – «Больше, чем Мур» (More than Moore) – предполагает достижение больших результатов и в более широком диапазоне, чем изложено в «законе Мура» за счет использования 2,5D- и 3D-архитектур, позволяющих существенно наращивать функциональность, сокращать занимаемое пространство и потребляемую мощность, а также в использовании перспективных материалов и приборных структур. Второй путь предполагает развитие перспективных методов корпусирования и соответствующего оборудования. Именно на этом направлении и проявляется тенденция переноса основной части создания добавленной стоимости с начальных на завершающие этапы изготовления ИС.

EUV-литография: движение в сторону многократного формирования рисунка

У EUV-литографии может оказаться относительно короткая жизнь в серийном производстве ИС, но это неочевидно. С одной стороны, эта технология должна была внедряться в массовое производство с 1995 года на уровне проектных норм 90 нм, но в итоге эта технология была внедрена в 2018 году. Проблемы:

- единственный поставщик оборудования (ASML);
- возможность использования методик однократного формирования рисунка только на проектных нормах 10/7 нм;
- 5-нм топологии уже требуют методик двукратного (и, возможно, многократного) формирования рисунка.

Кроме того, потребуется переход от использования установок EUV-литографии с числовой апертурой (NA) = 0,33 к установкам с NA = 0,55.

В свою очередь, это ведет к удлинению и удорожанию производственного цикла. То есть возвращаемся к тупику

традиционной [фото]литографии, когда при освоении проектных норм 22/20 нм и менее потребовались методики двукратного^{*} и многократного формирования рисунка, что усложняло проектирование, технологический процесс, увеличивало производственный цикл и выходом из чего и рассматривалась EUV-литография [9].

В развитии технологий EUV-литографии (которую в серийном производстве уже освоили на своих мощностях, помимо Samsung, еще и TSMC, SK Hynix, на пути к этому Intel и Micron Technology) монопольному производителю данного оборудования, корпорации ASML, активно помогает Межуниверситетский центр микроэлектроники (IMEC, Лёвен, Бельгия). На конференции по передовым методам литографии и формирования рисунка (Advanced Lithography and Patterning Conference 2022) в апреле с. г., проводимой Международным обществом оптики и фотоники (SPIE), ASML и IMEC представили 12 докладов, которые свидетельствуют о значительном прогрессе в деле разработки экосистемы подготовки шаблонов с высокой NA для первой опытной EUV-установки (EXE:5000) с NA=0,55. Сообщалось о достижениях в разработке процессов формирования рисунков и травления, создании новых резистов, совершенствовании метрологии. Есть и успехи в совершенствовании технологии изготовления шаблонов.

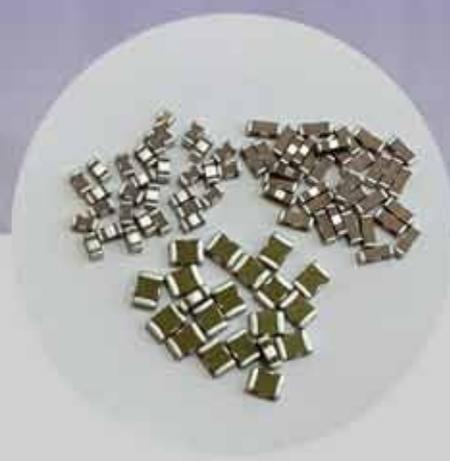
При этом, ожидая появления установки EXE:5000, специалисты ASML и IMEC продолжают работы по увеличению разрешающей способности современных технологий формирования рисунков на EUV-установках с NA=0,33. Это делается в целях обеспечения возможности прогнозирования производительности при формировании более тонких линий и зазоров топологического рисунка, а также контактных отверстий меньшего диаметра.

Большое значение придается адаптации средств и методов метрологии к работе с тонкими пленками резистов и топологическими элементами малых размеров – для повышения производительности.

