

## ТЕХНОЛОГИИ

# БЕЗМАСКОВАЯ ЛИТОГРАФИЯ - ТЕХНОЛОГИЯ MLE™

## ИЛИ КАК ПРЕОДОЛЕТЬ ДОСТИГНУТЫЙ ПРЕДЕЛ В 3D- И ГЕТЕРОГЕННОЙ ИНТЕГРАЦИИ



Текст: Дмитрий Суханов



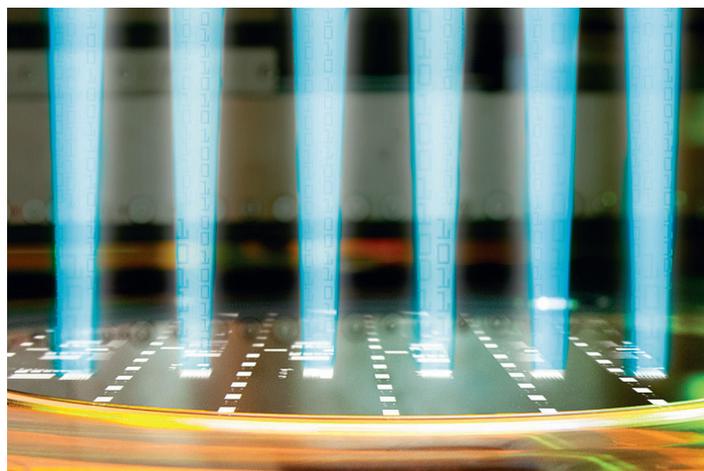
Современные возможности и непрерывное развитие оборудования для литографических процессов в полупроводниковом производстве обусловлены рядом тенденций, которые формируют наше «цифровое» сообщество. Технология безмаскового экспонирования MLE™ (MaskLess Exposure) от компании EV Group (EVG) позволит сделать следующий шаг и преодолеть множество ограничений в 3D- и гетерогенной интеграции, связанных с использованием стандартных методов экспонирования и фотошаблонов.

**Что это за тенденции? О каких возможностях, да еще и с непрерывным развитием, идет речь? Какие ограничения 3D- и гетерогенной интеграции можно преодолеть, если использовать технологию MLE™?**

Поскольку масштабирование по плотности 2D-интегральных схем достигло своих пределов как в размерах, так и в стоимости, особенно для процессов формирования рисунка структур, в настоящее время достижения в миниатюризации и производительности устройств расширяются в сторону трехмерной (3DI) и гетерогенной интеграции (HI – Heterogeneous Integration) в современном корпусировании. Данный подход рассматривается как ключевой фактор развития изделий нового поколения, где процессоры для мобильных устройств запустили первый цикл роста 3DI/HI. Ожидается, что этот цикл продолжится, пока области применения, требующие высокой производительности – искусственный интеллект (AI – Artificial Intelligence) и системы связи поколения 5G (5G) – будут набирать обороты в мобильных устройствах. Также на рост 3D/HI окажут существенное влияние системы для автономного вождения, которым необходимы высокая надежность и пропускная способность сети передачи данных, а также развивающийся семимильными шагами рынок Интернет вещей (IoT – Internet of Things).

Технологии в современном корпусировании с годами стали более сложными и разнообразными. Переход от устройств с одним кристаллом в корпусе к нескольким кристаллам в корпусе стал возможен благодаря трехмерной интеграции. Данный подход является одним из вариантов решения проблемы обработки большого потока данных, созданных с помощью высокопроизводительных вычислений. Инновации в дизайне чиплетов и разнообразные схемы интеграции теперь могут включать несколько уровней (слоев) с топологическими рисунками. Необходимо учитывать постоянно растущие требования к гибкости и адаптивности дизайна, рисунка структур и возможности одновременного применения систем литографического структурирования как на уровне кристалла или пластины, так и при внутренней литографической обработке в 3DI. Это важно, чтобы сократить время на разработку и одновременно охватить широкий спектр платформ, используемых в современном корпусировании. Кроме того, любое усовершенствование дизайна или структуры конечного продукта добавляет дополнительные литографические процессы – уровни и, соответственно, необходимо дополнительное количество фотошаблонов. Оборудование для создания, хранения, обработки и поддержания работоспособности фотошаблонов составляет значительную часть общих производственных затрат. При этом нужно учитывать, что затраты на замену обычных лазерных источников или ртутных ламп в литографических системах также

