

Микроэлектроника: развитие производственной базы, продажи оборудования и EUV-литография

М. Макушин¹

УДК 621.37 | ВАК 2.2.2

Расширение применения ИС и других полупроводниковых приборов как в традиционных для них областях, так и в новых сферах способствует увеличению спроса на эти изделия. В свою очередь это ведет к расширению производственной базы и увеличению закупок оборудования для производства с использованием и перспективных процессов с минимальными проектными нормами, и более зрелых процессов. В сфере производства перспективных ИС расширяется применение EUV-литографии, ведутся работы по совершенствованию данной технологии.

Настоящее время характеризуется тем, 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. 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.

Ввиду этого оценку рынка оборудования целесообразно производить с учетом прогнозируемого расширения производственной базы и переходить к рассмотрению вопросов развития литографии с использованием *предельной УФ-области спектра (EUV-литография)* как наиболее перспективного типа оборудования формирования кристаллов ИС.

ОЦЕНКИ РОСТА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БАЗЫ Ожидаемое развитие мощностей по обработке 200-мм пластин

По данным *Международной организации поставщиков полупроводникового оборудования и материалов (SEMI)*, в период с 2021 по 2025 год в мире будет сооружено 13 новых производственных линий по обработке 200-мм пластин (рис. 1). За счет этого общая мощность подобных линий увеличится на 20% и достигнет нового рекордного уровня обработки – более чем 7 млн пластин в месяц.

Основной причиной расширения мощностей по обработке 200-мм пластин станет быстро растущий спрос производителей автомобильной электроники и ряда других приложений на мощные полупроводниковые приборы и *микроэлектромеханические системы (MEMS)*. При этом мощности по производству ИС для автомобильной электроники и мощных полупроводниковых приборов в период 2021–2025 годов расширятся на 58%, MEMS – на 21%, аналоговых приборов – на 14%. Также на 20% расширятся мощности кремниевых заводов, осуществляющих контрактное производство ИС на 200-мм пластинах.

О планах строительства линий по обработке 200-мм пластин уже заявили такие производители, как ASMC,

¹ НОБ «Военные науки и оборонная промышленность» БРЭ, научный редактор.

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

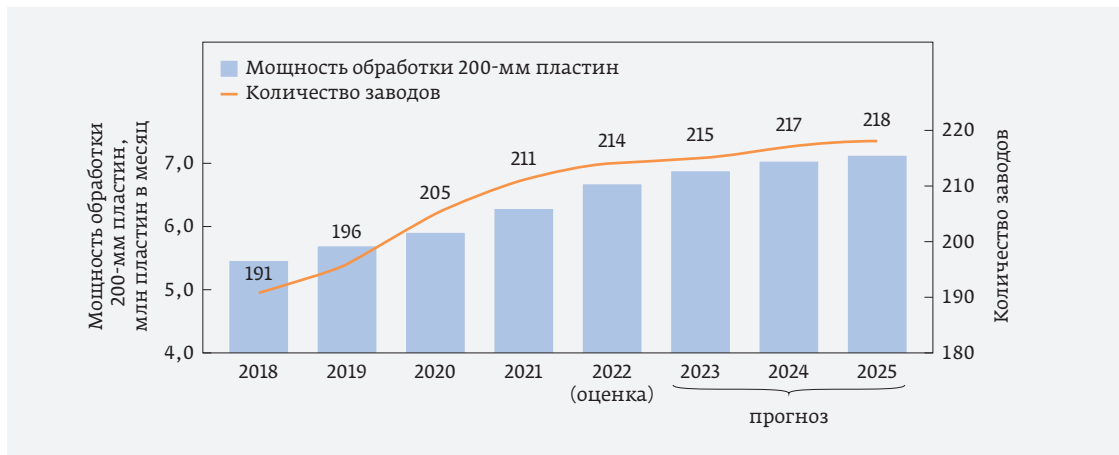


Рис. 1. Количество заводов по обработке 200-мм пластин (начальные этапы обработки пластин, исключая обработку эпитаксиальных пластин)

BYD Semiconductor, China Resources Microelectronics, Fuji Electronics, Infineon Technologies, Nexperia и STMicroelectronics.

В региональном разрезе наибольший прирост производственных мощностей к 2025 году произойдет в КНР – 66%. За нею последуют страны Юго-Восточной Азии (35%), Америки (оба континента, 11%), Европы и Ближнего Востока (8%) и Южная Корея (2%). По итогам 2022 года доля КНР в мировых мощностях по обработке 200-мм пластин составит 21%, на втором и третьем местах окажутся Тайвань и Япония – 11 и 10% соответственно [1].

Прогноз расширения производственной базы по обработке 300-мм пластин

В конце 2022 года SEMI представила и прогноз развития мощностей заводов по обработке 300-мм пластин. В этом прогнозе предполагается, что наращивание мощностей данных заводов в период с 2022 по 2025 год будет происходить со *среднегодовым темпом прироста в сложных процентах (CAGR)* на уровне 10% (рис. 2). При этом к концу прогнозируемого периода суммарная мощность линий

по обработке 300-мм пластин выйдет на новый рекордный уровень в 9,2 млн пластин в месяц. В основе данного расширения мощностей лежит устойчивый спрос на автомобильные полупроводниковые приборы, а также программы стимулирования развития микроэлектроники, осуществляемые в США, ЕС, Южной Кореи, КНР и на Тайване, предусматривающие достаточно существенное финансирование.

О планах по строительству новых заводов для обработки 300-мм пластин в период 2024–2025 годов уже объявили такие фирмы, как GlobalFoundries, Intel, Micron, Samsung, SkyWater Technology, TSMC и Texas Instruments.