Отмечается, что переход к меньшим размерам топологических элементов (например, линии шириной 10 нм) и более тонким резистивным пленкам (20 нм и менее) бросает вызов метрологии с двух точек зрения. Во-первых, нужно преодолеть значительно сниженную контрастность изображений, формируемых инструментальными

* double patterning – методика «двойного формирования рисунка»; перспективная методика, требующая двукратного экспонирования – на первом этапе осуществляется экспонирование половины числа линий, травление и проводятся дальнейшие этапы технологического процесса. Затем на пластину наносится другой слой резиста, и другая половина рисунка экспонируется в промежутки между первым набором линий. Этот подход достаточно дорог и медленен, но, с технической стороны, он сравнительно легок, хотя требует повышенной точности совмещения – не хуже 2 нм.

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КЕРАМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ И ПРОХОДНЫХ ФИЛЬТРОВ



○ СЕРИЙНАЯ ПРОДУКЦИЯ ○

- многослойные конденсаторы:
К10-17, К10-42, К10-47, К10-50,
К10-54, К10-57, К10-79, КМК;
- трубчатые конденсаторы:
ТК, К10-51К, КТП, КТ-1Е;
- фильтры: Б14, Б23А, Б23Б,
Б28, Б29, Б7-2, Б24.

○ НОВЕЙШИЕ РАЗРАБОТКИ ○

- варисторы ВР-18, ВР-19;
- фильтры Б36;
- конденсаторы К10-89, К10-90.

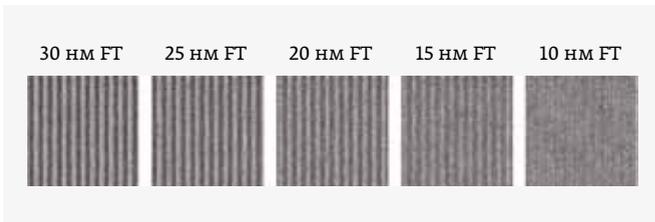


Рис. 5. Изображения целевых пленок различной толщины (FT), полученные при помощи сканирующей электронной микроскопии критических размеров (CD-SEM). При уменьшении FT очевидны уменьшение контрастности и ухудшение качества изображения

средствами сканирующей электронной микроскопии критических размеров (CD-SEM). Во-вторых, потребность в формировании изображений топологических элементов с размерами менее 10 нм (с учетом параметров совмещения и случайных сбоев печати, требований к неравномерностям краев линий резиста – LER) требует создания инструментальных средств метрологии с увеличенной разрешающей способностью.

Наконец, важной задачей является решение специфических проблем, связанных с EUV шаблонами и маскирующими слоями (масками), предназначенными для систем с высокой NA. Специалисты IMEC смоделировали влияние недостатков EUV масок/шаблонов на формирование линий и зазоров топологического рисунка с шагом 22 нм. Выявлено, что недостатки масок/шаблонов все больше воздействуют на конечные структуры, формируемые на пластинах (рис. 5). Это, соответственно, указывает на необходимость ужесточения правил проектирования масок и шаблонов. Полученные результаты позволяют разработчикам ASML и IMEC определить спецификации EUV шаблонов и масок для установок с высоким значением NA. Кроме того, ASML и IMEC совместно с поставщиками материалов исследуют новые архитектуры поглощающих масок и новых материалов для них и шаблонов [10].

Основная доля создания добавленной стоимости ИС перемещается в сферу перспективных методов корпусирования

Рынок перспективных технологий корпусирования (CSP, FI WLP, FO WLP и т. п.) к 2028 году вырастет до 55 млрд долл. с 30 млрд долл. в 2020 году. Среднегодовые темпы прироста в сложных процентах (CAGR) за прогнозируемый период составят 8%. К 2030 году эти технологии займут более 60% рынка услуг корпусирования полупроводниковых приборов. В 2020 году их доля составляла ~40% (рис. 6).

Инновации в технологиях завершающих этапов обработки, включая корпусирование, стимулируются тенденциями гетерогенной интеграции, миниатюризации

приборов, корпусированием на уровне пластин, переходом на обработку пластин большего диаметра, растущим внедрением приборов и многокристальных модулей, включающих микроэлектромеханические системы (MEMS). К тому же, достижения в разработках Bluetooth и радиочастотных модулей, расширяющееся внедрение стандарта Wi-Fi 6 могут придать еще один импульс развитию индустрии перспективных методов корпусирования. Непрерывная эволюция технологий смартфонов и планшетных ПК, беспроводных средств связи и т. п., тоже способствуют развитию данного сектора.