Компания EV Group, Австрия, [www.EVGroup.com](http://www.EVGroup.com), является мировым лидером в области высокотехнологичных решений и оборудования для изготовления МЭМС, компаундных полупроводников, силовых компонентов и устройств на основе нанотехнологий. Основная продукция: оборудование для сварки пластин, обработки утоненных полупроводниковых пластин, оборудование для фотолитографии, наноимпринтной литографии (NIL), метрологическое оборудование, а также устройства для нанесения и проявления фоторезиста, очистки пластин и систем контроля. Компания была основана в 1980 году, в настоящее время обслуживает и поддерживает развитую сеть клиентов и партнеров по всему миру.



1

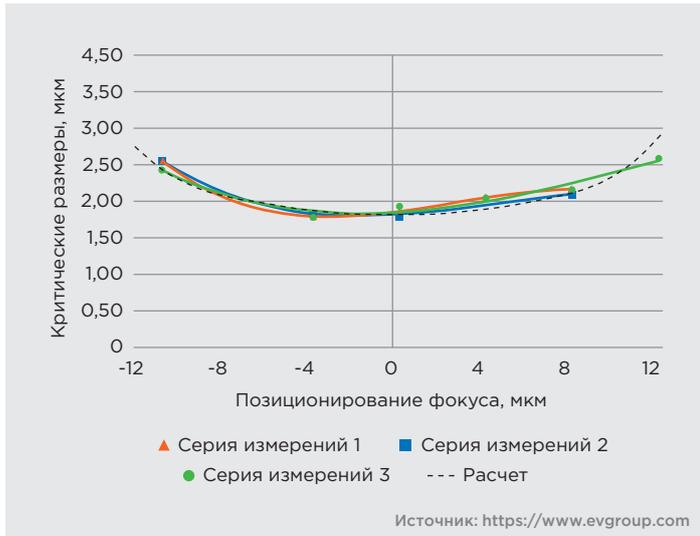
Технология EVG MLE™



2

Система безмаскового экспонирования LITHOSCALE®

Источник: <https://www.evgroup.com>



3

Критический размер структур в зависимости от положения фокуса для оценки окна процесса DoF

значительное влияют на производственные затраты. Время ожидания новых наборов фотошаблонов, а также общие концепции проверки новой разработанной конструкции для устройств с большим количеством 3D-структур, по сути приводят к серьезному удлинению цикла разработки при использовании традиционного подхода на производстве, в основе которого лежат фотошаблоны.

