

Полупроводниковая микроэлектроника – 2024 г.

Часть 1. High-NA EUV-литография имеет альтернативу вплоть до 1-нм технологии



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

Оценивая очередные этапы становления полупроводниковой микроэлектроники с 2017 г., автор настоящей статьи всегда уделял основное внимание тенденциям мирового рынка, концептуальным технологическим достижениям и материалам, даже находящимся в стадии исследований и разработки, но способным оказать значительное влияние на ее развитие в течение длительного периода. На этот раз автор решил несколько отойти от привычного подхода и рассмотреть особенности применяемой в массовом производстве технологии EUV-литографии в экстремальном диапазоне. В ближайшие 10 лет именно методы EUV-литографии с высокой числовой апертурой High-NA и Hyper-NA будут определять возможности масштабирования топологии микросхем.

EUV-литография становится слишком дорогой

На протяжении всей истории развития мировой полупроводниковой микроэлектроники сокращение линейных размеров элементов микросхем было и пока остается главным способом повышения интеграции и улучшения параметров микросхем. В этом отношении ключевую роль играет фотолитография,

чью эволюцию в последние годы можно наблюдать, начиная с процесса в глубоком ультрафиолете 193 нм (DUV), процесса в экстремальном диапазоне 13,5 нм с низкой числовой апертурой (Low-0,33NA EUV) и заканчивая технологией с высокой числовой апертурой (High-0,55NA EUV). Теперь при изготовлении логических микросхем необходимо применение не DUV-, а EUV-литографии, а значит, количество слоев увеличивается с пяти–шести

более чем до 10 и даже 20 для технологий 7, 5 и 3 нм, соответственно (рис. 1) [1]. Эти слои расположены в средней (MEOL) и заключительной (BEOL) частях технологического маршрута производства и, в основном, соответствуют процессам создания многоуровневых межсоединений и контактов.

По данным южнокорейского источника TheElec, Samsung применяет EUV-литографию на 20 слоях в 3-нм процессе, а при переходе

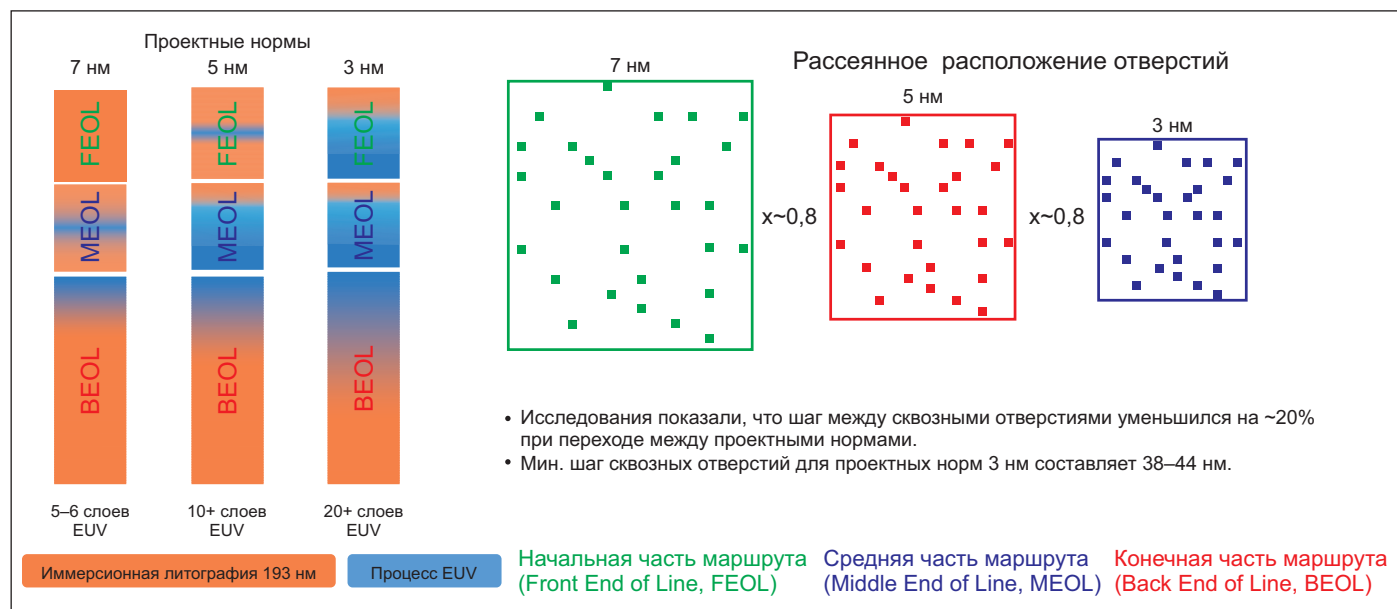


Рис. 1. Количество фотолитографических слоев, требующих применения EUV-сканеров, на начальной (FEOL), средней (MEOL) и заключительной (BEOL) стадии техпроцессов 7–5–3 нм

на 2 нм их количество возросло на 30% — до 27 слоев [2]. Ожидается, что в 1,4-нм процессе, намеченном к внедрению в 2027 г., появится свыше 30 слоев. Для производства памяти DRAM Gen 6 по технологии 10 нм компания Samsung применяет EUV-технологии на семи слоях. Количество EUV-степперов для производственной линии логических микросхем мощностью 45 тыс. пластин в месяц по технологиям 7 и 5 нм составляет 10 и 20 ед., соответственно, а их стоимость в линии достигает гигантской суммы — более 6 млрд долл. (табл. 1) [3]. Эти затраты составляют почти треть от полной стоимости фабрики по выпуску чипов.

Если оценивать затраты на пластину по типам процессов, включая материалы, амортизацию оборудования, расходы на техническое обслуживание, энергопотребление, персонал и т. д., то стоимость процессов EUV-литографии в общей расчетной (не фактической) стоимости одной пластины диаметром 300 мм, достигающей 8 468 долл. по 5-нм процессу, составляет 2 899 долл. (34%) (табл. 2) [4]. Для производства микросхем памяти требования не столь жесткие, да и затраты существенно ниже. Очевидно, что подобная цена на EUV-литографическое оборудование не слишком нравится мегапроизводителям чипов и должна вызывать отрицательную реакцию. И она последовала от TSMC, которая первоначально планировала заказать 65 EUV-установок до конца 2025 г.