Кроме того, существенной тенденцией, оказывающей воздействие на рынок перспективных методов и платформ корпусирования, является переход к обработке пластин большего диаметра – от 100-мм к 300-мм подложкам, включая промежуточные этапы (125 мм, 150 мм, 200 мм). Каждый переход к пластинам большего диаметра позволяет снижать удельные издержки производства в среднем на 20–25% (при одинаковых проектных нормах, при одновременном с увеличением диаметра снижением проектных норм эффект может быть больше). Миниатюризация полупроводниковых приборов и ИС наряду с расширением использования MEMS стимулирует рост спроса на услуги корпусирования встраиваемых кристаллов. Хотя эта технология для рынка не нова и ее применение ограничено применениями в отдельных областях вследствие высокой стоимости и низкого выхода годных, она обладает большим потенциалом дальнейшего совершенствования.

Среди перспективных методов и платформ корпусирования в настоящее время наиболее часто упоминаются CSP, FI WLP, FO WLP. При корпусировании соразмерно кристаллу ИС (CSP, **chip-scale packaging**) размеры корпуса превышают размеры кристалла не более чем на 20%. Технология **FI-WLP (Fan-In Wafer-Level Package)** является корпусированием на уровне пластины с перераспределением.

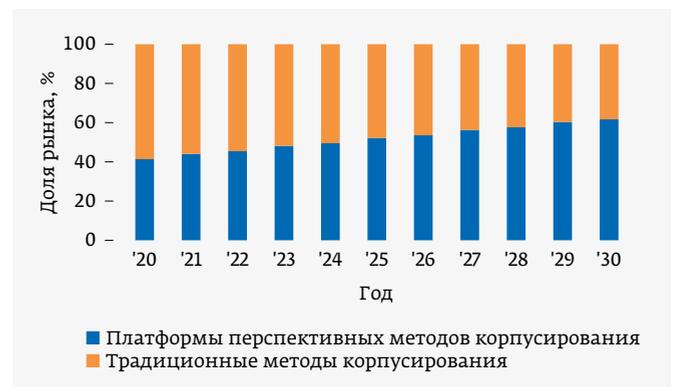


Рис. 6. Динамика увеличения доли перспективных методов корпусирования в период 2020–2030 годах (2022 г. и далее – прогноз)

Это одно из расширений процесса обработки пластин с использованием традиционных процессов и инструментальных средств. Слой перераспределения используется для подключения устройств ввода-вывода к столбиковым / шариковым выводам на поверхности кристалла. Матричное расположение шариковых выводов совместимо с традиционными процессами сборки печатных плат. FI-WLP является одной из разновидностей «подлинного» CSP. Технология WLP отличается от других методов корпусирования с матричным расположением шариковых выводов шаровых решеток (BGA) и слоистых CSP тем, что не требуется никаких связующих проводов или промежуточных соединений. Наконец технология **FO WLP (Fan-Out Wafer-Level Package)** предполагает корпусирование на уровне пластины с разветвлением и является одним 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. Уникальное свойство FO WLP заключается в том, что в одном WLP можно интегрировать более одного кристалла – за счет этажирования.

Как уже говорилось, корпусирование полупроводниковых приборов является одним из секторов более обширной сферы – индустрии сборки, корпусирования и тестирования ИС и полупроводниковых приборов. На этом рынке долго доминировали специализированные фирмы – OSAT (сборка / корпусирование / тестирование ИС) и производители интегральных приборов (IDM, проектирование и производство ИС), сейчас их теснят кремниевые заводы, поставщики печатных плат (PCB) и контрактные производители электроники (EMS) [11]. На данный момент 10 крупнейших поставщиков услуг представлены: двумя IDM – Intel и Samsung (обе корпорации также применяют бизнес-модель foundry); TSMC (крупнейший «чистый» кремниевый завод); ASE, SPIL, Amkor, PTI и JCET (пять крупнейших OSAT); фирмами Nepes и Chipbond. На этих игроков приходится ~75% доходов индустрии перспективных методов корпусирования.