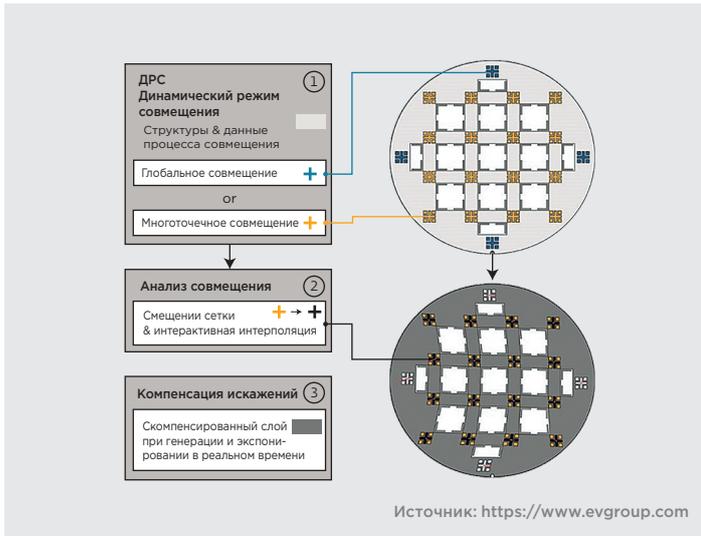
Все эти требования послужили для компании EVG толчком к разработке технологии безмаскового экспонирования (MLE™) (рис 1) и системы безмаскового экспонирования LITHOSCALE® (рис 2), что и позволило решить критические задачи в области 3DI и HI полупроводниковых структур. Технология MLE™ решает важнейшую потребность в гибкости конструкции и адаптивности ее использования, обеспечивая уникальную возможность масштабирования как на этапах разработки, так и в серийном производстве. Таким образом сокращаются циклы разработки между этапами НИОКР и производства, а также устраняются проблемы, связанные с использованием фотошаблонов. Данная технология отличается высоким показателем разрешения (<2 мкм линия/зазор), отсутствием полей сшивки, возможностями динамического экспонирования всей поверхности пластины (подложки), что дает быструю скорость обработки и низкую стоимость владения (CoO – Cost of Ownership).

### Какие ограничения традиционных методов экспонирования в 3DI можно преодолеть при помощи технологии MLE™?

Разрешение любой оптической системы, используемой в системах фотолитографического структурирования, определяется соотношением длины волны экспонирования и ее числовой апертуры (NA – Numerical Aperture). По определению, NA определяет способность собирать

и излучать свет через линзу и характеризуется углом апертуры и, таким образом, сильно зависит от фокусного расстояния. Технически, изменение NA в системах экспонирования более рентабельно, чем сокращение длины волны УФ-излучения источника света. Системы экспонирования в серийном производстве (степперы) обычно ориентированы на более высокое значение NA, чтобы обеспечить структурирование более мелких критических размеров. С другой стороны, более высокое значение NA уменьшает глубину резкости. Поиск компромисса между разрешением и глубиной фокусировки часто является решающим параметром при проектировании схемы межсоединений различных элементов. Особенно это применимо в отношении современного корпусирования, поскольку в данной технологии пластина является центральным элементом интеграции кристаллов как полученных с использованием различных технологий, так и от различных производителей. Помимо физических ограничений и неточностей, связанных с установкой кристаллов и их сдвигом, вызванным избыточной заливкой, возникают различные дополнительные сложности. И с ними должны бороться современные степперы и другие литографические системы, в основе которых лежит использование фотошаблонов. Кроме того, размер области экспонирования фотошаблона и размеры оптических систем при статическом экспонировании существенно ограничивают рабочую область. Это может стать особенно сложной задачей при изготовлении интерпозеров более крупного размера, где линии сшивки или несовпадающие области перекрытия полей экспонирования сетки могут повлиять на электрические свойства в пределах слоя перераспределения (RDL – redistribution layer). Возможность создания рисунка без сшивки для интерпозеров, размер которых превышает текущий размер фотошаблонов, становится все более значимым в современных устройствах, необходимых для сложных многоуровневых структур, таких как расширенная обработка графики, искусственный интеллект и высокопроизводительные вычисления.

Система MLE™ удовлетворяет всем указанным потребностям за счет сочетания субнанометровой точности движения рабочего столика, высокоинтенсивной оптики без хроматических искажений и формирования в векторном режиме рисунка в реальном времени из файла топологии «цифрового шаблона». Для сравнения: другим подходам, которые требуют сканирования маски перед формированием рисунка, необходимо 141 ГБ данных для каждой 300-мм пластины. В итоге, рисунок цифрового шаблона проецируется с точностью до долей мксек на поверхность подложки. Как и большинство современных линз, система визуализации MLE™ ограничена дифракционными явлениями и поддерживает глубину резкости (DoF – Depth of Focus)  $\pm 12$  мкм. Измерение рабочих характеристик технологического окна DoF при разрешении 2 мкм линия/зазор и расчетная модель показаны на рис 3.