Специалисты SEMI также отмечают, что хотя дефицит поставок ряда типов ИС уже преодолен, по некоторым другим типам ИС он по-прежнему сохраняется. Поэтому полупроводниковая промышленность, принимая во внимание долгосрочные перспективы роста спроса на ИС по широкому диапазону перспективных направлений, и прилагает усилия по наращиванию мощностей, предназначенных для обработки 300-мм пластин. В настоящее время SEMI отслеживает 67 проектов по строительству

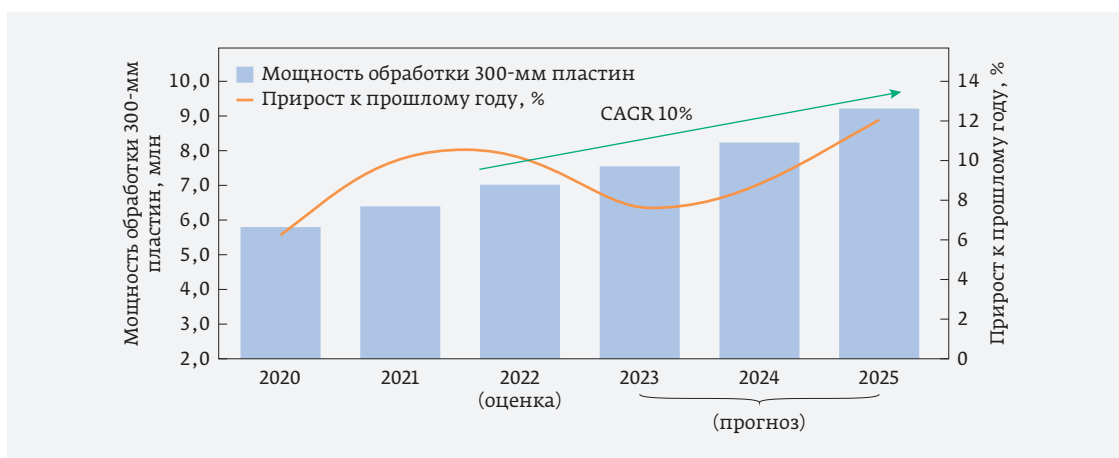


Рис. 2. Динамика роста мощности заводов по обработке 300-мм пластин (начальные этапы обработки пластин)

новых 300-мм производств или расширению существующих заводов по обработке 300-мм пластин за счет сооружения новых производственных линий. Все эти заводы и линии начали или начнут сооружаться в период с 2022 по 2025 год.

Как ожидается, КНР увеличит свою долю в мировых мощностях по начальным этапам (формирование транзисторной структуры) обработки 300-мм пластин с 19% в 2021 году до 23% в 2025 году. При этом общая мощность обработки достигнет 2,3 млн пластин в месяц. Во многом этот рост обусловлен растущими инвестициями китайского правительства в развитие отечественной микроэлектронной промышленности. Благодаря этому КНР приближается к показателям мирового лидера, Южной Кореи, а в 2023 году может обогнать находящийся ныне на втором месте Тайвань.

Доля Тайваня в мировых мощностях по обработке 300-мм пластин за период 2021–2025 годов, как ожидается, снизится на 1% – до 21%. Доля Южной Кореи в этот же период также снизится на 1% – до 24%. В то же время доля Японии в мировых мощностях по обработке 300-мм пластин снизится с 15% в 2021 году до 12% в 2025-м – из-за обостряющейся конкуренции с другими странами/регионами.

Доля США в мировых мощностях по обработке 300-мм пластин, как ожидается, вырастет с 8% в 2021 году до 9% в 2025 году. Частично это обуславливается государственным финансированием и льготами, предоставляемыми в соответствии с *Законом о создании полезных стимулов для производства в Америке полупроводниковых приборов (Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors for America Act, CHIPS Act)*. Доля региона Европа / Ближний Восток также вырастет в прогнозируемый период с 6 до 7%, и, также благодаря мерам государственной поддержки, аналогичным американскому CHIPS Act (European Chips Act). Наконец, страны Юго-Восточной Азии сохраняют свою долю в 5% в общих мировых мощностях по начальным этапам обработки 300-мм пластин.

Также в прогнозе SEMI отмечается, что наивысшими CAGR в 39% за период с 2021 по 2025 год будут обладать мощности по обработке 300-мм пластин, предназначенные для выпуска мощных полупроводниковых приборов и связанных с ними приборов. CAGR прироста 300-мм мощностей для выпуска аналоговых приборов составит 37%, оптоэлектроники – 7%, схем памяти – 5%. В то же время CAGR наращивания мощностей кремниевых заводов ожидается на уровне 14% [2].

Инвестиции на расширение производственной базы в целом – более 500 млрд долл. США

Помимо приведенных выше оценок, SEMI в декабре 2022 года также представила доклад об общем числе новых предприятий, сооружаемых в мировой полупроводниковой промышленности в 2019–2023 годах. В их

Таблица 1. Число новых полупроводниковых мощностей, которые начали сооружаться в 2019–2023 годах

Год	Число предприятий
2019	17
2020	17
2021	23
2022	33
2023	28

число входят не только заводы по обработке пластин, но и предприятия, специализирующиеся на сборке и корпусировании, а также тестировании ИС и других полупроводниковых приборов. Всего в период с 2021 по 2023 год начато строительство 84 новых предприятий, в том числе 33 в 2022 году и 28 будут строиться в 2023 году (табл. 1). Общая сумма затрат на их сооружение может превысить 500 млрд долл. Отмечается, что снижение числа полупроводниковых предприятий, которые только начинают строиться, в 2023 году скажется на снижении спроса на производственное полупроводниковое оборудование.

