

ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ БЕЗДЕФЕКТНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОШАБЛОНОВ

С.Аваков¹, д.т.н., Е.Дрогун¹, С.Карпович¹, д.т.н., Д.Титко¹, В.Шоломицкий¹
В.Овчинников², к.т.н

УДК 621.3.049.77
ВАК 05.27.06

В ОАО "КБТЭМ-ОМО" разработан и освоен в производстве комплект отечественного оптико-механического оборудования для изготовления фотошаблонов, применяемых в производстве ИМС уровня 350 нм. Завершена разработка комплекта уровня 90 нм. Интегрированный подход к созданию такого оборудования дает ряд преимуществ, обеспечивающих максимальную эффективность затрат. Полный комплект оборудования для серийного производства фотошаблонов под проектные нормы 350 нм используется в ЦКП "Проектирование и изготовление фотошаблонов" при Московском государственном институте электронной техники, в АО "НПП "Восток" (Новосибирск), ОАО "Интеграл" (Минск). На другие предприятия Российской Федерации и Беларуси поставлено несколько десятков разрозненных установок комплекта уровня 0,35 мкм, несколько установок направлено в дальнее зарубежье (Китай, Южная Корея). В настоящий момент начаты поставки оборудования уровня 90 нм.

В процессе формирования топологии интегральных микросхем (ИМС) на фотошаблонах создается базовый инструмент для кристалльного производства. Топология современной ИМС сложна и состоит из десятков и сотен миллионов элементов. Формирование за один цикл фотолитографии металлизированной маски на стеклянной или кварцевой подложке в точном соответствии с проектными данными для сложных топологий – практически невыполнимая задача. Этим обусловлена необходимость осуществления операций автоматического контроля топологии на соответ-

ствии проектным данным и устранения обнаруженных дефектов [1, 2]. В связи с этим появляется необходимость использования комплекта оборудования для, так называемого, бездефектного изготовления фотошаблонов, включающего наряду с генератором изображений две дополнительные установки – для автоматического контроля и устранения дефектов топологии. Соответственно, в технологический процесс вводятся еще две операции.

Первая операция – одна из самых дорогостоящих в процессе изготовления ИМС (стоимость установки американского производства, обеспечивающей технологический уровень 90 нм, превышает 10 млн. евро [3], а установки в отечественном исполнении – 2 млн. евро). Это оборудование, однако, быстро окупает себя, так как часто наличие лишь одного пропущенного дефекта в одном слое ИМС делает эту схему

¹ ОАО "КБТЭМ-ОМО", Минск E-mail: asm@kbttem-omo.by.

² ЦКП "Проектирование и изготовление фотошаблонов" при Московском государственном институте электронной техники, Зеленоград E-mail: ova@fotoshablons.ru.

неработоспособной, что и приводит к многомиллионным убыткам.

Устранение обнаруженных дефектов – не менее сложная задача, решение которой требует реализации двух дополнительных технологических процессов – испарения ненужных остатков маскирующего покрытия и осаждения металлоорганического вещества для устранения прозрачных дефектов. По мере увеличения количества исправляемых дефектов существенно повышается вероятность привнесения новых дефектов, что, в свою очередь, снижает процент выхода годных фотошаблонов. Количество исправляемых дефектов можно существенно уменьшить, если использовать пакет программ для моделирования последующих процессов фотолитографии при переносе изображения с фотошаблона на полупроводниковую (п/п) пластину, например пакет LAB [4, 5]. Применение системы моделирования позволяет перейти от концепции "обнаруживать и исправлять все дефекты" к концепции "обнаруживать все дефекты, а исправлять только те, которые при последующем переносе изображения на полупроводниковую пластину проработаются". Благодаря этому удается построить оптимальный в смысле выхода годных технологический процесс.