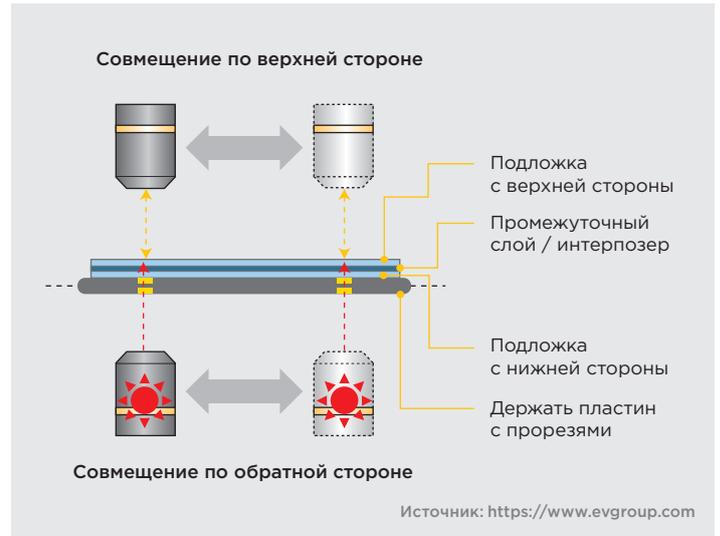
4  
Возможность использования ИК-излучения и держателя пластин собственной разработки для пластин размером до 300 мм

Относительно небольшое экспозиционное поле и точная автофокусировка (<1 мкм) расширяют полезный диапазон динамической фокусировки в верхней части экспозиционного окна до более чем 100 мкм. Возможность управления положением фокуса в больших значениях относительно положения пластины посредством позиционирования зажимного патрона и самого держателя пластины позволяет компенсировать разновысотность в искривленных и деформированных подложках.

**Каким способом удалось решить непреодолимые проблемы для стандартных методов экспонирования?**

Ответ на этот вопрос достаточно простой – использование методов динамической экспозиции и активной компенсации сдвига кристалла.

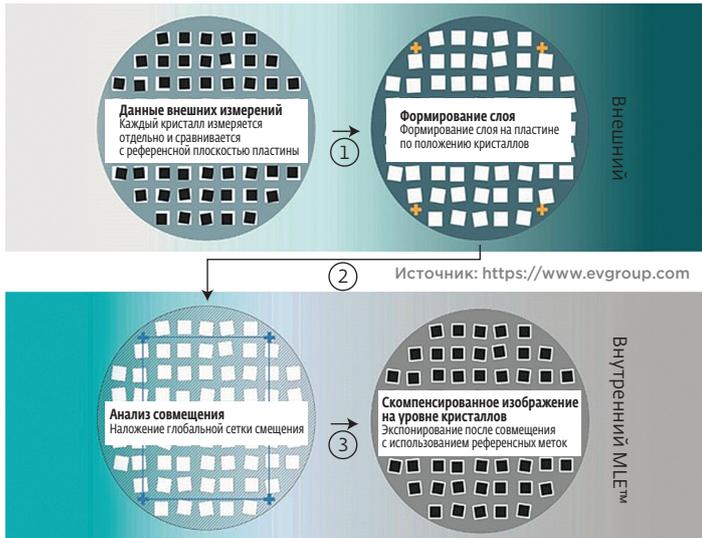
Современные литографические системы для процессов back-end не контролируют искажения с размером меньше, чем поле экспонирования, и поэтому сталкиваются с трудностями, связанными с нелинейными искажениями на подложках высокого порядка и проблемами, связанными со сдвигом кристалла, особенно после установки кристалла на пластину. Технология MLE™ использует режимы динамического совмещения с автоматической фокусировкой, чтобы адаптироваться к материалу подложки и изменению рельефа поверхности. Усовершенствованная функция устранения хроматических искажения связывает и анализирует данные в реальном времени из синхронизации совмещения верхней и нижней стороны пластины в видимом или ИК-диапазонах. Это достигается за счет активной компенсации погрешностей установки кристалла, вызванных такими факторами, как: вращение, смещение, расширение и искажения высокого порядка подложки. Последовательность



