

ПРИМЕНЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПЛАНАРНЫХ СТРУКТУР В ПРОИЗВОДСТВЕ ОРИГИНАЛОВ ТОПОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ФОТОШАБЛОНАХ

*Лауреат Государственной премии Республики Беларусь,
канд. техн. наук АВАКОВ С. М.*

*Научно-производственное республиканское унитарное предприятие
«КБТЭМ-ОМО» ГНПО «Планар»*

Процесс формирования оригиналов топологии интегральных схем на фотошаблонах в точном соответствии с проектными данными является основой кристалльного производства. Выполнение подобной операции за один цикл фотолитографии на генераторе изображений представляет собой неразрешимую задачу. Поэтому неотъемлемой частью технологического процесса изготовления фотошаблонов являются операция автоматического контроля топологии на соответствие проектным данным, а также операция устранения обнаруженных дефектов. Операция автоматического контроля топологии – одна из самых дорогостоящих во всем технологическом процессе изготовления интегральных схем (стоимость оборудования, необходимого для выполнения этой операции, может превышать 20 млн дол.) [1]. В то же время подобное оборудование быстро окупает себя, так как наличие только одного пропущенного дефекта в одном слое интегральной схемы делает ее неработоспособной и соответственно приводит к многомиллионным убыткам. Оборудование для устранения дефектов топологии также является достаточно дорогостоящим, особенно при использовании технологии раздельного устранения прозрачных и непрозрачных дефектов. Возможность существенного уменьшения количества исправляемых дефектов появляется при применении так называемого «виртуального степпера» (пакета программ для моделирования процессов фотолитографии при проекционном переносе изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину) [2, 3]. В этом случае на смену технологии «обнаруживать все дефекты – исправлять все дефекты» приходит технология «обнаруживать

все дефекты – исправлять те дефекты, которые проработаются при последующем проекционном переносе на пластину».

Требования фотолитографии. В табл. 1 приводятся требования фотолитографии, предъявляемые к оборудованию для производства оригиналов топологии на фотошаблонах, предназначенному для производства интегральных схем, разработанных с проектными нормами от 0,35 мкм до 90 нм. Эти требования могут отличаться для различных предприятий, однако в среднем они соответствуют приведенным данным.

Таблица 1

**Требования к точностным параметрам
оборудования для различных проектных норм**

Проектная норма, нм	350	250	180	150	130	90
Кратность проекционного переноса изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину	4	4	4	4	4	4
Размер минимального основного элемента на фотошаблоне, мкм	1,4	1,0	0,72	0,6	0,52	0,36
Размер минимального элемента ОРС на фотошаблоне, нм	600	400	280	240	200	140
Линейность размера изолированной линии, нм	40	30	25	20	15	10
Линейность размера линии в структуре линия/промежутки, нм	60	45	30	25	20	15
Линейность сканирования, нм	60	45	30	25	20	15
Точность размера, нм	40	30	25	20	15	10
Минимальный размер обнаруживаемых дефектов, нм	600	400	280	200	150	125
Минимальный размер исправляемых дефектов, нм	600	500	280	240	200	140