Процесс фотолитографии предъявляет к оборудованию, предназначенному для производства ИМС уровня от 350 до 90 нм, ряд требований (табл.1), хотя для определенных технологических условий они могут несколько отличаться от указанных в таблице.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОШАБЛОНОВ

Как известно, количество элементов ИС удваивается примерно каждые 18 месяцев [6], что является следствием уменьшения проектных норм и ведет к применению по всей технологической цепочке (прежде всего при фотолитографии) оборудования с более высоким разрешением оптических систем. Последнее достигается традиционным путем уменьшения длины волны экспонирующего излучения и увеличением числовой апертуры проекционного объектива. Однако более

высокое разрешение можно получить, уменьшая коэффициент K_1 в соотношении Рэлея для разрешения оптической системы [7] при тех же значениях длины волны экспонирующего излучения и числовой апертуры объектива. Уравнение Рэлея имеет вид:

$$R = \frac{\lambda}{NA} \times k_1,$$

где R – разрешение оптической системы; λ – длина волны экспонирующего излучения; NA – числовая апертура оптической системы; k_1 – коэффициент, определяющий технологический уровень компонентов системы.

Если $K_1 \geq 0,6$, то процесс фотолитографии можно выполнить с традиционными (бинарными) фотошаблонами, предусматривающими два вида изображения – темное и светлое. При его уменьшении требуемое разрешение удастся получить уже только при помощи фазосдвигающих элементов (PSM), повышающих контраст изображения, а также элементов коррекции оптической близости (OPC), улучшающих форму элементов топологии. При $K_1 \leq 0,4$ используются наиболее сложные технологии получения фазового сдвига, основанные на прецизионном травлении кварцевых подложек.

Формирование элементов OPC и PSM вместе с технологиями внеосевого освещения получило название техники повышения разрешения (Resolution Enhancement Technique). Фазосдвигающие элементы формируются либо путем изготовления полутонных фотошаблонов, обеспечивающих постоянный фазовый сдвиг на границах элементов топологии, либо с помощью шаблонов, где сдвиг достигается за счет второй фотолитографии с последующим травлением кварцевой подложки (для шаблонов с переменным фазовым сдвигом).

Введение таких элементов, особенно для фотошаблонов с переменным фазовым сдвигом, существенно усложняет и удорожает технологический процесс. Стоимость одного комплекта из 27 фотошаблонов уровня 90 нм, может достигать 1 млн. евро [8]. Необходимость изготовления фотошаблонов с использованием техники RET, особенно с переменным фазовым сдвигом,

Таблица 1. Требования к параметрам оборудования для различных проектных норм

Параметры оборудования	Проектная норма, нм					
	350	250	180	150	130	90
Кратность переноса изображения с фотошаблона на п/п пластину	4	4	4	4	4	4
Размер минимального элемента на фотошаблоне, нм	1400	1000	720	600	520	360
Минимальный размер обнаруживаемых дефектов, нм	500	300	270	200	170	120
Минимальный размер корректируемых структур, нм	600	400	320	260	240	200

накладывает определенные требования на оборудование. Так, генератор изображений должен быть оснащен системой совмещения, а установка автоматического контроля топологии – системой получения изображения с фазовым контрастом.

Если исходить из того, что на вход технологической линии поступают фотошаблонные заготовки с маскирующим и антиотражающим покрытием, с нанесенным слоем фоторезиста заданной толщины и неравномерности, то при изготовлении бинарных фотошаблонов можно выделить 11 основных операций.

Экспонирование фоторезиста – основная операция при изготовлении топологии ИС на фотошаблонах, в процессе которой в фоторезисте формируется так называемое скрытое изображение. Уровень и качество топологического рисунка в первую очередь определяются точностными параметрами генератора изображений. Размер минимального элемента генератора определяет уровень проектных норм для фотошаблонов. Для бинарных шаблонов (типа CoG – хром на стекле) проектная норма получается путем деления размера минимального элемента на кратность переноса изображения с фотошаблона на п/п пластину, которая обычно равна 4.

Проявление фоторезиста разрушает экспонированные области фотомаски и делает их доступными для химической реакции при выполнении следующей операции – травления. Для такого проявления используют специальные растворы, которые вымывают засвеченные области фоторезиста.

Травление хрома позволяет получить металлический рисунок на стеклянной или кварцевой подложке. Этот рисунок используется далее при выполнении операции фотолитографии на п/п пластине. В результате маскирующее покрытие в незащищенных фоторезистом местах вытравливается до кварцевой или стеклянной основы.