5  
Схематическое изображение верхнего и нижнего объективов совмещения

операций расширенной функции коррекции искажений и режимов динамического совмещения показана на рис 4. Динамическое совмещение включает в себя как глобальное, так и локальное (многоточечное) совмещение пластины, где обычно может быть до 16 отметок совмещения (отмечены синим и желтым). Размещаются эти метки в макете случайным образом, чтобы полностью покрыть наиболее критические области на пластине и компенсировать глобальные искажения. После измерения рассогласования векторы смещения дополнительно компилируются параллельно до того, как дизайн будет интерполирован и визуализирован в реальном времени. Таким образом, экспонируемые участки становятся полностью скомпенсированными, т.е. отсутствуют ошибки, не вызывая перекрывающихся или не проэкспонированных областей. Это обеспечивает минимальное рассовмещение без ущерба для производительности процесса формирования рисунка структур. На рис 4 также показан макет структур (темно-серый) с внесенными компенсациями аппаратным методом после анализа наихудшего случая смещения (обозначенного красными стрелками). Данный результат показан после компенсации фактического положения 16 меток (желтых) многоточечного совмещения в режиме динамического совмещения.

Совмещение по обратной стороне играет существенную роль, когда речь идет о сваренных непрозрачных пластинах – стека, полученного при помощи процесса бондинга, или непрозрачных материалах, используемых в многослойных и многокристальных структурах. Обращение к одной и той же структуре для нескольких экспозиций также помогает минимизировать несоответствие по мере увеличения плотности текущего рисунка. Ошибки наложения или несоосность любого рода влияют на электрические



6

Схема технологического процесса компенсации на уровне кристалла

свойства контактов и изоляции и могут вызвать сбои соединения, которые существенно влияют на выход годных, общую производительность и CoO. Системы, оснащенные технологией MLE™, обеспечивают полное совмещение по обратной стороне пластины (рис 5) с использованием специальных объективов с возможностью работы в ближнем ИК-диапазоне и специального держателя пластин, рассчитанного на размер пластины до 300 мм.

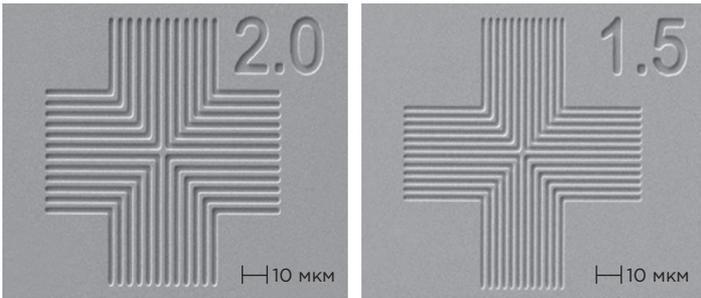
При рассмотрении ошибок, связанных с искажениями в кристалле, что типично для процессов FOWLP (Fan-out wafer-level package), расширенная функция устранения искажений должна также применяться на уровне самого кристалла, где результаты активной компенсации строго зависят от внешних метрологических данных. Алгоритмы компенсации искажений включают математическую коррекцию вращения, масштаба, сдвига и перемещения (смещения). Для компенсации ошибки смещения модель ограничивает искажения внутри кристалла внешними границами, которые обычно представлены двумя внешними точками совмещения на кристалле. Благодаря оперативности процесса преобразования генерация динамического двоичного изображения дополняет полученные извне метрологические данные каждого кристалла отдельно для каждой пластины непосредственно перед процессом экспонирования. Это делается для того, чтобы компенсировать ошибки наложения и позиционирования, вызванные обработкой или предварительной обработкой, исключая потенциальные тепловые воздействия. Схема упрощенного потока целостности данных компенсации на уровне кристалла показана на рис 6.