Основные технологические операции в процессе изготовления фотошаблонов. В микроэлектронике имеет место постоянный процесс уменьшения проектных норм, используемых при создании интегральных схем. При этом основополагающим является использование по всей технологической цепочке кристалльного производства, прежде всего, на операциях фотолитографии, оборудования с более высоким разрешением оптических систем. Постоянный процесс улучшения разрешающей способности оптических систем приводит, в свою очередь, к уменьшению значения коэффициента K_1 в формуле Рэлея для разрешения оптической системы [4], так как работа с меньшими значениями коэффициента K_1 позволяет иметь более высокое разрешение оптической системы при одних и тех же значениях длины волны экспонирующего излучения и числовой апертуры объектива, используемых в процессе фотолитографии. При значении этого коэффициента 0,5 и более процесс фотолитографии может быть выполнен при помощи традиционных, так называемых бинарных фотошаблонов, имеющих только два вида изображения – темное и светлое. При уменьшении значения этого коэффициента требуемое разрешение удается получить только при помощи элементов коррекции оптической близости (ОПС), обеспечивающих улучшение формы элементов топологии, а также при помощи фазосдвигающих элементов (PSM), обеспечивающих повышение контраста изображения. При значениях коэффициента $K_1 = 0,4$ и менее наличие элементов ОПС и PSM является обязательным [4]. Фазосдвигающие элементы формируются либо при помощи использования так называемых полутонных фотошаблонов, обеспечивающих постоянный фазовый сдвиг на границах элементов топологии, либо при помощи фотошаблонов, на которых фазовый сдвиг достигается путем выполнения второй фотолитографии с последующим травлением кварцевой подложки (для фотошаблонов с переменным фазовым сдвигом). Введение фазосдвигающих элементов, особенно при изготовлении фотошаблонов с переменным фазовым сдвигом, существенно усложняет технологический процесс изготовления фотошаблонов и соответственно ведет к его удорожанию. Стоимость одного такого

комплекта из 27 фотошаблонов для технологии 90 нм, например, может достигать 1,623 млн дол. [5]. Необходимость изготовления фазосдвигающих фотошаблонов, особенно с переменным фазовым сдвигом, вызывает определенные требования к технологическому оборудованию. Так, генератор изображений должен быть оснащен системой совмещения, а установка автоматического контроля топологии – системой получения изображения в режиме фазового контраста.

В процессе изготовления бинарных фотошаблонов можно выделить от 11 до 17 основных операций, которые являются базовыми. Ниже описаны основные из них.

1. Экспонирование фоторезиста является основной операцией в процессе изготовления оригиналов топологии интегральных схем на фотошаблонах. Уровень и качество изготовления топологического рисунка определяются точностными параметрами генератора изображений. Размер минимального элемента генератора изображений определяет предельный уровень проектных норм. Для бинарных фотошаблонов величина проектной нормы может быть определена путем простого деления размера минимального элемента генератора изображений на кратность последующего переноса изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину. В большинстве случаев кратность проекционного переноса равна четырем (хотя на многих предприятиях еще используют пятикратные степперы). Таким образом, для генератора ЭМ-5189 (табл. 1) предельный уровень проектных норм может быть $0,6 \text{ мкм} : 4 = 0,15 \text{ мкм}$, а для генератора ЭМ-5389 – $0,2 : 4 = 0,05 \text{ мкм}$.

2. Проявление фоторезиста позволяет разрушить проэкспонированные области фотомаски и соответственно сделать их доступными для выполнения следующей операции – операции травления.

3. Травление хрома позволяет получить металлический рисунок на стеклянной или кварцевой подложке. В результате маскирующее покрытие в незащищенных фоторезистом местах вытравливается до стеклянной или кварцевой основы.

4. Операция снятия фоторезистивной маски является вспомогательной операцией, но от ка-

чества ее выполнения зависит качество получаемого рисунка. Снятие фоторезиста осуществляется при помощи специальных химических растворов либо на специальном плазмохимическом оборудовании.

5. Операция измерения микrorазмеров сводится к измерению ширины линии. Эти измерения проводят выборочно для небольшого набора линий минимальной ширины (так называемых критических размеров) для данной проектной нормы. Как правило, контролируются три параметра, характеризующих адекватность воспроизведения размеров и качество процесса фотолитографии:

- точность размера;
- линейность размера;
- линейность сканирования.

Точность размера – параметр, характеризующий метрологическое соответствие сформированных на фотошаблоне размеров. Поэтому для контроля этого параметра требуется метрологическое оборудование. Линейность размера – параметр, определяющий, насколько меняется точность воспроизведения размера для различных значений размера. Линейность сканирования определяет, как изменяется точность критического размера на разных участках рабочего поля. В принципе эти два параметра можно контролировать на том же оборудовании, на котором контролируется точность размера, но удобнее, быстрее и полнее это можно сделать при помощи специального программного пакета для измерения интегральных точностных характеристик топологии на установке автоматического контроля топологии.