Операция снятия фоторезистивной маски – вспомогательная, но от качества ее выполнения также зависит успех операции в целом.

Операция измерения микrorазмеров сводится к измерениям ширины линии. Операция проводится выборочно для небольшого набора линий минимальной ширины (критических размеров) для данной проектной нормы. При этом контролируются три параметра, характеризующие адекватность воспроизведения размеров и качество процесса фотолитографии: точность, однородность и линейность размера, а также линейность сканирования. Точность размера – параметр, указывающий на соответствие сформированных на фотошаблоне размеров номинальному значению, поэтому для контроля этого параметра требуется метрологическое оборудование. Линейность размера – параметр,

определяющий, насколько меняется точность воспроизведения размера для различных номинальных значений. Однородность размера позволяет оценить, как меняется размер по полю фотошаблона. Линейность сканирования определяет точностные параметры системы растрового сканирования генератора изображений.

Контроль совмещаемости элементов различных слоев – вторая из двух операций, используемых для контроля качества оригиналов топологии на фотошаблонах. Как и измерение микrorазмеров, эта операция применяется выборочно и служит для отработки технологического процесса. Для измерения параметров используется специальное контрольно-измерительное оборудование.

Операция очистки поверхности фотошаблона выполняется для удаления пыли и грязи с рабочей поверхности фотошаблона. Она проводится на установке очистки и включает механическую и мегазвуковую очистку.

Контроль рисунка фотошаблона на соответствие проектным данным – основная операция контроля, выполняемая для всех фотошаблонов (100%-ный контроль) путем сравнения рисунка фотошаблона с проектными данными. Этот метод позволяет обнаруживать все типы дефектов в соответствии с классификацией SEMI. Контроль топологии проводится после операций травления и отмывки фотошаблона и повторяется после операции исправления дефектов. Заключительная операция контроля топологии выполняется после защиты фотомаски пленкой (пеликлом).

Устранение всех дефектов маскирующего покрытия проводится на лазерной установке, устраняющей прозрачные и непрозрачные дефекты. Последние ликвидируются испарением остатков маскирующего покрытия импульсным лазером, а первые – лазерно-стимулированным осаждением металлоорганического вещества из газообразной фазы.

Финишная отмывка фотошаблона обеспечивает удаление пыли и грязи с рабочей поверхности фотошаблона. Эта операция проводится на установке очистки и предусматривает механическую и мегазвуковую очистку.

Закрытие поверхности фотошаблона пеликлами и контроль на наличие дефектов на фотошаблоне и пеликле позволяет исключить попадание инородных частиц на поверхность фотошаблона при его эксплуатации.

КОМПЛЕКТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ФОТОШАБЛОНОВ УРОВНЕЙ 350 И 90 НМ

Освоенный в производстве отечественный комплект оборудования бездефектного изготовления

фотошаблонов уровня 350 нм состоит из многоканального лазерного генератора изображений ЭМ-5189-02, установки автоматического контроля топологии ЭМ-6329 и установки лазерного устранения дефектов ЭМ-5001Б (см. рисунок). Основные технические характеристики этого оборудования приведены в табл.2.

Завершена разработка и начаты поставки комплекта оборудования для производства фотошаблонов уровня 90 нм. В состав комплекта входят: многоканальный лазерный генератор изображений ЭМ-5589 с размером минимального элемента 350 нм, установка автоматического контроля топологии ЭМ-6729 с элементом

разложения изображения 65 нм и установка лазерного устранения дефектов структур размером до 200 нм с использованием фемтосекундного импульсного лазера ЭМ-5131. Основные характеристики оборудования приведены в табл.3. Этот комплект оборудования позволяет изготавливать фотошаблоны следующих типов:

- традиционные бинарные фотошаблоны;
- полутонные фотошаблоны, изготовленные, например, на основе комбинаций материалов Mo+Si или Cr+O₂+N;
- фотошаблоны с переменным фазовым сдвигом, изготовленные с помощью технологии травления кварца;