Многошаблонная Low-NA EUV-литография как альтернатива однократной High-NA EUV

В 2024 г. произошло событие, заметно изменившее расклады в развитии технологии формирования фотолитографического рисунка суперсовременных интегральных схем. И виной тому — экономические и политические причины. Колоссальный спрос, сложность и дефицит оборудования EUV-литографии, монополия единственного мирового производителя — компании ASML — формировали продажную цену, превысившую 300 млн долл. Воспроизведение линейных размеров в техпроцессах свыше 7 нм, реализуемое с помощью оборудования DUV-литографии, не создавало непреодолимых технических трудностей, но требовало повышения мощности источников света. Освоение технологий 5–3 нм и большая заинтересованность Китая в закупке такого оборудования только подогревали рост дефицита. Первой трещиной, поставившей под сомнение незыблемость постоянного спроса на EUV-сканеры, стало политическое решение о запрете

поставки таких устройств в Китай. В настоящее время количество компаний — заказчиков микросхем по технологии менее 5 нм ограничено и практически не растет. В основном, это производители продуктов компьютерного и коммуникационного направления (Intel, AMD, Apple, Nvidia, Microsoft, Huawei и др.). Число мировых компаний, способных их изготавливать, и того меньше (TSMC, Samsung и Intel). Компании второго технологического уровня — производители микросхем памяти (Micron, SK Hynix) — пока не применяют этих топологических норм в своих изделиях. Таким образом, можно было ожидать определенного насыщения спроса EUV-сканеров на рынке, которое должно было произойти в 2027–2028 гг. Однако неожиданно возмутителем спокойствия стал мировой технологический лидер — компания TSMC, открыто выразившая неприятие высоких цен на EUV-оборудование.

По информации TrendForce, в настоящее время цена каждой EUV-установки составляет примерно 181 млн долл. Сканеры EUV с высокой числовой апертурой NA нового поколения стоят 290–362 млн долл., в то время как ожидаемая стоимость EUV-оборудования с еще большим значением Hyper-NA может превысить 724 млн долл., то есть оказаться примерно вдвое дороже оборудования предыдущего поколения [5]. И это без учета затрат на монтаж, запуск и подготовку к серийному выпуску. Такие цены на оборудование выдвигают на первый план его окупаемость, которая может достигаться только заметным ростом производительности и значительным повышением цен на пластины с чипами. Именно поэтому TSMC искала альтернативные технологические приемы, позволяющие максимально использовать более дешевые EUV-сканеры предыдущего поколения, и не торопилась приобретать дорогие пилотные образцы EUV с высокой числовой апертурой NA, отдав право их закупки Intel [6]. В отличие от TSMC, компания Intel не имеет большого опыта использования оборудования Low-NA EUV, особенно его двухшаблонного варианта, и старается избежать рисков, а также затягивания сроков освоения своих новых техпроцессов. Быстрое освоение новых техпроцессов и стремление опередить TSMC стало основным девизом руководителя Intel, за что ему пока прощают продолжающиеся финансовые провалы компании. Кроме того, американский гигант намерен создать основу для субнанометровой технологии.

Тайваньская компания, имеющая более половины всего мирового объема контрактного производства чипов и строящая фабрики по всему миру, на первый план выдвигает экономические критерии. TSMC не планирует применять High-NA EUV-сканеры даже для процесса A16, освоение которого намечено к концу 2026 г. [7]. Очевидно, что TSMC пытается максимально отсрочить закупку EUV-сканеров с High-NA, используя более дешевое, простое EUV-оборудование и технологию с несколькими фотошаблонами. Вероятно также, что компания планирует сразу переход на Hyper-NA EUV. Samsung рассматривает возможность внедрения оборудования с высоким значением NA, но корректирует свою долгосрочную дорожную карту с появлением Hyper-NA [8].

Начиная с разработки сканеров с высокой числовой апертурой, производители микросхем и компания ASML столкнулись с трудным архитектурным решением: как это реализовать.

Чтобы сократить проектные нормы формируемого рисунка, в конструкцию сканера можно внести следующие изменения: либо уменьшить длину волны источника света, либо увеличить размер линзы (или, точнее, числовой апертуры линзы).

По веским техническим причинам было решено использовать проекционные линзы большего размера. Основным поставщик оптики для оборудования ASML — немецкая компания Carl Zeiss даже построила новый завод для производства таких линз [9]. К сожалению, размер линзы невозможно увеличить, не вызвав других проблем, главным образом, из-за ограничений технологии EUV-фотомаски в отношении угла и размера диафрагмы сканируемого луча при экспозиции. Это привело к дальнейшим компромиссам в архитектуре оборудования с высокой числовой апертурой.

Компания ASML и ее партнеры были поставлены перед выбором: увеличить размер фотошаблона с рисунком, который должен быть напечатан на пластине, или уменьшить размер поля изображения.

Таблица 1. Количество EUV-степперов, требуемое для производства микросхем разных типов

Рынок	Производственная мощность фабрики, тыс. пл./мес.	Слои EUV	Кол-во EUV-степперов на фабрику
Логика, 7–5 нм	45	10–20	10–20
Память DRAM, 16–10 нм	100	1–6	2–10

Примечание.
1. Производительность логики EUV: один EUV-слой требует одного EUV-степпера на каждый запуск 45 тыс. пластин в месяц.
2. Производительность памяти DRAM EUV: один EUV-слой требует 1,5–2 EUV-степперов на каждый запуск 100 тыс. пластин в месяц.

Таблица 2. Расчетная стоимость затрат по типам оборудования из расчета на одну пластину по технологии 5 нм

Процессы	Расчетные затраты, долл.
Пластина кремния	571
Полировка и эпитаксия	211
Ионная имплантация	142
Степпер, фотолитография	2899
Нанесение фоторезиста	553
Травление и очистка	2372
Осаждение	1721
Итого	8468

Первый вариант не только представляет собой серьезную техническую проблему, но и влечет множество побочных эффектов, поскольку нынешняя инфраструктура фотошаблонов построена на основе стандартной инфраструктуры квадратной сетки размером 6 дюймов. Производство заготовок масок без дефектов даже при нынешних размерах препятствует разработке степперов с низкой числовой апертурой. К тому же, их непросто увеличить по площади в два или четыре раза. Инструменты, использующие маломощные источники света EUV для проверки фотошаблонов, стали доступны только недавно и разработаны в соответствии со стандартным размером 6 дюймов. Маски для EUV и инфраструктура уже в несколько раз дороже, чем эквиваленты DUV, а стоимость увеличения площади значительно возрастает.

Вариант с уменьшением размера поля изображения казался меньшим из двух зол, хотя он тоже создавал серьезные технические проблемы, но не требовал значительных изменений в экосистеме литографии вне сканера. Производители микросхем поддержали второй вариант, и ASML приступила к разработке, кульминацией которой вскоре стала поставка первой машины с высокой числовой апертурой EXE:5000.

Литографические сканеры экспонируют пластины через специальную щель, перемещая их, чтобы сформировать рисунок фото-маски (рис. 2) [10]. Как только весь рисунок воспроизведен, сканер переходит на новую область пластины и повторяет процесс. После экспозиции эта область покрывается одной полной экспозицией маски.

Пошаговое движение при экспозиции достаточно быстрое — покрываются сотни пластин в час, а точность размещения рисунка находится на нанометровом уровне. Размер поля экспозиции для сканеров с высокой числовой апертурой лишь вдвое меньше, чем у EUV с низкой числовой апертурой и традиционных инструментов DUV. Такой компромисс позволил увеличить размер объектива, сохранив стандартные размеры фотошаблонов.