6. Измерение величины рассовмещения элементов топологии является второй из двух метрологических операций, используемых для контроля качества оригиналов топологии на фотошаблонах. Как и операция измерения микrorазмеров, она используется выборочно и служит для отработки технологического процесса.

7. Операция очистки поверхности фотошаблона позволяет удалить частицы пыли и грязи с рабочей поверхности фотошаблона. Очистка фотошаблона производится на специальном оборудовании, которое может включать в себя механическую и мегазвукую очистку.

8. Контроль топологического рисунка фотошаблона на соответствие проектным данным является основной операцией контроля, кото-

рая выполняется для всех фотошаблонов без исключения (100%-й контроль). Как правило, используется метод сравнения топологического рисунка фотошаблона с проектными данными, так как только этот метод позволяет обнаруживать все типы дефектов согласно классификации SEMI. Контроль топологии производится после операций травления и отмывки фотошаблона и повторяется после операции исправления дефектов, которая носит итеративный характер. Заключительная операция контроля топологии производится после защиты фотомайки защитной пленкой (пеликлом).

9. Устранение всех недопустимых дефектов маскирующего покрытия осуществляется при помощи установки лазерного устранения дефектов фотошаблонов, позволяющей устранять как прозрачные, так и непрозрачные дефекты. Непрозрачные дефекты устраняются путем испарения остатков маскирующего покрытия при помощи импульсного лазера, а прозрачные – путем лазерно-стимулированного осаждения металлоорганического соединения из газовой фазы.

10. Финишная отмывка фотошаблона производится аналогично операции 6.

11. Закрытие поверхности фотошаблона пеликлом осуществляется с целью исключения попадания инородных частиц на поверхность фотошаблона в процессе его дальнейшей эксплуатации.

В случае применения техники RET (Reticle Enhancement Technique – техники увеличения разрешения) [4] ситуация меняется. К технике RET относятся: применение внеосевого освещения при проекционном переносе изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину; внесение в топологию элементов коррекции оптической близости; использование фазосдвигающих элементов. Методы, основанные на использовании внеосевого освещения, не затрагивают технологию изготовления фотошаблонов. Элементы OPC и PSM (вспомогательные элементы), включаемые в изображение оригиналов топологии для коррекции формы элементов, имеют размер, меньший разрешения оптической системы мультипликатора, и не прорабатываются его оптикой, а только оказывают косвенное влияние на основные элементы. Размеры вспомогательных элементов могут составлять половину или одну треть проектной нормы. С учетом этого обстоя-

тельства генератор с минимальным элементом 0,6 мкм позволит работать с проектными нормами от $0,15 \cdot 2 = 0,3$ мкм до $0,15 \cdot 3 = 0,45$ мкм. С учетом параметра размер вспомогательного элемента, равного 400 нм, для данного генератора можно уверенно говорить о возможности работы с проектными нормами 0,35 мкм. Для генератора с минимальным элементом 0,2 мкм соответственно можно получить от $0,05 \cdot 2 = 0,10$ мкм до $0,05 \cdot 3 = 0,15$ мкм и с учетом размера вспомогательного элемента 150 нм возможность работы с нормами – до 90 нм.

Комплекты оптико-механического оборудования для производства оригиналов топологии фотошаблонов уровня 0,35 мкм и 0,90 мкм. Комплект оптико-механического спецтехнологического оборудования для бездефектного производства фотошаблонов, состоящий из генератора изображений, установки

автоматического контроля топологии и установки устранения дефектов топологии, представляет собой основу технологической цепочки в производстве фотошаблонов и определяет технологический уровень этого производства. Освоенный в настоящее время в производстве комплект оптико-механического оборудования, обеспечивающий бездефектное изготовление фотошаблонов технологического уровня 0,35 мкм, состоит из многоканального лазерного генератора изображений ЭМ-5189, установок автоматического контроля топологии ЭМ-6329 и лазерного устранения дефектов ЭМ-5001Б. Основные технические характеристики этого оборудования приведены в табл. 2. Данный комплект обеспечивает возможность изготовления оригиналов топологии на фотошаблонах, предназначенных для изготовления интегральных схем, разработанных с проектными нормами 0,35 мкм.