Специалисты SEMI отмечают растущую стратегическую важность полупроводниковых приборов (включая ИС) для большого числа стран и широкого спектра отраслей промышленности. Кроме того, в последнее время увеличивается влияние государственных мер стимулирования на расширение производственных мощностей и укрепление цепочек поставок. Учитывая оптимистичные долгосрочные перспективы отрасли, растущие инвестиции в производство полупроводниковых приборов имеют решающее значение для создания основы для устойчивого роста, обусловленного широким спектром новых приложений.

С точки зрения географического распределения производственных мощностей полупроводниковой промышленности в целом, SEMI констатирует:

- В США CHIPS Act и его последняя, принятая версия, CHIPS and Science Act, выводят страну на лидирующие позиции в мире по новым капитальным затратам, поскольку государственные инвестиции стимулируют создание новых мощностей по производству ИС и поддерживают экосистемы поставщиков. По прогнозам, с 2021 по 2023 год здесь начнется строительство 18 новых объектов.
- Ожидается, что КНР превзойдет все другие регионы по числу новых мощностей, но 20 из них будут поддерживать зрелые технологии.
- Благодаря принятому European Chips Act в регионе Европы/Ближнего востока инвестиции в новые полупроводниковые мощности достигнут

SSD от GS Nanotech

Первые российские
твердотельные накопители

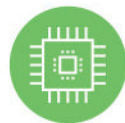
Заключение
Минпромторга
о подтверждении
производства
на территории РФ



**Полный цикл
производства
в России**



**Производство
сертифицировано
по ISO 9001:2015**



**Собственная
сборка модулей
NAND-памяти**



**Разработка
и производство под
требования заказчика**

Характеристики:

- Форм-фактор: 2,5" / M.2 / U.2 / нестандартный
- Емкость: от 128 Гбайт до 2 Тбайт
- Интерфейс: SATA III 6 Гбит/с; PCIe Gen 3x4 NVMe
- Тип памяти NAND Flash: 3D TLC
- Скорость последовательного чтения: до 550 Мбайт/с (SATA) / до 3200 Мбайт/с (PCIe)
- Скорость последовательной записи: до 490 Мбайт/с (SATA) / до 1000 Мбайт/с (PCIe)
- Диапазон рабочих температур: коммерческий 0...+70°C / промышленный -40...+85°C

Производство:

238050, Калининградская область,
г. Гусев, ул. Индустриальная, д.11
www.gsnanotech.ru

Отдел продаж:

197198, Санкт-Петербург, ул. Новолодожская, 4, к. 1
+7 (812) 332-86-68 (доб. 0880, 0881)
office@gsnanotech.com



исторического максимума, и в период между 2021 и 2023 годом здесь начнется сооружение 17 новых производственных предприятий.

- Ожидается, что на Тайване в прогнозируемый период начнется строительство 14 новых объектов, в то время как в Японии и странах Юго-Восточной Азии – по шесть новых предприятий. Еще три крупных полупроводниковых предприятия начнут сооружать в Южной Корее [3].

Общие замечания о развитии производственной базы

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. Речь идет прежде всего о методиках корпусирования и соответствующем оборудовании.

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. Это одно из расширений процесса обработки (добавляются новые этапы) 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. Технология FI-WLP является одной из разновидностей «подлинного» CSP. Процесс WLP отличается от других методов корпусирования с матричным расположением шариковых выводов (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 [4].

ПРОГНОЗЫ ПРОДАЖ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Общие перспективы

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 для конечного потребителя. Сформулировано в конце 1970-х годов Гордоном Муром, одним из основателей и ведущих специалистов корпорации Intel. При переходе к проектным нормам в диапазоне от 28 нм 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 – дальнейшее развитие оборудования и технологии EUV-литографии и других подходов дальнейшего масштабирования.

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 [4].

Прогноз продаж полупроводникового оборудования

На проходившей в декабре прошлого года выставке SEMICON Japan 2022 был представлен последний за



ГРУППА КОМПАНИЙ

ЭЛЕКТРОННОЕ СПЕЦИАЛЬНОЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

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

124460, г. Москва, Зеленоград,
Георгиевский проспект, д.5, стр.1
тел.: (499) 729-7751, факс: (499) 479-1239
info@nppesto.ru www.nppesto.ru

СИСТЕМА GROOVY ICP – ТЕХНОЛОГИЯ БУДУЩЕГО

Для критического травления
диэлектриков на основе уникального
узкозазорного индуктивного плазменного
реактора для массового производства

Разработка АО «НПП «ЭСТО» при финансовой
поддержке Министерства промышленности
и торговли Российской Федерации

МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



Приглашаем Вас посетить наш стенд №А1045 на выставке **ExpoElectronica 2023**
11–13 апреля 2023 года МВЦ «Крокус Экспо», павильон 3, зал 15



Оборудование рентгеновского контроля



Лазерное оборудование



Оборудование для фотолитографии



Вакуумное оборудование



Рис. 3. Прогноз структуры продаж полупроводникового оборудования

прошедший год прогноз SEMI. В соответствии с ним мировые продажи полупроводникового производственного оборудования его изготовителями в 2022 году покорили новую вершину в 108,5 млрд долл. (рис. 3), что на 5,9% выше предшествующего рекорда отрасли в 102,5 млрд долл., поставленного в 2021 году. Отмечалось, что рост продаж оборудования наблюдается третий год подряд. Однако, в 2023 году ожидается снижение продаж оборудования до 91,2 млрд долл., но в 2024-м предполагается оздоровление ситуации как в секторе оборудования начальных этапов обработки, так и в секторе завершающих этапов обработки.