Чтобы понять финансовые последствия архитектуры оборудования с высокой числовой апертурой, необходимо определить базовые концепции дозы облучения сканера и ее влияния на пропускную способность. В стоимости литографии преобладает стоимость литографического инструмента (сканера). Поскольку стоимость каждого новейшего инструмента NXE:3800E с низкой апертурой превышает 200 млн долл., стоимость сканера на одну произведенную пластину во многом зависит от его пропускной способности.

Доза — это мера энергии, достигающей пластины и вызывающей химическую реакцию в фоторезисте, которая превращает его из нерастворимого в растворимый, или наоборот. Для создания рисунка с малыми размерами обычно требуется более высокая доза, экспоненциально возрастающая при уменьшении рисунка и линейных размеров (рис. 3) [10]. Более высокая доза требует либо более мощного источника света или замедляет работу сканера. ASML увеличивает мощность источника с каждой новой моделью EUV, но этого недостаточно для соответствия экспоненциально растущим требованиям к дозе. Таким образом, сканер должен замедлиться,

чтобы каждое поле воздействия получило хотя бы минимальную дозу. Проще говоря, из-за резкого увеличения необходимой дозы затраты на литографию значительно возрастают по мере уменьшения критического размера. Более высокая доза означает, что для сохранения производительности понадобится больше сканеров для того же количества пластин, то есть капитальные затраты увеличатся.

Впрочем, имеется доступная альтернатива техпроцессу EUV-литографии с высокой NA — технология двойного экспонирования с использованием сканеров с низкой NA. Такой процесс уже применяется некоторыми производителями микросхем и предполагает выполнение двух экспозиций с помощью EUV-инструмента с низкой числовой апертурой для печати одного слоя. При меньших дозах сканер можно использовать в полной мере, и его пропускная способность ограничена скоростью обработки пластины и маски, а не дозой. Преимущество в пропускной способности двойного рисунка с низкой числовой апертурой настолько велико, что, несмотря на необходимость вдвое большего количества проходов пластины через сканер, затраты на литографию ниже, чем при однократном экспонировании с высокой числовой апертурой (рис. 4) [10]. Расчеты показывают, что это верно для техпроцессов от 3 до 1 нм, которые, вероятно, будут представлены к 2030 г.

Для всех упомянутых техпроцессов пропускная способность с высокой числовой апертурой ограничена дозой, даже если ASML достигнет заявленной цели — мощности источника 1 кВт к этапу освоения 1-нм техно-

Процесс High-NA и более высокая скорость обеспечивают производительность в 220 пластин в час 188 полуполей на пластину



Рис. 2. Снижение поля экспонирования для High-0,55NA EUV-сканера

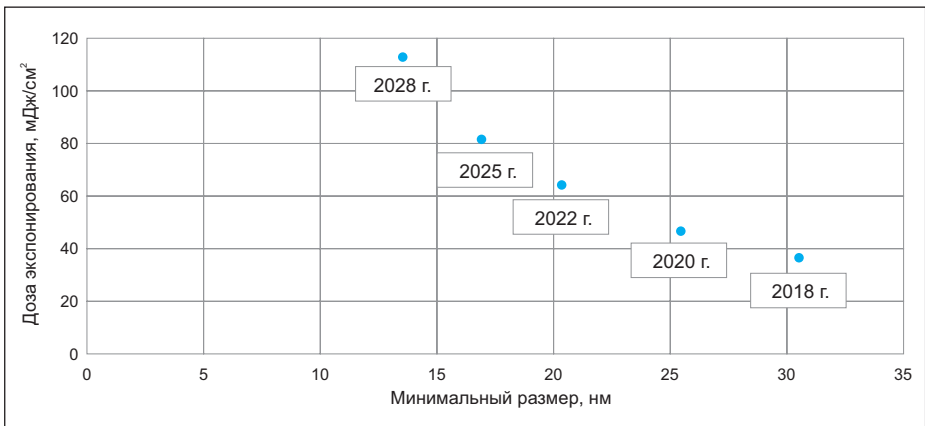


Рис. 3. Влияние минимальных размеров топологии на требуемую дозу EUV-экспонирования

логии. Эффекты дальнейшего экспоненциального роста зависимости дозы от минимальных размеров настолько снижают пропускную способность, что ценовое преимущество двойного экспонирования с низкой NA увеличивается между техпроцессами 2 и 1,4 нм, несмотря на снижение линейных размеров. К тому же, ускоренные методы и этапы, разработанные для сканеров с высокой числовой апертурой, будут перенесены в последующие модели с низкой числовой апертурой, что увеличит их производительность и еще больше улучшит их ценовое преимущество по сравнению с устройствами с высокой числовой апертурой.

Необходимо также учитывать возможные последствия, если мощность источника света нельзя увеличить до 1 кВт. Более высокая мощность источника ускоряет износ проек-

ционной оптики и фотошаблонов, поскольку отражающие покрытия подвергаются вредным воздействиям, в том числе повышенным тепловым нагрузкам. Существует вероятность, что мощность, превышающая сегодняшние 600 Вт, способна увеличить износ оптики до неприемлемого уровня. Оптика — один из самых дорогих компонентов сканера, и ее замена после короткого срока службы потребует больших затрат. Если предположить, что в дальнейшем мощность источника нельзя будет увеличить, это не изменит обстоятельств, при которых высокая числовая апертура становится более рентабельной, но означает, что общие затраты на литографию значительно вырастут — до 20% с использованием последующих техпроцессов относительно текущего базового уровня 3 нм. Кстати, общедоступные материалы подтверждают вывод

о стоимости. Традиционно сложилось так, что цена сканеров ASML каждого нового поколения выше, а стоимость одной пластины ниже, что достигается увеличением производительности в сравнении с предшествующим оборудованием. Это важно для производителей чипов и компании ASML, которая продает более дорогие сканеры. На рис. 5 показано, как количество фотолитографических слоев DUV растёт с увеличением плотности транзисторов в чипе из-за сложности процесса и использования нескольких шаблонов, а затем снижается благодаря применению 0,33NA EUV-сканера. Поскольку 0,33NA EUV для 3-нм техпроцессов также использует множество шаблонов, 0,55NA EUV может устранить некоторые литографические процессы, снова уменьшив количество слоев [11]. Еще в 2020 г. считалось, что сканеры с высокой числовой апертурой NA имеют преимущество по стоимости в сравнении с двойным экспонированием с низкой числовой апертурой. Однако резкий рост цен на сканеры, особенно с высокой NA, заставил производителей чипов искать альтернативу. Главным бенефициаром выступил мировой лидер — компания TSMC, которая по всему миру начала массово строить фабрики по производству чипов, и стоимость EUV-сканеров стала очень важной статьёй расходов.