Таблица 2

Комплект оборудования для бездефектного производства фотошаблонов уровня 0,35 км

Многоканальный лазерный генератор изображений на фотошаблонах ЭМ-5189	
Размер минимального основного элемента, нм	600
Размер минимального вспомогательного элемента, нм	400
Возможность изготовления RET-фотошаблонов	CoG, OPC, EPSM, AltPSM
Однородность размера, нм	40
Неровность края элементов топологии, нм	40
Линейность сканирования, нм	40
Совместимость комплекта фотошаблонов, нм	60
Совместимость второго слоя, нм	75
Время экспонирования участка 100×100 мм, мин	70
Размер рабочего поля, мм	215×215
Возможность увеличения размера рабочего поля (па заказу), мм	300×300
Установка автоматического контроля топологии фотошаблонов ЭМ-6329 (ЭМ-6029Б)	
Способность обнаружения изолированных дефектов ($P = 0,95$), мкм	0,20; 0,40 (0,40; 0,80)
Способность обнаружения изолированных дефектов ($P = 1,00$), мкм	0,25; 0,50 (0,50; 1,00)
Способность обнаружения прилегающих дефектов ($P = 0,95$), мкм	0,25; 0,50 (0,50; 1,00)
Способность обнаружения прилегающих дефектов ($P = 1,00$), мкм	0,30; 0,60 (0,60; 1,20)
Размер элемента разложения изображения, нм	0,25; 0,50 (0,50; 1,00)
Режим определения фотолито-графической значимости дефектов	off-line, SigmaC
Время автоматического контроля участка 100×100 мм, мин	25 (35)
Размер рабочего поля, мм	153×153
Возможность увеличения размера рабочего поля по заказу, мм	900×600
Форматы проектных данных	5x89, 5x09, GDS-II, ZBA 3600F, и др.
Установка лазерного устранения дефектов ЭМ-5001Б	
Размер минимального исправляемого прозрачного дефекта, мкм	0,50
Размер минимального исправляемого непрозрачного дефекта, мкм	0,50
Возможность исправления дефектов на RET-фотошаблонах	CoG, OPC
Воспроизводимость процедуры наведения на дефект, мкм	0,10
Дискретность размера, мкм	0,10
Размер рабочего поля в базовом исполнении, мм	153×153
Возможность увеличения размера рабочего поля по заказу, мм	900×600

В настоящее время в стадии создания находится второй комплект оптико-механического оборудования уровня 90 нм [6], состоящий из многоканального лазерного генератора изображений ЭМ-5389 с размером минимального элемента 0,2 мкм, установки автоматического контроля топологии ЭМ-6729, имеющей обнаружительную способность 65 нм, и установки лазерного устранения дефектов ЭМ-5131, построенной на базе фемтосекундного импульсного лазера и обеспечивающей устранение дефектов размером до 0,2 мкм. Основные технические характеристики этого оборудования приведены в табл. 3. Представленный комплект оборудования обеспечит возможность изготовления фотошаблонов практически всех существующих типов:

- традиционные бинарные фотошаблоны – (CoG – Chromium on Glass – хром на стекле);
- полутонные фотошаблоны (EPSM – Embedded PSM), изготовленные, например, из таких комбинаций материалов, как molybdenium + silicon или chromium + oxygen + nitrogen;
- фотошаблоны с переменным фазовым сдвигом, изготовленные с использованием технологии травления кварца (AltPSM – Alternating PSM);
- фотошаблоны с элементами OPC – jogs, serifs, SRAF (Sub-resolution Assist Features) и другими дополнительными элементами с размерами меньшими, чем разрешение установки совмещения и мультипликации, используемой для дальнейшего проекционного переноса изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину.