Также формирование рисунка структур при помощи технологии MLE™ позволяет в реальном времени создавать индивидуальные схемы размещения

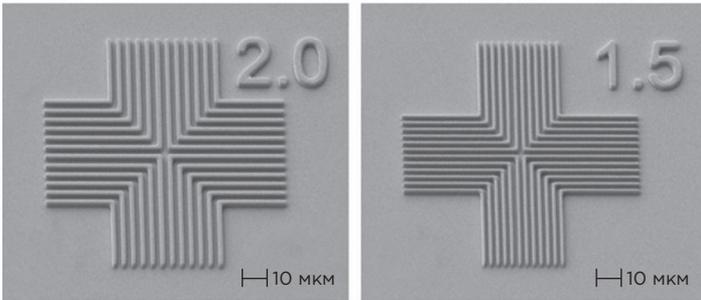
слоев в пластине и одновременно структурировать отдельные схемы кристаллов. В частности, фиксирование такой информации, как специальное описание кристаллов, серийные номера, функциональные и непосредственно читаемые коды шифрования или активное формирование рисунков структур для оптимизации группирования устройств и отслеживания процессов или устройств приводит к повышению общей производительности. Кроме того, программируемая модуляция дозы УФ-излучения на уровне субпикселей позволяет создавать градиенты экспозиции, приводящие к контролируемым изменениям уровня толщины резиста после процесса проявления, что также известно, как фотолитография в оттенках серого. Это облегчает изготовление сложных трехмерных многоуровневых рисунков в фоторезисте, которые применимы в нескольких процессах формирования структур: «дамаскинаж» (двойная насечка), устройствах МЭМС и микрооптических элементах, например, преломляющих и дифракционных. Цифровой программируемый макет, рисунок структур в слоях, кристалла/пластины может быть сохранен в различных стандартных форматах файлов промышленного проектирования (GDSII, Gerber, Oasis, ODB++ или BMP). Поскольку макет обрабатывается компьютером с контролем рецептов, ни тип резиста (положительный или отрицательный), ни уровень дозы экспонирования, ни сложность дизайна макета не влияют на скорость процесса формирования рисунка.

### Что может стать критически важным при использовании технологии безмасковой литографии в R&D и серийном производстве? Конечно же – модульная конструкция и точное позиционирование адресной сетки.

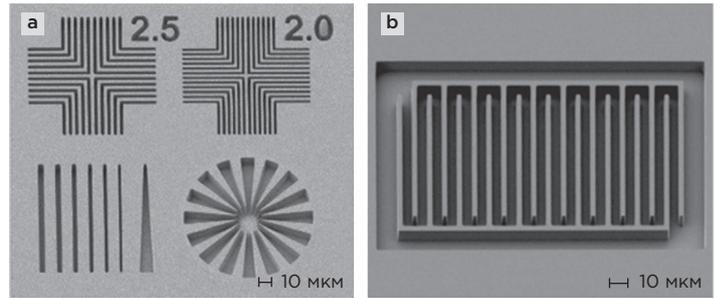
Технология MLE™ в основном предназначена для применения в процессах back-end. Точный контроль позволяет получить структуры, а также зазоры между ними <2 мкм при сохранении однородности критических размеров в пределах <10 % по пластине диаметром 300 мм. Для этого используется адресная сетка в 248 нм. Достигнутая точность, использование оптики без хроматических искажений и точность размещения рабочего столика обеспечивают формирование структур (проецирование) по всей подложке, причем без областей шивки. Процесс экспонирования может быть выполнен гибко с очень высокой степенью свободы в управлении интенсивностью излучения, а также с точной настройкой спектра источника света для достижения оптимального поглощения и надежной обработки для широкого ряда как коммерческих, так и новых фоторезистов. Источники УФ-излучения работают в спектре длин волн 375 нм и 405 нм, что позволяет сочетать и согласовывать длины волн для получения спектра излучения, сопоставимого с традиционным спектром ртутных ламп,