Сегмент оборудования заводов по обработке пластин, включающий в себя оборудование собственно обработки пластин, вспомогательное оборудование и оборудование формирования шаблонов/промежуточных шаблонов, по итогам 2022 года вырос на 8,3% – до 94,8 млрд

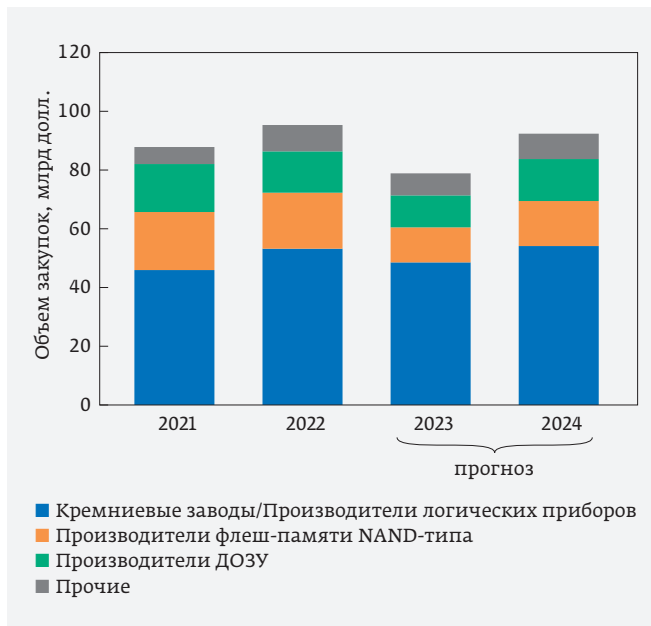


Рис. 4. Прогноз структуры продаж оборудования заводов по обработке пластин с точки зрения их специализации

долл. В 2023 году ожидается сокращение продаж на 16,8% – до 78,8 млрд долл. и последующий рост в 2024 году на 17,2% – до 92,4 млрд долл.

Продажи оборудования в секторе кремниевых заводов и производителей логических ИС составляют более половины общих доходов поставщиков оборудования для заводов по обработке пластин (рис. 4). В 2022 году они увеличились по сравнению с предшествующим годом на 16% и достигли 53,0 млрд долл. При этом наблюдался рост спроса на оборудование для производства ИС как по перспективным процессам с минимальными проектными нормами, так и по зрелым процессам. В 2023 году продажи оборудования в этом секторе могут сократиться на 9%, но в 2024–2025 годах ожидается возобновление их роста.

Спрос корпоративного и потребительского сектора на схемы памяти и запоминающие устройства на их основе остается вялым. Соответственно, продажи оборудования для изготовления ДОЗУ по итогам 2022 года упали на 10% до 14,3 млрд долл., а в 2023 году они могут снизиться еще на 25% до 10,8 млрд долл. В то же самое время продажи оборудования для изготовления флеш-памяти NAND-типа в 2022 году сократились на 4% – до 19,0 млрд долл., с перспективой дальнейшего уменьшения на 36% (до 12,2 млрд долл.) в 2023 году.

Как ожидается, макроэкономические проблемы и возникшие в развитии полупроводниковой промышленности трудности приведут к снижению продаж оборудования для завершающих этапов производства ИС. Так, после

ООО
СМП

ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
www.SMD.ru

электронные
для поверхностного
монтажа

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Катушки индуктивности на токи до 10 А
- U.FL разъемы и pigtail со SMA

Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32; e-mail: sale@smd.ru
Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ



Обучение и повышение квалификации производственного персонала



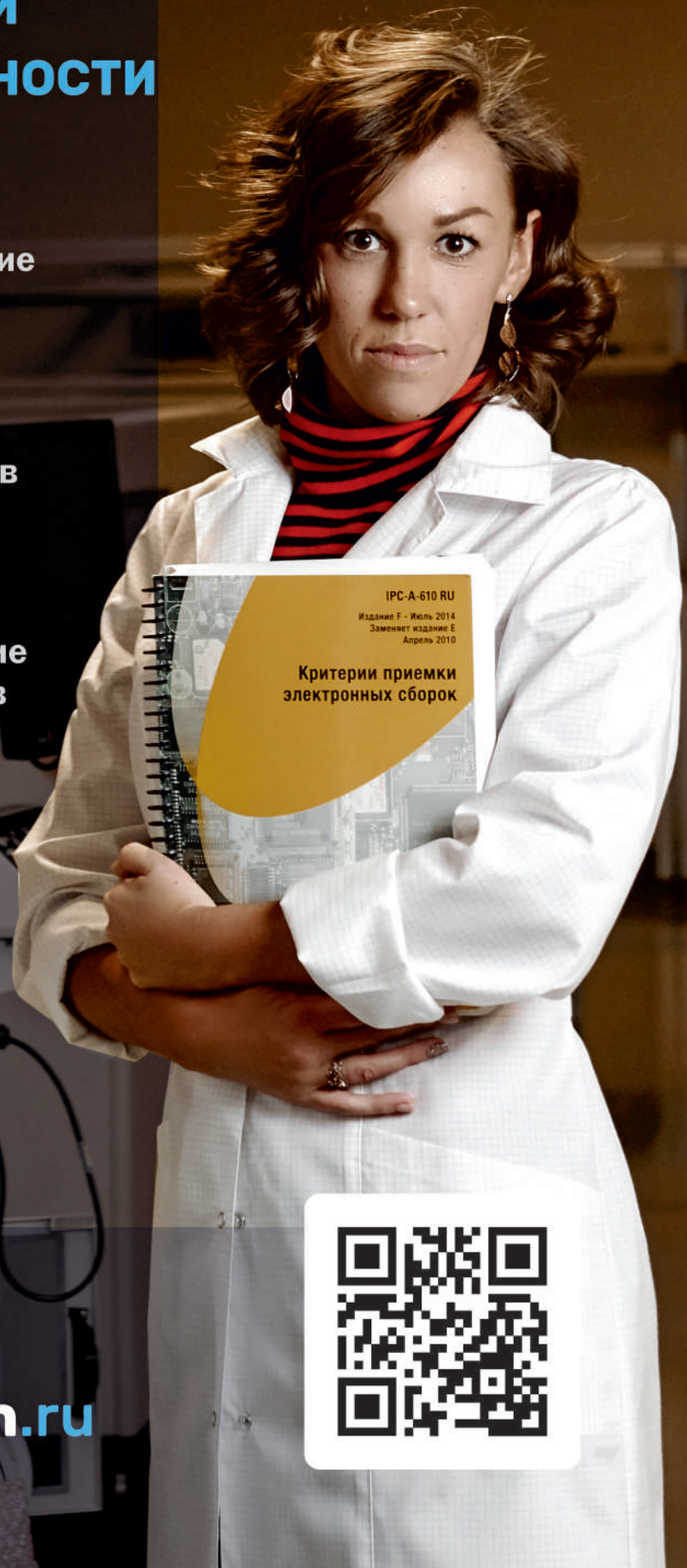
Проведение тренингов по стандартам IPC



Подбор и тестирование паяльных материалов



Проведение аудита производственных процессов



роста продаж оборудования тестирования полупроводниковых приборов на 30% в 2021 году, его рынок в 2022 году сократился на 2,6% – до 7,6 млрд долл., в текущем году снижение продаж составит 7,3% (до 7,1 млрд долл.). Аналогичная ситуация на рынке оборудования сборки и корпусирования: рост продаж в 2021 году на 87% сменился в 2022 году их сокращением на 14,9% (до 6,1 млрд долл.) и дальнейшего снижения на 13,3% (до 5,3 млрд долл.) в 2023 году. Правда, как предполагается, в секторе оборудования завершающих этапов производства полупроводниковых приборов в 2024 году наступит оздоровление; затраты на оборудование тестирования увеличатся на 15,8%, а оборудования сборки и корпусирования – на 24,1%.

Крупнейшими национальными рынками по объемам закупок полупроводникового оборудования в целом по итогам 2022 года остались КНР, Тайвань и Южная Корея. По прогнозам, КНР сохранит первое место и в 2023 году, в то время как Тайвань, как ожидается, займет его в 2024 году. В большинстве отслеживаемых SEMI странах/регионах расходы на полупроводниковое оборудование (за исключением Южной Кореи) в 2022 году увеличились, но в 2023 году почти во всех из них произойдет снижение продаж – перед возвращением к росту в 2024 году [5].

EUV-ЛИТОГРАФИЯ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ Общие проблемы развития EUV-литографии

Технология EUV-литографии^{*} должна была внедряться в массовое производство с 1995 года на уровне проектных норм 90 нм. Однако, из-за проблем с качеством резистов, мощностью источника излучения установок литографии и производительности этих установок, первая линия с проектными нормами 7 нм была впервые введена в эксплуатацию только в конце 2019 года корпорацией Samsung. Серийное производство началось в 2020-м.

Ряд экспертов отмечает, что у EUV-литографии, по крайней мере, при использовании методики однократного формирования рисунка, может оказаться относительно малое окно возможностей в серийном производстве ИС – уровни проектных норм 10/7 нм. Есть возможность, что 5-нм топологии уже требуют методик двойного (*и, возможно, многократного*) формирования рисунка^{**}. Ситуация осложняется тем, что установки EUV-литографии по-прежнему изготавливает единственный поставщик оборудования (ASML). В акционерном капитале этой

фирмы имеют доли ряд американских корпораций, включая Intel. Именно это позволило американским фирмам при поддержке правительства не допустить отгрузки уже оплаченного китайской стороной EUV-литографа в КНР в начале 2020-х годов.

Для дальнейшего развития EUV-литографии также требуется переход от использования установок 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 литографии, когда при освоении проектных норм 22/20 нм и менее потребовались методики двойного и многократного формирования рисунка, что усложняло проектирование, технологический процесс, увеличивало производственный цикл и суммарные издержки. Выходом из этого тупика и рассматривалась EUV-литография [6].

В развитии технологий EUV-литографии (ее в серийном производстве уже освоили после Samsung в 2021–2022 годах еще и TSMC, SK Hynix, на пути к этому Intel и Micron Technology) монопольному производителю данного оборудования, корпорации ASML, активно помогает *Международный университетский центр микроэлектроники (IMEC, Лёвен, Бельгия)*. На конференции по передовым методам литографии и формирования рисунка (Advanced Lithography and Patterning Conference 2022) в апреле 2022 года, проводимой Международным обществом оптики и фотоники (SPIE), ASML и IMEC представили 12 докладов, которые свидетельствуют о значительном прогрессе в деле подготовки экосистемы подготовки шаблонов с высоким значением 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 [7].

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

** Double patterning – методика «двойного формирования рисунка»; перспективная методика, требующая двукратного осуществления экспонирования – на первом этапе осуществляется экспонирование