После 2030 г. в техпроцессах 1 нм и 7 Å разрыв в стоимости, наконец, сократится. Движущей силой становится смена парадигмы и переход с масштабирования геометрии транзисторов от горизонтальных к вертикальным структурам — улучшение производительности чипа и сокращение площади достигается за счет вертикального, а не гори-

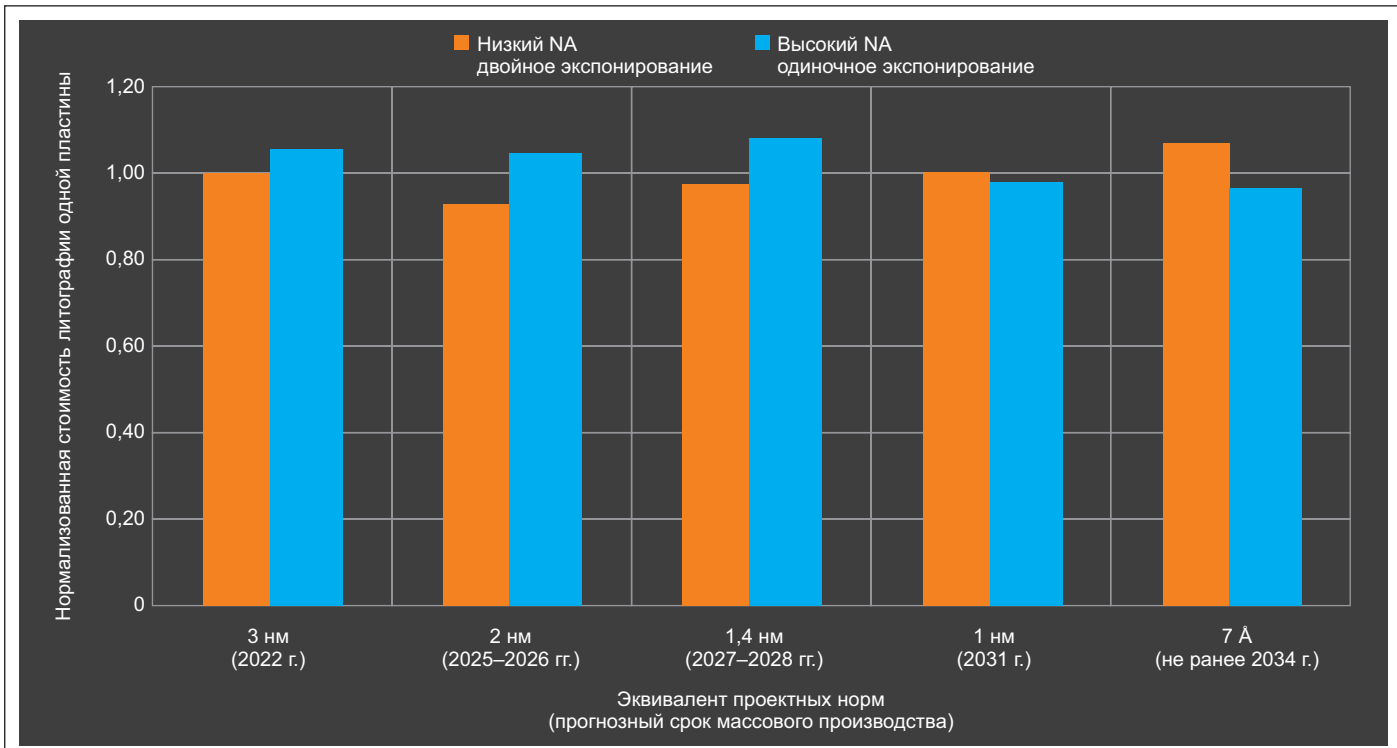


Рис. 4. Нормализованная стоимость затрат фотолитографии на пластину при использовании Low-NA и High-NA EUV-процессов для технологий 3 нм – 7 Å

зонтального размещения элементов. Это означает, что требования к проектным нормам остаются прежними и продолжающееся совершенствование фоторезиста и мощности источников приближает высокую числовую апертуру к паритету.

Технологии многшаблонной фотолитографии для формирования топологии с малыми размерами известны довольно давно, но в массовом производстве применялись мало. Существует несколько разновидностей

альтернативных процессов с использованием Low-NA EUV-литографии для обеспечения минимальных размеров рисунка. Они включают до двух–четырех фотошаблонов, несколько стадий процессов литографии и травления (LELELE) с использованием классических фоторезистивных слоев, наносимых на пластину методом центрифугирования, и так называемых твердых масок, чаще всего формируемых путем осаждения из газовой фазы с плазменной активацией (PECVD).

Схема двухшаблонного варианта приведена на рис. 6 а–б.

Более сложные варианты включают формирование спейсеров на боковых стенках областей топологии и многоступенчатые процессы литографии, плазменного травления и «взрывного» жидкостного травления (рис. 6 в). Такие процессы, особенно если они применяются на многих критических слоях, существенно усложняют технологию и могут привести к повышению дефектности и сни-