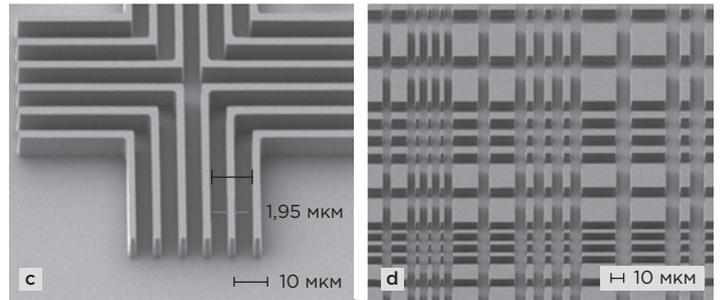
Источник: <https://www.evgroup.com>



**7**  
Результаты СЭМ-измерений. Тесты на возможности разрешения (линия/зазор) на положительном фоторезисте AZ MIR 701 толщиной 1 мкм (вверху). Тесты на возможности разрешения (линия/зазор) на отрицательном фоторезисте AZ nLOF толщиной 2 мкм (внизу)



Источник: <https://www.evgroup.com>



**8**  
СЭМ-изображения полученных структур на фоторезист TOK P-W1000T толщиной 8 мкм: (А) разрешение линия/зазор 2 мкм при толщине пленки 8 мкм, (В) разрешение линия/зазор 5 мкм с меандровым узором, (С) аспектное соотношение линия/зазор 1:2, (D) изменение параметров линия/зазор как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях с соотношениями 1:1, 1:2, 1:3, 1:4

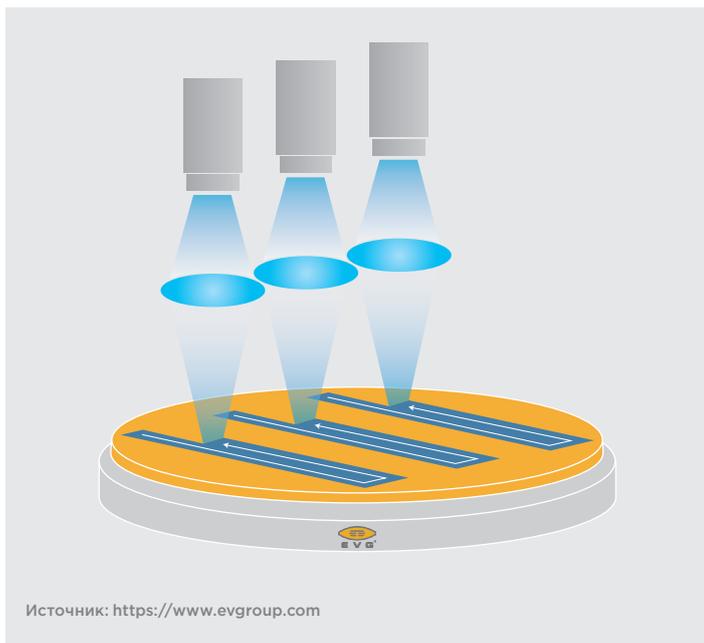
и адаптироваться к конкретным требованиям клиентов. Обе длины волны могут быть одновременно применены в любой произвольной последовательности и «смеси», что позволяет создавать рисунок на тонком фоторезисте как положительном, так и отрицательном, на полиимидных пленках, УФ-чувствительных диэлектриках, сухих пленочных фоторезистах и даже материалах, используемых при обработке печатных плат (фотоэмульсий). Также технология MLE™ поддерживает процесс экспонирования толстых слоев фоторезиста для получения структур с высоким аспектным соотношением сторон, которые обычно встречаются в корпусировании на уровне пластин, 3D-корпусировании, МЭМС, при создании структур в микрофлюидике и интегрированной фотонике. На рис 7 показана серия изображений (линия/зазор), полученных на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) на положительном фоторезисте AZ MIR 701 толщиной 1 мкм (два верхних изображения), а также результаты на возможности разрешения на отрицательном фоторезисте AZ nLOF толщиной 2 мкм (два нижних изображения). В обоих случаях получен результат в 1,5 мкм линия/зазор. Он был достигнут за счет дальнейшей оптимизации процесса, включающей уменьшение эффектов отражения от поверхности, чего можно добиться путем нанесения антиотражающих покрытий или изменения свойств материала подложки.