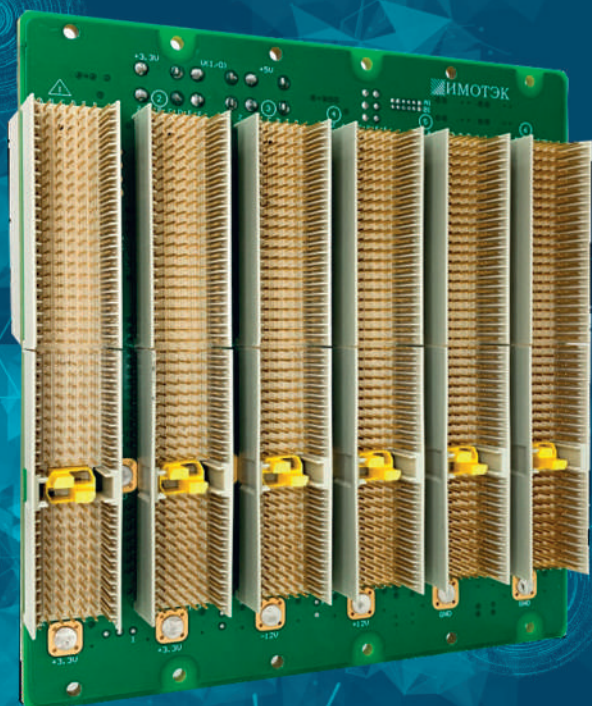
половины числа линий, травление и осуществление дальнейших этапов технологического процесса. Затем на пластину наносится другой слой резиста, и другая половина рисунка экспонируется в промежутки между первым набором линий. Этот подход достаточно дорог и медленен, но, с технической стороны, он сравнительно легок, хотя требует повышенной точности совмещения – не хуже 2 нм.

ОБЪЕДИНИТЕЛЬНАЯ КРОСС-ПЛАТА



имотэк.рф

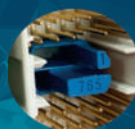
Объединительные кросс-платы являются основными элементами при создании промышленных вычислительных систем с расширенным функционалом.
Соответствует стандартам PICMG
Гарантирует максимально надежную высокопроизводительную работу всей системы
Поддерживает функцию Hot Swap
Обеспечивает подавление высокочастотных помех
Температурный режим работы от -40°C до 85°C



КОНФИГУРАЦИЯ ИСПОЛНЕНИЙ



Питание +3,3 В

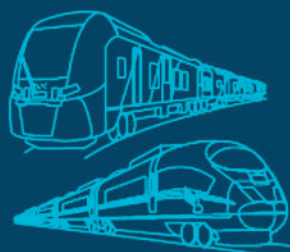


Питание +5 В



Системный слот: слева/справа
Форм-фактор: 3U/6U
Количество слотов: от 2 до 8

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ



ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ



СЕТЕВЫЕ РЕШЕНИЯ



РОБОТОТЕХНИКА



ВОЕННАЯ ТЕХНИКА

EUV-установки экспонирования с $NA=0,55$, по мнению ряда ведущих специалистов, появятся на рынке уже в 2025 году. Как уже говорилось, это ожидающееся событие ставит новые задачи перед разработчиками резистов и связанных с ними материалов.

При более высоком значении NA фотоны попадают на пластину под меньшим углом. Для предотвращения эффекта затенения, снижения контрастности, требуются более тонкие слои резиста. Плюс здесь в том, что более тонкий слой резиста снижает риск разрушения рисунка, так как аспектное отношение сторон элементов резиста снижается. Минус же заключается в снижении уровня защиты самой пластины.

Кроме того, длительные процессы травления, используемые для создания на пластине элементов с высоким аспектным отношением, могут привести к разрушению слоя резиста, что в конечном итоге приведет к ухудшению качества переносимого рисунка. В то же время более тонкий резист также улавливает меньше фотонов, что потенциально снижает неравномерность краев линий резиста (LER) и другие стохастические эффекты.

Для решения проблемы резистов уже разработаны методы их химического усиления. В настоящее время начаты работы по оптимизации усиленных резистов. Появились усиленные резисты с несколькими пусковыми механизмами (мульти триггерные резисты, multi-trigger resists). В марте 2023 года были опубликованы результаты совместного исследования ASML и Института Пауля Шеррера, в рамках которого сопоставлялись стандартные усиленные резисты и мульти триггерные резисты. Было установлено, что на данный момент только стандартные усиленные резисторы могут достичь целевого разрешения в 12 нм. В то же время мульти триггерные резисты в перспективе могут обеспечить большее разрешение, но для реализации их потенциала надо решить ряд проблем. В частности, параметры мульти триггерных резистов зависят от серии химических реакций, происходящих достаточно близко друг к другу, что может привести к нежелательным результатам [8].

Для повышения производительности EUV-установок большое значение придается адаптации средств и методов метрологии к работе с тонкими пленками резистов и топологическими элементами малых размеров.

Переход к меньшим размерам топологических элементов (например, линии шириной 10 нм) и резистивным пленкам меньшей толщины (20 нм и менее) порождает новые проблемы с точки зрения метрологии. Первая проблема – снижение, и достаточно существенное, контрастности изображений, которые формируются инструментальными средствами *сканирующей электронной микроскопии критических размеров (CD-SEM)*. Вторая проблема – необходимость формирования изображений топологических элементов с размерами менее 10 нм, что ведет к необходимости создания инструментальных средств метрологии с увеличенной разрешающей способностью. При этом требуется учитывать параметры совмещения и случайных сбоев печати, требования к LER.

Кроме того, не менее важно решение специфических проблем, связанных с шаблонами и маскирующими слоями (масками) для систем с высоким значением NA . Специалисты IMEC смоделировали влияние EUV-масок/шаблонов на формирование линий и зазоров топологического рисунка с шагом 22 нм. Установлено, что на конечные структуры, формируемые на пластинах, все большее влияние оказывают именно эти недостатки. Соответственно, требуется ужесточение правил проектирования масок и шаблонов. Полученные результаты позволяют разработчикам ASML и IMEC определить спецификации EUV-шаблонов и масок для установок с высоким значением NA . Наконец, партнеры при поддержке поставщиков материалов изучают новые архитектуры поглощающих масок, новые материалы для них и шаблонов [7].

Помимо ASML и IMEC, интересные работы в области EUV-литографии проводит корпорация Applied Materials.