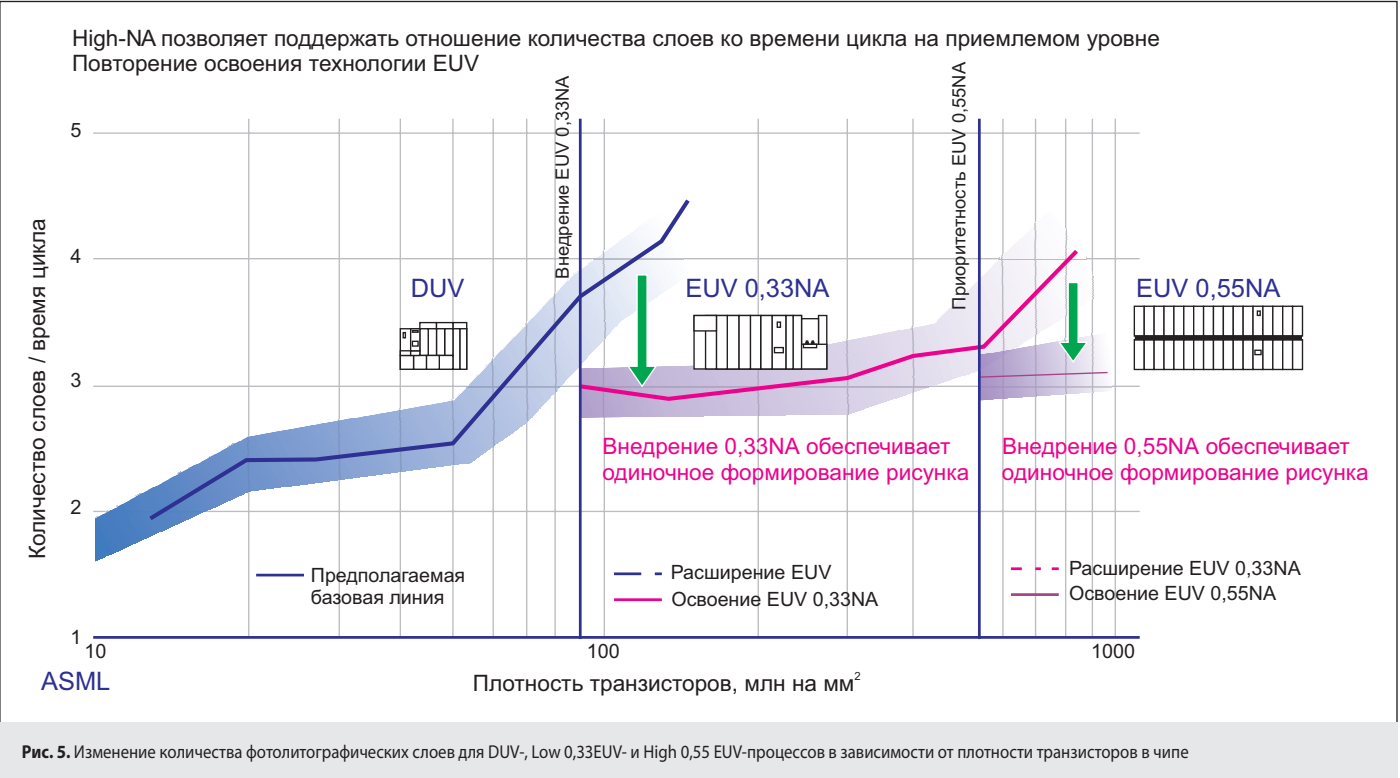


Рис. 5. Изменение количества фотолитографических слоев для DUV-, Low 0,33EUV- и High 0,55 EUV-процессов в зависимости от плотности транзисторов в чипе

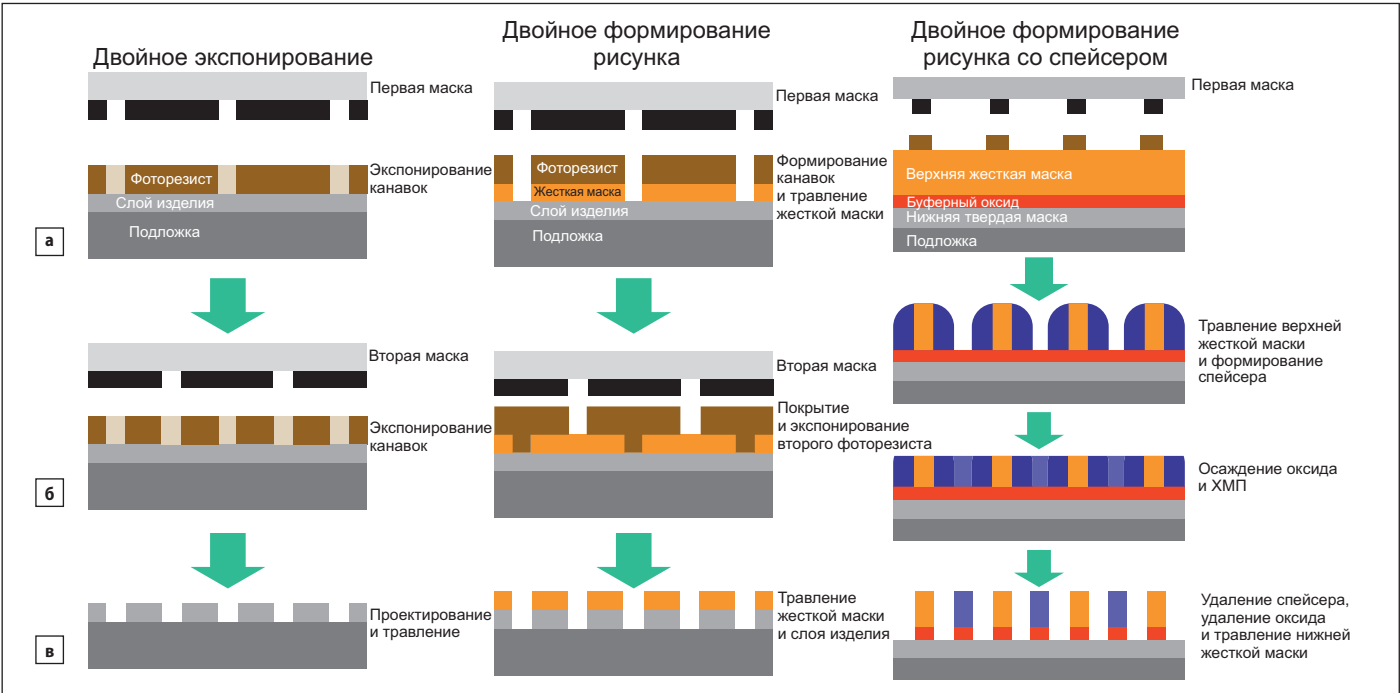


Рис. 6. Схема двухшаблонного EUV-процесса с использованием: а) маски фоторезиста; б) дополнительной твердой маски; в) спейсеров

жению выхода годных. Для их реализации требуется очень высокий уровень культуры и организации производства чипов. В противном случае многошаблонная Low-NA EUV-литография не станет альтернативной и окажется убыточной. В отличие от высокопрофессиональной компании TSMC, которая отличается способностью поставить на технологический поток, сделать массовыми и выгодными самые сложные известные техпроцессы, не все компании смогли добиться подобных результатов. Это значит, что каждая компания, исходя из своих возможностей, будет самостоятельно выбирать процесс: однократный High-NA EUV с дорогим сканером или многошаблонную Low-NA EUV-литографию с более дешевым оборудованием.

В августе компании Imec и ASML сообщили, что им удалось с помощью установки Twinscan EXE:5000 с числовой апертурой 0,55 и однократного экспонирования High-NA EUV создать металлические линии с шагом 19 и шириной 9,5 нм для логических и DRAM-транзисторов, что достаточно для 1,4-нм техпроцесса [12].

Мировая микроэлектроника очень вариативна и отзывчива на новые требования и запросы, особенно по перспективным технологиям. Мировой полупроводниковый машиностроительный гигант Applied Materials отреагировал на тенденцию снижения линейных размеров, предложив установку Centura Sculpta [13]. По мнению специалистов компании, установка предназначена для расширения возможностей High-NA EUV-литографии. Кроме того, она сокращает применение двойного экспонирования и нескольких фотошаблонов. Основное ее применение связано с процессами формирования металлизации и переходных контактов для уменьшения зазо-

ра между ними. Процесс выполняется после EUV-литографии и травления окон путем сканирования по поверхности пластины наклонного реактивного ленточного луча, расширяющего размер контактов и уменьшающего зазор между ними. По утверждению специалистов, Centura Sculpta не заменяет полностью двойное EUV-экспонирование в производственном процессе, но сокращает его использование, тем самым экономя время, а также сотни миллионов долларов капитала (250 млн долл. за 100 000 запусков пластин в месяц).