Цепочки поставок завершающих этапов обработки пластин требуют значительных инвестиций в специализированные производственные мощности. Фирмы, ориентированные на сборку, корпусирование и тестирование ИС и полупроводниковых приборов обычно инвестируют в производственные мощности и оборудование около ~15% их годовых прибылей. Процессы завершающих этапов обработки менее капиталоемки и трудоемки по сравнению с процессами начальных этапов обработки. Однако, инновационный характер перспективных методов и платформ корпусирования меняют эту динамику.

В целом, на деятельность в области завершающих этапов обработки в 2020 году приходилось около 14% общих капитальных затрат и ~6,5% общего объема добавленной стоимости полупроводниковой промышленности. Сегмент завершающих этапов обработки сконцентрирован в основном на Тайване и в КНР, а новые производственные мощности создаются в странах Юго-Восточной Азии (Малайзия, Вьетнам и Филиппины) [12].

НЕКОТОРЫЕ ВЫВОДЫ

Оборудование и технологии EUV-литографии имеют резервы дальнейшего совершенствования за счет совместного использования с методикой непосредственной самосборки (с использованием блок-сополимеров, directed self assembly, DSA). Но существуют и другие методики, которые могут стать альтернативой EUV-литографии – например электронно-лучевая литография с множественными источниками излучения (multi-beam e-beam, MBEB).

Тормозом для реализации такого развития событий является огромный парк установленного оборудования, поддерживающего традиционные методики литографии и совместимые с ней методики EUV-литографии. Страны / фирмы, желающие выйти на уровень минимальных проектных норм с использованием MBEB, вполне могут сделать это. Для ИС военного назначения это вполне приемлемый вариант, но в плане ИС гражданского назначения очень чувствителен вопрос рентабельности, наличия надежных цепочек поставок и наращивания добавленной стоимости.

По мере реализации парадигмы развития «электронный модуль / система → многокристальный модуль → система-на-кристалле» значение оборудования начальных этапов обработки пластин и их доля в продажах непрерывно росли. Однако, по мере того, как расширяется использование 3D-технологий и растет значение чиплетов, а «системы-на-кристалле» в ряде направлений вытесняются многокристальными модулями с использованием чиплетов, происходят подвижки на рынке оборудования. Они связаны с тем, что основной «центр тяжести» в плане наращивания добавленной стоимости смещается от начальных этапов обработки пластин к завершающим этапам – этапам сборки / корпусирования ИС и гетерогенных многокристальных модулей. Соответственно, на рынке технологического оборудования растет доля систем для реализации перспективных методов корпусирования. Но внедрение этих методов сталкивается с необходимостью новых материалов и технологических установок.

Все вышеизложенное говорит о том, что на рынке технологического оборудования идут серьезные изменения. Возможно возникновение ситуации, аналогичной тому, что случилось в начале 1980-х годов с появлением персональных компьютеров (IBM PS, Apple Lisa) как альтернативы большим, универсальным машинам. То есть

прорывное появление нового сегмента рынка и его быстрое развитие за счет ранее существовавших. Но оценить подобную возможность сейчас сложно.