Таблица 2. Параметры оборудования для производства фотошаблонов уровня 350 нм

Многоканальный лазерный генератор изображений ЭМ-5189-02	
Размер минимального основного / вспомогательного элемента, нм	600/380
Возможность изготовления RET-фотошаблонов	OPC, PSM
Однородность размера, нм	40
Неровность края элементов топологии, нм	40
Совместимость комплекта фотошаблонов, нм	60
Время экспонирования участка 100×100 мм, мин	70
Размер рабочего поля в базовом исполнении (по заказу, до), мм	215×215 (300×300)
Установка контроля топологии фотошаблонов ЭМ-6329	
Размер элемента разложения изображения, нм	250, 500
Размер минимального обнаруживаемого дефекта с вероятностью 95%, нм	250, 500
Размер минимального обнаруживаемого дефекта с вероятностью 100%, нм	300, 600
Возможность контроля RET-фотошаблонов	OPC
Режим определения фотолитографической значимости дефектов	off-line (с системой LAB)
Время автоматического контроля участка 100×100 мм, мин	25 (15)
Размер рабочего поля в базовом исполнении (по заказу, до), мм	153×153 (до 600×900)
Совместимость по ведомости дефектов с установкой устранения дефектов	ЭМ-5001Б, ЭМ-6729 (с другими – по заказу)
Форматы проектных данных (для генератора изображений и установки контроля)	5×89, 5×09, GDS-II, 3600F, ZBA, MEVES и др.
Установка лазерного устранения дефектов ЭМ-5001Б	
Размер минимального исправляемого непрозрачного / прозрачного дефекта, нм	500/500
Возможность исправления дефектов на RET-фотошаблонах	CoG, OPC
Воспроизводимость процедуры наведения на дефект, нм	100
Дискретность изменения размера, нм	100
Размер рабочего поля в базовом исполнении (по заказу, до), мм	153×153 (900×600)
Совместимость по формату ведомости дефектов с установкой контроля топологии	ЭМ-6029Б и ЭМ6329 (другие – по заказу)

Таблица 3. Параметры оборудования для производства фотошаблонов по технологии 90 нм

Многоканальный лазерный генератор изображений на фотошаблонах ЭМ-5589	
Размер минимального основного / вспомогательного элемента, нм	350/200
Возможность изготовления RET шаблонов	OPC, PSM
Однородность размера, нм	30
Неровность края элементов топологии, нм	30
Совмещаемость комплекта фотошаблонов, нм	25
Время экспонирования участка 100×100 мм, мин	90
Размер рабочего поля в базовом исполнении (по заказу, до), мм	215×215 (900×600)
Установка контроля топологии фотошаблонов ЭМ-6729	
Размер элемента разложения изображения, нм	65, 130
Размер минимального обнаруживаемого дефекта с вероятностью 95%, нм	90, 180
Размер минимального обнаруживаемого дефекта с вероятностью 100%, нм	110, 220
Возможность контроля RET-шаблонов	OPC, PSM
Режим определения фотолитографической значимости дефектов	имеется
Время автоматического контроля участка 100×100 мм, мин	90
Размер рабочего поля в базовом исполнении (по заказу, до), мм	153×153 (900×600)
Совместимость по формату ведомости дефектов с установкой устранения дефектов	ЭМ-5001Б, ЭМ-5131 (другие – по заказу)
Форматы проектных данных (для генератора изображений и установки контроля)	5×89, 5×09, GDS-II, 3600F, ZBA, MEBES и др. по заказу
Установка лазерного устранения дефектов ЭМ-5131	
Размер минимального исправляемого непрозрачного / прозрачного дефекта, нм	200/350
Воспроизводимость процедуры наведения на дефект, нм	50
Дискретность изменения размера, нм	50
Размер рабочего поля в базовом исполнении (по заказу, до), мм	165×165 (900×600)
Совместимость по формату ведомости дефектов с установкой контроля топологии	ЭМ-6329, ЭМ-6729 (с другими – по заказу)

- фотошаблоны с элементами OPC с размерами, меньшими, чем разрешение установки совмещения и мультипликации, используемой для переноса изображения с фотошаблона на п/п пластину.