Перспективные решения корпорации Applied Materials

В начале марта 2023 года корпорация Applied Materials представила две новые системы, позволяющие облегчить как вопросы метрологии EUV-литографии с высоким значением NA , так и облегчить и удешевить процесс создания EUV-шаблонов.

Представленная электронно-лучевая метрологическая система VeritySEM 10 предназначена для точного измерения критических размеров элементов полупроводниковых приборов, сформированных с использованием уже освоенной EUV-литографии ($NA=0,33$), а также с применением перспективной EUV-литографии с высоким значением NA (0,55).

В настоящее время для проведения субнанометровых измерений рисунков после того, как они перенесены



ООО "Руднев-Шильев"

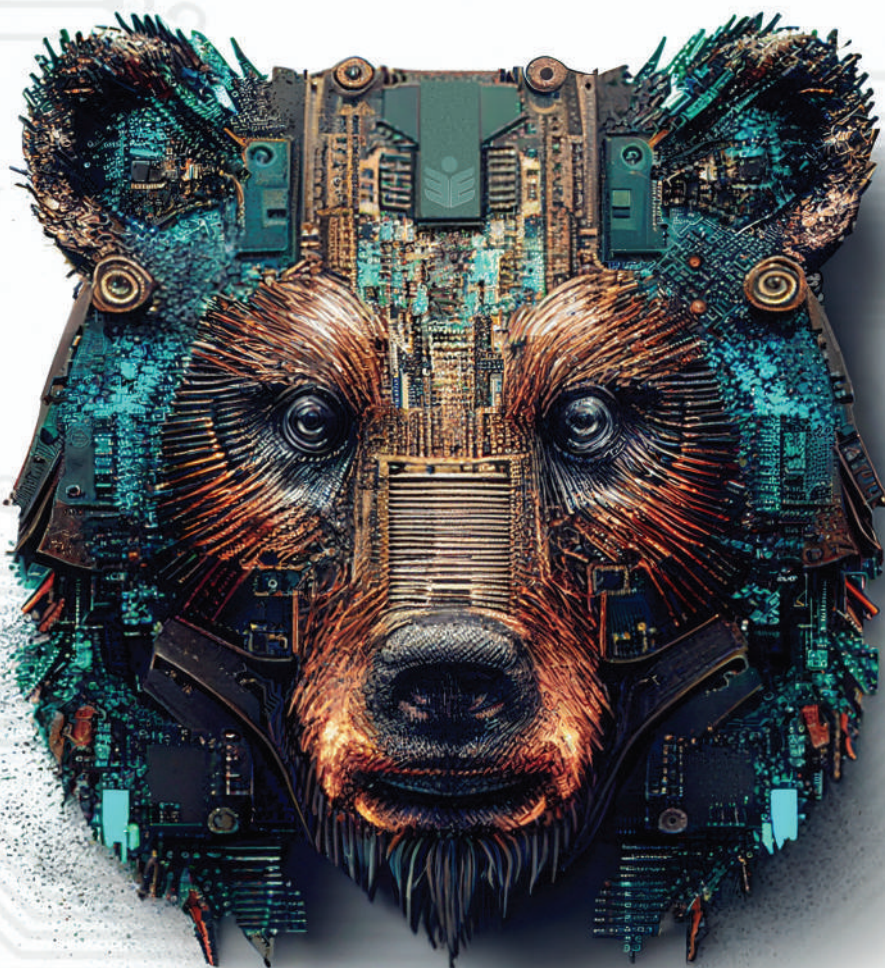
Разработка и производство:

- платы сбора данных
- измерительные приборы
- виброакустические системы
- инструментальные решения задач заказчика

Москва (495) 787-63-67
(495) 787-63-68

www.rudshel.ru
adc@rudshel.ru

Telegram



В ЦЕНТРЕ РОССИЙСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

разработчик материалов, технологий и оборудования
для производства печатных плат

Иновационные
разработки и проверенные
технологические решения

Гибкий подход
и решение нестандартных
производственных задач

Комплексная
технологическая
и сервисная поддержка

Надежность поставок, отечественное ПО



8(812) 602-27-57

info@elmaru.com

elmaru.com

установкой литографии с шаблона на резист, производители ИС используют CD-SEM. Эти измерения непрерывно калибруют производительность процесса литографии, позволяя убедиться в правильности рисунков до того, как они будут вытравлены на пластине. CD-SEM также используются после травления для сопоставления исходных рисунков с результатами на пластине. Таким образом, CD-SEM помогают контролировать процесс травления и обеспечивают обратную связь между литографией и травлением, что позволяет получить высоко коррелированные наборы данных для целостной настройки процесса.

Измерение критических размеров элементов полупроводниковых приборов становится все более сложной задачей, так как при использовании стандартной EUV-литографии, и особенно перспективной EUV-литографии с высоким значением NA, толщина резистов уменьшается. В этих условиях для получения изображений с высоким разрешением, обеспечивающим точные субнанометровые измерения, CD-SEM должен быть способен точно направлять узкий электронный луч на небольшую площадь, занимаемую чрезвычайно тонким фоторезистом. Энергия электронного луча взаимодействует с резистами и слишком высокая энергия луча может привести к искажениям рисунка и возникновению ошибок/дефектов. Обычные CD-SEMS не могут генерировать пучки, достаточно узкие для создания изображений с высоким разрешением, при достаточно низких энергиях излучения, чтобы свести к минимуму взаимодействие с тонким фоторезистом при использовании EUV-литографии с высоким значением NA.

Уникальная архитектура системы VeritySEM 10 по сравнению с обычными CD-SEM характеризуется меньшим энергопотреблением в два раза лучшим разрешением, а также увеличенной на 30% скоростью сканирования, что сокращает время взаимодействия с резистом и увеличивает пропускную способность. Все это позволяет улучшить контроль процессов EUV-литографии (в том числе с высоким значением NA) и травления, что помогает производителям ИС ускорить разработку технологических процессов и максимизировать производительность в условиях крупносерийного производства.