Следующий рубеж — Hyper-NA EUV

ASML объявила о планах по созданию нового оборудования для литографии до 2035 г., которое расширит пределы проектирования чипов с самой высокой плотностью транзисторов. В рамках этой задачи компании предстоит улучшить систему освещения для экспонирования и повысить производительность до 400–500 пластин в час (рис. 7) [14]. High-NA увеличивает числовую апертуру NA до 0,55 по сравнению с 0,33NA в предыдущих инструментах EUV. Около трех лет назад компания заявила, что High-NA в течение как минимум 10 лет поможет производителям микросхем освоить технологии, выходящие далеко за рамки 2 нм. Теперь компания ASML заявила, что примерно в 2030 г. предложит Hyper-NA, достигающую 0,75NA, и впервые добавила Hyper-NA EUV в свою дорожную карту. Одной из проблем создания такого оборудования является поляризация света, начинающаяся примерно с 0,55NA и ухудшающаяся контраст. Чтобы этого избежать, необходимо применение поляризаторов. В то же время они блокируют свет, снижают энергоэффективность и увеличивают себестоимость

производства. Еще одной проблемой Hyper-NA станет фоторезист. Уже на уровне 0,55NA сокращается толщина фоторезиста, а с Hyper-NA ситуация становится еще хуже. Это приведет к увеличению проблем с селективностью травления. По мнению специалистов ASML, высокая числовая апертура должна сохраняться в технологиях от 2 нм до 14 Å, 10 Å и, возможно, даже 7 Å. После этого альтернатив Hyper-NA будет мало.

По мере усложнения технологии литографии и особенно при переходе к Hyper-NA EUV, кроме проблем стоимости на первый план выходит комплекс технологических вопросов, связанных не только с оборудованием, но и с формированием рисунка минимальных размеров. Требуются новые подходы и материалы, включая фотошаблоны, которые не под силу даже такой компании как ASML. Предлагая рынку новое супердорогое оборудование, ASML должна предоставить и серийноспособный техпроцесс, имеющий приемлемую себестоимость. Для решения этих задач была привлечена компания Imec и организована совместная лаборатория литографии ASML–Imec High-NA EUV в Вельдховене (Нидерланды), созданная для ускоренного и экономичного внедрения в производство высококачественного процесса EUV. За короткий период ASML и Carl Zeiss разработали специальные решения для сканеров High-NA EUV, связанные с источником, оптикой, анаморфотностью объектива, сшивкой изображения, уменьшенной глубиной резкости (DOF), ошибками размещения краев (EPE), а также точностью совмещения и наложения рисунка. Параллельно с этим Imec в тесном сотрудничестве с ASML и сетью поставщиков подготовила экосистему применения сканеров с 0,55NA. Выполнены

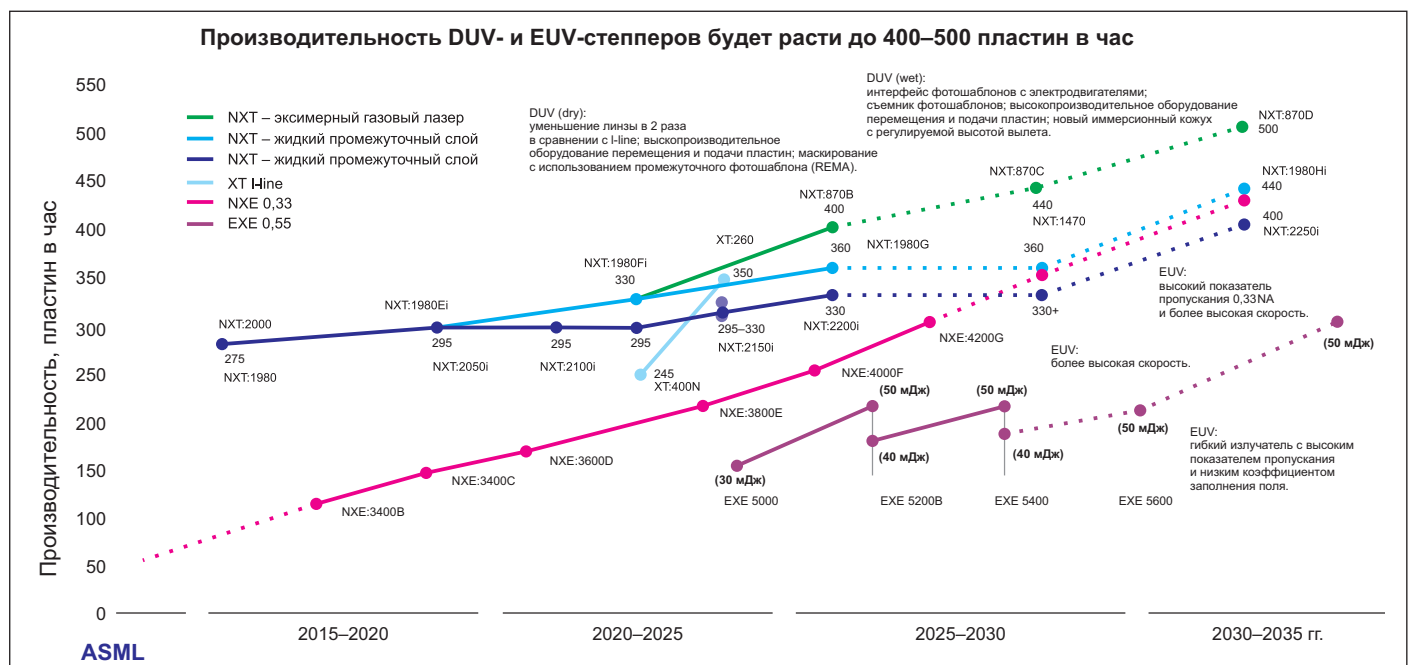


Рис. 7. Дорожная карта развития DUV- и EUV-сканеров компании ASML до 2035 г.

работы по обеспечению своевременной доступности современных фоторезистивных материалов, фотошаблонов, метрологических методов, стратегий визуализации, оптической коррекции приближения (OPC), а также интегрированных методов структурирования и травления для первого поколения EUV с высокой NA. Вся подготовительная работа за последнее время привела к созданию первых пластин с шириной линий 10 и 16 нм (с шагом 20 и 32 нм), которые могут быть успешно сформированы после экспонирования с использованием металлооксидных резистов (MOR) и химически усиленных резистов (CAR), соответственно. По заверениям обеих компаний, в настоящее время прототип сканера и инфраструктура готовы, а внедрение в крупносерийное производство ожидается в 2025–2026 гг.

Imec и ASML начали проработку технико-экономических обоснований Hiper-NA EUV с еще более высокой числовой апертурой 0,75–0,85. Hiper-NA может стать преемником 0,55NA EUV, что позволит передовым компаниям создавать рисунки с шагом намного ниже 20 нм, избегая, таким образом, возврата к использованию многоуровневого экспонирования High-NA EUV.