Одно из важных преимуществ отечественного оборудования – обеспечение технологической безопасности процесса изготовления топологии ИМС, что позволяет гарантировать отсутствие преднамеренных искажений топологической информации, вызванных, например, закладкой структур, активируемых при определенных условиях. Этот аспект

наиболее важен при изготовлении ИМС специального применения.

Для лучшей совместимости и эффективности работы все установки спроектированы как единый комплекс, что обеспечивает ряд преимуществ.

Во-первых, достигнута полная совместимость координатных систем установок комплекса за счет реализации единых алгоритмов управления перемещениями координатного стола, использования однотипных линейных шаговых двигателей и интерферометрических датчиков линейных перемещений, реализации



Комплект оборудования для изготовления фотошаблонов уровня 350 нм

единых подходов к построению алгоритмов компенсации погрешностей координатных систем, что в целом улучшает воспроизводимость обработки перемещений на различных установках. В свою очередь это позволяет существенно уменьшить количество ложных дефектов при контроле на соответствие проектным данным, вызванных отклонением траекторий координатных столов генератора изображений и установки контроля топологии от заданных, что повышает достоверность контроля. Появляется возможность более точного выхода в зону исправляемых дефектов при ремонте маски фотошаблона.

Во-вторых, реализована единая система преобразования проектных данных для генератора изображений и установки контроля топологии при построении искусственного изображения. Система включает единую подсистему формирования припусков на размеры элементов топологии. Совместимость проектных данных генераторов изображений и установки контроля топологии реализуется на уровне не только форматов данных, но и алгоритмов обработки (например, алгоритмов округления координат элементов и формирования огибающих контуров). Генератор изображений и установка контроля топологии оснащаются однотипными системами векторно-растрового преобразования, позволяющими переходить при проектировании от абстрактных координат к площадным объектам, что существенно уменьшает число ложных дефектов при контроле топологии.

Следует отметить, что представленное оборудование упрощает процедуру технического обслуживания установок благодаря модульному принципу построения и единой системе тестирования оборудования, что приводит к существенному уменьшению стоимости владения.

* * *

Разработан и освоен в производстве комплект отечественного оптико-механического оборудования,

обеспечивающий изготовление фотошаблонов для производства ИМС уровня 350 нм. Завершена разработка и начаты поставки комплекта уровня 90 нм. Интегрированный подход к созданию такого оборудования дает ряд преимуществ, обеспечивающих максимальную эффективность затрат.

Подробную информацию можно получить, посетив сайт www.kb-omo.by или позвонив по телефону (37517) 226 03 63.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Avakaw S.** High productivity object-oriented defect detection algorithms for the new modular die-to-database reticle inspection platform // SPIE. 2005. V.5835. P.290–299.
2. **Avakaw S.M., Iouditski V.A., Pushkin L.V., Tsitko A.A..** A complete set of the special process equipment for the defect-free production of reticles // SPIE. 2007. V. 6533. P. 65331B1–65331B9.
3. **Broadbent W. et al.** Results from a new die-to-database reticle inspection platform // Proc. of SPIE. 2007. V.6518. P.651821.
4. **Avakaw S., Korneliuk A., Tsitko A.** A prospective modular platform of the mask pattern automatic inspection using the die-to-database method // SPIE. 2005. V.5853. P.965–976.
5. **Ulrich Hofmann, Nezih Uenal** (GeniSys GmbH, Germany), **Ralph Zoberbier** (SUSS MicroTec Lithography, Germany), **Ton Nellissen** (Philips Research, Netherlands). 3D Topography Mask Aligner Lithography Simulation // SUSS Report 01/2013.
6. **Moore, Gordon E.** No Exponential is Forever: But "Forever" Can Be Delayed! // International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). 2003. SESSION 1. PLENARY 1.1.
7. **Kwok-Kit Wong A.** Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography // SPIE Press. USA. 2001. 213p.
8. **Behringer U.** Foreword of the 19th European Mask Conference on Mask Technology for IC and Micro-Components // GMM-Conf., Jan. 13–15. 2003. Sonthofen. Germany. P.1–2.