Система VeritySEM 10 также используется производителями ИС для метрологии критических размеров в 3D-конструкциях, включая логические транзисторы с круговым затвором (GAA) и 3D-флеш-память NAND-типа, позволяя получать изображения глубоких структур с высоким разрешением. В случае использования VeritySEM 10 при изготовлении GAA ИС эта система используется для измерения и характеристики процесса селективной эпитаксии, который является ключевым для обеспечения высокой производительности транзисторов. В случае 3D-флеш-памяти NAND-типа система обеспечивает большую зону обзора и глубину резкости, что позволяет измерять целые

структуры межсоединений, расположенных в лестничном порядке. Это, в свою очередь, помогает подстраивать схемы процесса травления [9].

Также корпорация Applied Materials представила систему *Centura Sculpta*, позволяющую усовершенствовать технологию создания шаблонов. Благодаря этой системе производители ИС могут отказаться от создания шаблона для двойного EUV-формирования рисунка. У них появилась возможность формировать шаблон для однократного EUV-формирования рисунка, а затем использовать систему *Centura Sculpta* для удлинения фигур, содержащихся в шаблоне, в любом выбранном направлении. Это позволяет уменьшить расстояние между элементами и увеличить плотность рисунка. Так как окончательный шаблон создается на основе одной маски, стоимость и сложность проектирования снижаются, а также исключается риск ухудшения результатов из-за ошибок выравнивания структур шаблона двойного EUV-формирования рисунка.

Благодаря использованию системы *Centura Sculpta* производители ИС могут получить следующие преимущества:

- экономию капитальных издержек примерно в 250 млн долл. при месячной мощности линии по обработке пластин (диаметром 300 мм) порядка 100 тыс. шт.;
- экономию издержек производства в пересчете на одну пластину около 50 долл.;
- экономию энергии более чем на 15 кВт/ч на одну пластину;
- прямое сокращение выбросов парниковых газов более чем на 0,35 кг эквивалента CO₂ на одну пластину;
- экономию воды примерно 15 л на одну пластину [10].

* * *

Развитие производственной базы полупроводниковой промышленности, а также корректировка установленных производственных мощностей во многом определяются цикличностью спроса на конечные электронные системы, использующие полупроводниковые приборы. Соответственно, и расширение/корректировка мощностей, и объем закупок полупроводникового оборудования также носят циклический характер. При этом рост закупок оборудования начинается с определенной временной задержкой (год-полтора) относительно начала очередного цикла расширения производственных мощностей. Цикличность развития производственных мощностей также связана со сменой технологических поколений, переходом на меньшие проектные нормы. При этом в последние годы наблюдается рост спроса на полупроводниковые приборы, изготовленные как по минимальным, так и более зрелым проектным нормам. Это также отражается на структуре расширения производственных мощностей.

Начало использования EUV-литографии не принесло избавления от роста затрат и длительности производственного цикла, связанных с использованием методик двойного и многократного формирования рисунка. Именно это происходило на предшествующем поколении технологий литографии. При переходе к проектным нормам 5 нм и менее и для EUV-литографии потребовались методики двойного (а в перспективе и многократного) формирования рисунка. Дальнейшее совершенствование EUV-литографии связано как с новыми методиками формирования шаблонов, позволяющих в ряде случаев использовать вместо двукратного однократное формирование рисунка, так и с освоением установок EUV-литографии с увеличенным значением числовой апертуры ($NA=0,55$). Кроме того, активно ведутся работы по совершенствованию резистов, средств и методов метрологии, ряду других направлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Davis S.** Global 200mm Semiconductor Fab Capacity Projected to Surge 20% to Record High by 2025, SEMI Reports // Semiconductor Digest, October 18, 2022.
2. **Davis S.** Global 300mm Semiconductor Fab Capacity Projected To Reach New High in 2025, SEMI Reports // Semiconductor Digest, October 11, 2022.
3. **Davis S.** Global Chip Industry Projected to Invest More Than \$500 Billion in New Factories by 2024, SEMI Reports // Semiconductor Digest. December 12, 2022.
4. **Макушин М.** Рынок технологического оборудования, проблемы EUV-литографии и перспективных методов корпусирования // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2022. № 5 (00216). С. 30–41.
5. **Davis S.** Global Total Semiconductor Equipment Sales Forecast to Reach Record High in 2022, SEMI Reports // Semiconductor Digest/ December 13, 2022.
6. **Макушин М., Мартынов В.** Производственные технологии микроэлектроники: проблемы развития. Часть 2 // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 4 (00195). С. 76–88.
7. **Shannon Davis.** Imec Ramps Up the Development of the High-NA EUV Patterning Ecosystem. Semiconductor Digest. April 26. 2022.
8. **Derbyshire K.** New Challenges Emerge With High-NA EUV // Semiconductor Engineering, March 16th, 2023.
9. **Davis S.** Applied Materials' New eBeam Metrology System Paves the Way to High-NA EUV Lithography // Semiconductor Digest. March 7, 2023.
10. **Davis S.** Applied Materials' Pattern-Shaping Technology Reduces the Cost, Complexity and Environmental Impact of Advanced Chip Manufacturing // Semiconductor Digest. March 9, 2023.

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ



Приводные решения, энкодеры и инерциальные датчики мирового уровня без ограничений поставок

ИНЕЛСО

МОТОРЫ
РЕДУКТОРЫ
ДАТЧИКИ
КОНТРОЛЛЕРЫ
ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ



www.inelso.ru

inelso.ru
+7 (812) 628-00-16
sales@inelso.ru