ASML не рассматривает вариант с сокращением длины волны светового излучения до 6 нм и делает основную ставку на Hiper-NA EUV. Одной из важных причин такого решения является значительно возрастающие размер и вес сканеров в первом случае, что заметно усложняет авиадоставку такого оборудования клиентам на разных континентах.

Японские и прочие альтернативы ASML

Японская компания Canon, являющаяся разработчиком новой наноимпринтной технологии, рассматривает ее как альтернативу EUV-процессу [15], но ее пропускная способность обычно намного ниже, чем у сканера с высокой числовой апертурой, а минимальный уровень достигаемых топологических размеров не подтвержден. Проблемами также являются недостаточная точность и более высокий уровень дефектности наноимпринтной технологии. Аналитики полагают, что сначала она должна показать свою эффективность на более зрелых процессах 14–28 нм, после чего можно говорить о дальнейших перспективах. В любом случае для этого потребуются два–три года [16].

В 2024 г. в Японии появляются новости о создании альтернативы EUV-сканерам компании ASML. Так, в августе стало известно, что группа специалистов Окинавского института науки и технологий (OIST) создала упрощенное решение для EUV-литографии, способное изменить индустрию оборудования производства микросхем [17]. По заявлению японских ученых, их установка значительно проще благодаря использованию всего двух

зеркал вместо шести у ASML, что значительно повышает эффективность светового потока, достигающего пластины. Новинка существенно дешевле и потребляет всего 100 кВт электроэнергии вместо 1 МВт у ASML. Однако никаких подробностей о технических характеристиках и готовности к коммерческому внедрению не приводится, а потому в настоящее время производственные перспективы отсутствуют.

Существующее оборудование многолучевой электронно-лучевой литографии позволяет отказаться от дорогостоящих фотошаблонов за счет прямого сканирования рисунков непосредственно на пластину. Единственная нидерландская компания Murrer, разрабатывавшая инструменты для электронно-лучевой литографии, обанкротилась, а сама технология так и не получила массового распространения на производстве.

Таким образом, в ближайшие годы альтернативы оборудованию ASML так и не предвидится.

Заключение

Очевидно, именно наработки и достижения TSMC по многошаблонной технологии позволили китайской компании SMIC с помощью бывших сотрудников тайваньского чипмейкера применить их для освоения DUV-литографии по 7-нм техпроцессу и двигаться к 5 нм. Как показывают расчеты, используя DUV-литографию (если не смотреть на затраты), можно принципиально достигнуть уровня 3 нм [18]. Компания TSMC, весьма продвинутая и компетентная в серийной технологии многократного экспонирования в DUV- и EUV-литографии, сможет создать альтернативу очень дорогому оборудованию High-NA EUV компании ASML для 1–3-нм процессов. Эти достижения затем получают известность и становятся доступными другим фирмам, частично подрывая монополию единственного производителя такого оборудования, и включают механизмы рыночного регулирования для снижения себестоимости производства. Компании ASML придется считаться с этим обстоятельством. Однако в ближайшие три–пять лет компании ASML ничего не грозит, поскольку вместо одного типа оборудования она может предложить другой тип своих же сканеров.

Понятен и сценарий продвижения китайской микроэлектроники в область субнанометровых технологий и достижения рубежей, пока закрытых санкциями США. Едва ли в ближайшем будущем Китай сможет самостоятельно создать и производить подобное оборудование, но разработать технологию литографии на импортном степпере вполне способен. Как в свою бытность это делал СССР при существовавших тогда правилах CoCom по ограничению экспорта оборудования, Китай может обходными путями приобрести установку EUV-литографии и с ее помощью,

а также используя имеющиеся наработки многократного экспонирования, выйти на рубежи проектных норм 1 нм. Имеющееся у Китая оборудование для DUV-литографии не позволит выйти на эти нормы даже с многократным экспонированием. Реализовать масштабное серийное производство изделий Поднебесной не удастся, но не остановит ее технологическое продвижение, несмотря на санкции. Однако времена изменились, и сделать такую закупку будет непросто, а с учетом монополии производителя, ограниченного количества пользователей и требуемой прозрачности каждой такой сделки, почти нереально. Однако никто не знает всех возможностей Китая в текущих условиях, а высокие коммиссионные творят чудеса. Следует также иметь в виду, что при падении спроса на оборудование High-NA EUV со стороны TSMC, Samsung, Intel, Китай готов купить его по любой цене.

Хотя компания Intel и делает оптимистичные заявления о планах по закупке установок High-NA EUV, глубокий финансовый провал по итогам II кв. текущего года, урезанные инвестиции в строительство новых предприятий по всему миру и планируемое увольнение 15 тыс. сотрудников подтверждают давно назревшее и запоздавшее требование обеспечить жесткую экономию в компании [19]. Об этом писал даже автор данной статьи. Но если не сработает ставка на освоение пяти техпроцессов за четыре года, которую сделал руководитель Intel Пит Гелсингер, чтобы опередить TSMC, то, вероятно, его деятельность в компании закончится увольнением.

Неослабевающие противоречия по санкциям к Китаю между ASML, Нидерландами и США могут привести к расколу. Появившаяся информация о том, что США планируют принять новые правила экспортного контроля и исключить из списка ограничения на поставки оборудования в Японию, Нидерланды и Южную Корею [20], лишь подтверждает такую возможность. Руководство Нидерландов и ASML уже неоднократно выражало недовольство санкциями США к Китаю, касающимися ASML. Однако политическая ситуация в мире с каждым годом становится менее предсказуемой, а ее влияние на мировую экономику все более разрушительным.

В любом случае, передовые мировые компании не откажутся от приобретения степперов с высокой числовой апертурой, что и подтвердило решение компаний TSMC, Samsung, SK Hynix, разместивших заказы у ASML по стоимости около 380 млн долл. за каждую установку [21]. Первые две компании получают это оборудование в течение текущего года, а SK Hynix намерена его использовать в 2026 г. для производства микросхем памяти DRAM. Монтаж, запуск и освоение техпроцесса на этом оборудовании требуют значительного времени и средств, и заказчики должны делать закупки заблаговременно.

Компания TSMC по-прежнему планирует осуществить массовое приобретение High-NA

EUV-степперов только в 2028 г. на этапе освоения 1,4-нм техпроцесса.