ЛИТЕРАТУРА

- 200mm Semiconductor Fab Capacity Set to Surge 21% to Mitigate Supply-Demand Imbalance. SEMI Reports // Semiconductor Digest. April 10. 2022. <https://www.semiconductor-digest.com/200mm-semiconductor-fab-capacity-set-to-surge-21-to-mitigate-supply-demand-imbalance-semi-reports/>
- Count of Semiconductor Fabs Using 300mm Wafers Projected to Exceed 200 by 2026 // Semiconductor Digest. February 25. 2022. <https://www.semiconductor-digest.com/count-of-semiconductor-fabs-using-300mm-wafers-projected-to-exceed-200-by-2026/>
- Worldwide Semiconductor Assembly and Test Facility Database Now Tracks Integrated Device Manufacturers, 475 Facilities // Semiconductor Digest. March 1. 2022. <https://www.semiconductor-digest.com/worldwide-semiconductor-assembly-and-test-facility-database-now-tracks-integrated-device-manufacturers-475-facilities/>
- Semi Industry Capex Forecast to Jump 24% and Reach Over \$190 Billion This Year // IC Insights. March 01. 2022.
- Global Fab Equipment Spending Expected to Hit New High of \$107 Billion in 2022, SEMI Reports // Semiconductor Digest. March 22. 2022.
- Global Fab Equipment Spending Projected to Log Record High in 2022 to Mark Third Consecutive Year of Growth, SEMI Reports // Semiconductor Digest. January 11. 2022.
- Manners D.** 2021 equipment sales up 44%, says SEMI // Electronics Weekly. 13th April. 2022.
- Asia Pacific Semiconductor Manufacturing Equipment Market Size to Reach \$60B by 2026 // Semiconductor Digest. April 7. 2022.
- Макушин М., Мартынов В.** Производственные технологии микроэлектроники: проблемы развития. Часть 2 // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 4 (00195). С. 76-88.
- Shannon Davis.** Imec Ramps Up the Development of the High-NA EUV Patterning Ecosystem. Semiconductor Digest. April 26. 2022.
- Макушин М.** Индустрия кремниевых заводов: некоторые аспекты развития // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2021. № 1 (00202). С. 66-77.
- Shannon Davis.** Advanced Packaging Market Worth \$55B, Globally, by 2028 at 8% CAGR // Semiconductor Digest. February 18. 2022.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1188 руб.

СПРАВОЧНИК ПО ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ

Под ред. Д. Хоффмана, Б. Сингха, Дж. Томаса III

При поддержке ФГУП «Научно-исследовательский институт вакуумной техники им. С.А. Векшинского»

Перевод с англ. под ред. В.А. Романько, С.Б. Нестерова

Предлагаемый справочник по вакуумной технике и технологиям является переводом книги, созданной американскими специалистами. В справочнике приведены фундаментальные положения технологии вакуума и физики поверхности, рассмотрены конструкции различных типов насосов и средств измерения вакуума и течеискания. Подробно описаны различные вакуумные системы и технологии. Приведены примеры применения вакуумной техники. Большое внимание в справочнике уделено описанию технологии получения и поддержания безмасляного вакуума. Справочник состоит из пяти частей:

- 1) введение;
- 2) получение вакуума (насосы и технологии, используемые в настоящее время в эксплуатации и конструкции);
- 3) вакуумные измерения (давление, парциальное давление, поток газа, обнаружение течей, калибровка и технологии, связанные с вакуумметрией);
- 4) элементы и конструкции вакуумных систем, включая материалы, клапаны, фланцы, эксплуатацию и техническое обслуживание, а также очистку и поддержание чистоты системы;
- 5) применение высоковакуумной и сверхвысоковакуумной технологии. Информация, включенная в настоящий справочник, предназначена для тех, кто практически использует вакуумную технологию.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2011. – 736 с.,
978-5-94836-294-6

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru



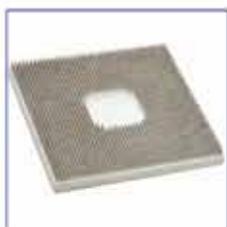
**ЗАВОД
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ**

ЙОШКАР-ОЛА, РЕСПУБЛИКА МАРИЙ ЭЛ

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ЗАВОД ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ»



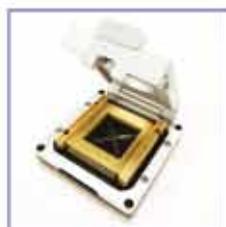
Выводные рамки



Металлокерамические
корпуса



Нагревательные
элементы



Контактные
устройства



Графитовая
оснастка



Оптоэлектронные
корпуса



424003, Россия, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 26
Тел.: +7-8362-45-70-09, 45-67-68.
info@zpp12.ru marketing@zpp12.ru

zpp12.ru