Технология MLE™ также может точно контролировать и регулировать глубину резкости (DoF),

чтобы добиться крутизны боковых стенок и таким образом сохранить желаемый трехмерный контур фоторезиста или предотвратить перекрытие кромок и опор. Большое рабочее расстояние и автоматический адаптивный фокус обеспечивают однородность рисунка по всей экспонируемой поверхности. Для создания конечных проводников в RDL часто используется фоторезист TOK P-W1000T, примеры обработки которого (СЭМ-изображения) показаны на рис 8. Данные примеры демонстрируют качество получения структур и формы боковых стенок: (А) разрешение линия/зазор 2 мкм при толщине пленки 8 мкм, (В) разрешение линия/зазор 5 мкм с меандровым узором, (С) аспектное соотношение линия/зазор 1:2, (D) изменение параметров линия/зазор как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях с соотношениями 1:1, 1:2, 1:3, 1:4.

**Масштабируемость – ключ к развитию современного производства? Ответ – да.**

Результаты литографических процессов, достигнутые во время проведения НИОКР с использованием оборудования для прямого лазерного экспонирования, не обладали технологической устойчивостью для переноса на линии для крупносерийного производства (HVM – high-volume-manufacturing). Сегодня полупроводниковая отрасль рассматривает увеличение ассортимента продукции, например, чиплетов и сегментированных кристаллов, как основную силу для развития и постоянного увеличения произво-



9

Уникальная кластерная конфигурация системы безмаскового экспонирования MLE™ позволяет легко добавлять экспонирующие (пишущие) головки для настройки производительности

дительности, а также разнообразия областей применения данной технологии. Для выполнения этих требований необходимо динамическое формирование рисунка на фоторезистах различной толщины и с разными дозами УФ-излучения. Технология MLE™ обеспечивает высокую глубину резкости при разрешении <math>< 2\text{ мкм}</math> в крупносерийном производстве, используя физический дифракционный предел, устанавливаемый оптикой. В то же время масштабируемость технологии MLE™ практически безгранична. Модульная система безмасковой литографии компании EVG позволяет масштабироваться в соответствии с потребностями в производительности заказчика. Это происходит за счет добавления УФ-экспонирующих

(пишущих) головок, как показано на рис 9, что обеспечивает быстрый и легкий переход от R&D к HVM. Данная технология дает оптимизацию производительности или адаптацию к различным размерам подложек и разного рода материалов как кремниевых, так и сложных составных полупроводников, при этом размер подложек может быть как стандартным, так и доходить до широкоформатных панелей.

### Что мы можем получить, применив совершенно новый подход к формированию рисунка структур, используемый в технологии MLE™?

Мы можем получить интеллектуальную и гибкую цифровую обработку, уникальную возможность масштабирования, отсутствие фотошаблонов, высокую производительность и универсальный инструмент для обработки различного рода материалов. Этот инструмент обеспечивает гарантированные характеристики по формированию рисунка независимо от типа и толщины фоторезиста. Благодаря гибкой, масштабируемой и надежной комбинации мощных УФ-лазерных источников с несколькими вариантами длины волны платформа позволяет создавать рисунки структур на самых разных материалах, таких как кремний, составные полупроводники, стекло, полимеры и даже выполнять обработку материалов внутри корпусов с заливкой, используя одну и ту же оптику. Специальный держатель пластин и система автофокусировки компенсируют любой изгиб и деформацию подложки, что особенно важно для таких приложений как FOWLP.

Практически неограниченная гибкость дизайна, которую технология привносит в текущую консервативную среду, открывает пространство для новых инноваций, помогает сократить циклы разработки и ликвидирует разрыв между R&D и HVM. 

В статье использованы материалы с сайта компании EV Group: <https://www.evgroup.com>.