Скорректировала свои планы компания Samsung. Первоначальные договоренности с ASML подразумевали, что Samsung в течение десяти лет закупит не менее трех литографических сканеров ASML в каждой из линеек Twinscan EXE:5200, EXE:5400 и EXE:5600. Теперь же, как стало известно, Samsung в этом месяце уведомила ASML о намерениях ограничить ассортимент закупаемых литографических систем устройствами Twinscan EXE:5200 и не торопиться с приобретением последующих моделей [22]. Более того, Samsung приостановила подготовку к строительству исследовательского центра в корейском Хвасоне, который должен был принять заказанное оборудование. Компании TSMC и Samsung пока ограничиваются получением High-NA EUV-сканеров для пилотного запуска и не спешат подтверждать массовые закупки. И это не самые хорошие новости для ASML. В то же время у ASML появляется новый клиент, который планирует закупку EUV-оборудования, – японская компания Rapidus, строящая 2-нм фабрику. ASML даже решила создать центр поддержки для производства полупроводников в окрестностях города Титосэ (Хоккайдо) и до 2028 г. увеличить штат центра на 40% до 560 человек [23]. Intel и Национальный институт передовой промышленной науки и технологий Японии (AIST) при Министерстве экономики, торговли и промышленности планируют создать центр НИОКР в Японии [24]. Ожидается, что новый объект будет построен в течение трех–пяти лет, а общий объем инвестиций достигнет сотен миллионов долларов. Его основной сферой деятельности станет оказание услуг сторонним компаниям по процессам EUV-литографии. Однако это никак не восполнит большой пробел из-за возможной задержки в заказах оборудования от TSMC и Samsung.

Выводы

1. Высокие цены на оборудование EUV-литографии с большой числовой апертурой High-NA от компании ASML, достигающие трети стоимости современной линии производства чипов, вызвали неприятие со стороны главных мировых чипмейкеров — компаний TSMC и Samsung — и отказ от массовой закупки таких систем. В течение ближайших пяти–шести лет это может изменить в худшую сторону рыночный спрос на такие системы.
2. TSMC положительно оценивает возможность применения имеющегося у нее оборудования Low-NA EUV и техпроцесса с несколькими фотошаблонами и неоднократным экспонированием вместо однократного с использованием High-NA EUV вплоть до технологии A14, намеченной к освоению в 2028 г.

3. Аналитики полагают, что в компаниях с высоким технологическим уровнем, не допускающих резких провалов выхода годных, затраты на производство пластин микросхем по технологии до 1 нм с помощью оборудования Low-NA EUV с многократным экспонированием меньше, чем с использованием однократной литографии High-NA EUV.
4. Компания ASML будет вынуждена пересмотреть свою рыночную стратегию по оборудованию High-NA и Hyper-NA EUV, в первую очередь по минимизации роста цен, но спрос на ее оборудование сохраняется, и рыночные позиции компании пока ничего не угрожает.
5. Развитие технологии фотолитографии для техпроцессов свыше 1 нм будет происходить по индивидуальным решениям производителей чипов на основе компромиссов между многошаблонной Low-NA EUV- и одношаблонной High-NA EUV-литографией, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. Для реализации техпроцессов менее 1 нм требуется Hyper-NA EUV-литография с высокой числовой апертурой.
6. Компания ASML совместно с бельгийским институтом Imec проводят успешные комплексные работы по сквозной разработке литографии High-NA и Hyper-NA EUV с однократным экспонированием (для размеров менее 1 нм), включая фотошаблоны, новые фоторезисты, методы выравнивания поверхности, метрологию, повышение производительности и т. д.
7. В ближайшей перспективе шансов на появление альтернативы оборудованию EUV-литографии и прекращение монополии компании ASML очень мало, поскольку японское альтернативное оборудование еще не дошло до экспериментальной проверки в массовом производстве, а его технические возможности не подтверждены.
8. С учетом перехода мировой микроэлектроники с горизонтального на вертикальное масштабирование конструкции транзисторов перспективы фотолитографии до технологии 7 Å на ближайшие 7–10 лет оптимистичны, но дальнейший прогресс в области сокращения размеров и повышения интеграции проблематичен из-за физических ограничений, в том числе самого кремния.

Литература

1. EUV Intercept at Logic 7 nm Mode — ASML. VLSI Symposium. 2020.
2. Samsung's 2 nm node to have 30% more EUV layers. The Elec Inc. July 19. 2024 // theelec.net.
3. Боднар Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2020. Часть 3. Марафонская полупроводниковая гонка к 1 нм // Электронные компоненты. 2021. №2.

4. Die Size and Reticle Conundrum – Cost Model with Lithography Scanner Throughput. Semianalysis. June 19. 2022 // substack.com.
5. Price for ASML's Hyper-NA EUV Rumored to Double, Causing TSMC, Samsung and Intel to Hesitate. TrendForce. 01.07.2024 // www.trendforce.com.
6. ASML's First High-NA EUV Litho Scanner Arrives at Intel. AnandTech. January 5. 2024 // www.anandtech.com.
7. TSMC says it doesn't need High-NA EUV chipmaking tools for 1.6nm-class node, but Intel has championed the tech. Tom's Hardware. April 25. 2024 // www.tomshardware.com.
8. Цена на Hyper-NA EUV от ASML удвоилась, что повергло в раздумья TSMC, Samsung и Intel. Время электроники. 01.07.2024 // russianelectronics.ru.
9. New multifunctional factory for ZEISS in Wetzlar celebrates topping-out ceremony. ZEISS Group. July 01. 2024 // www.zeiss.com.
10. ASML Dilemma: High-NA EUV is Worse vs Low-NA EUV Multi-Patterning. Semianalysis. December 11. 2023 // substack.com.
11. ASML EUV Update at SPIE. SemiWiki. June 24. 2022 // semiwiki.com.
12. Imec demonstrates logic and DRAM structures using High NA EUV Lithography. Imec. August 07. 2024 // www.imec-int.com.
13. Pattern-Shaping System Speeds Up Chip Production. EE Times. 17.03.2023 // www.eetimes.com.
14. ASML Aims for Hyper-NA EUV, Shrinking Chip Limits. EE Times. 12.06.2023 // www.eetimes.com.
15. Canon создала ультрадешевый 5-нм литограф-убийцу бизнеса ASML. Время электроники. 08.11.2023 // russianelectronics.ru.
16. Canon Litho Tool Years from Commercial Use, Analysts Say. EE Times. 27.10.2023 // www.eetimes.com.
17. Japanese scientists develop simplified EUV scanner that can make production of chips considerably cheaper. Tom's Hardware. August 06. 2024 // www.tomshardware.com.
18. Extension of DUV Multipatterning Toward 3nm. SemiWiki. October 02. 2023 // semiwiki.com.
19. Intel призналась в провале. Главный мировой производитель процессоров для ПК получил колоссальный убыток и увольняет 15 тыс. человек. CNews. 2 августа. 2024 // cnews.ru.
20. Новые правила США по экспорту в Китай иностранного оборудования для производства чипов освобождают от ответственности некоторых союзников. Время электроники. 31.07.2024 // russianelectronics.ru.
21. Samsung to bring in ASML's High-NA EUV equipment. Evertiq. August 19. 2024 // evertiq.com.
22. Samsung усомнилась в нужности литографических машин ASML класса High-NA EUV. 3DNews. 20 августа. 2024 // 3dnews.ru.
23. ASML to establish a base in Japan in support of Rapidus. DigiTimes Asia. September 28. 2023 // www.digitimes.com.
24. Intel and AIST to Establish R&D Hub in Japan, Focusing on Introducing EUV Lithography. TrendForce. September 04. 2024 // www.trendforce.com.