Таблица 3

Комплект оборудования для бездефектного производства фотошаблонов уровня 90 нм

Многоканальный лазерный генератор изображений на фотошаблонах ЭМ-5389Б	
Размер минимального основного элемента, нм	200
Размер минимального вспомогательного элемента, нм	150
Возможность изготовления RET-фотошаблонов	CoG, OPC, EPSM, AltPSM
Однородность размера, нм	30
Неровность края элементов топологии, нм	30
Однородность сканирования, нм	30
Совмещаемость комплекта фотошаблонов, нм	50
Совмещаемость второго слоя, нм	65
Время экспонирования участка 100×100 мм, мин	90
Размер рабочего поля, мм	215×215
Возможность увеличения размера рабочего поля, мм	300×300
Установка автоматического контроля топологии фотошаблонов ЭМ-6729Б	
Способность обнаружения изолированных дефектов ($P = 0,95$), нм	200, 120, 65, 50
Способность обнаружения изолированных дефектов ($P = 1,00$), нм	250, 150, 90, 65
Способность обнаружения прилегающих дефектов ($P = 0,95$), нм	250, 150, 90, 65
Способность обнаружения прилегающих дефектов ($P = 1,00$), нм	350, 200, 110, 90
Размер пикселя, нм	250, 150, 90, 65
Возможность контроля RET-фотошаблонов	CoG, OPC, EPSM, AltPSM
Режим определения фотолито-графической значимости дефектов	on-line
Время автоматического контроля участка 100×100 мм, мин	70
Размер рабочего поля, мм	153×153
Форматы проектных данных	5x89, 5x09, GDS-II, ZBA 3600F и др.
Возможность увеличения размера рабочего поля, мм	900×600
Установка лазерного устранения дефектов ЭМ-5131Б	
Размер минимального исправляемого прозрачного дефекта, нм	200
Размер минимального исправляемого непрозрачного, дефекта, нм	200
Возможность исправления дефектов на RET-фотошаблонах	CoG, OPC, EPSM, AltPSM
Воспроизводимость процедуры наведения на дефект, нм	50
Дискретность размера, нм	50
Размер рабочего поля, мм	153×153
Возможность увеличения размера рабочего поля, мм	900×600

Для обеспечения наилучшей совместимости и эффективности работы все три установки спроектированы как единый комплекс, что дает ряд преимуществ для пользователя.

1. Возможность получения более полной совместимости координатных систем установок комплекса. Эта совместимость достигается за счет применения однотипных интерферометров, а также реализации аналогичных алгоритмов управления перемещениями координатного стола. Все три установки построены по единой схеме на базе линейных шаговых двигателей. В цепи обратной связи применяются однотипные интерферометрические датчики линейных перемещений, построенные на базе двухчастотных лазеров. Все это позволяет при автоматическом контроле топологии существенно сократить количество ложных ошибок, возникающих за счет отклонения траекторий перемещений координатных столов генератора изображений и установки автоматического контроля топологии, и тем самым повысить достоверность контроля. Также появляется возможность более точного выхода в зону дефектов при их устранении, что упрощает процедуру ремонта металлизированной маски фотошаблона. При этом обеспечивается возможность реализации единых подходов к построению алгоритмов компенсации погрешностей координатных систем. К ним относятся погрешности, связанные с изменениями окружающей среды, с локальными неравномерностями шаблонов, с разбросом параметров при изготовлении составных частей координатных систем. В качестве иллюстрации этого тезиса рис. 1 показывает появление дополнительной инструментальной погрешности при алгоритмах компенсации неперпендикулярности с различным шагом измерения знаков. Таким образом, при помощи единого подхода к построению систем компенсации погрешностей можно получить более высокую идентичность траектории движения при отработке перемещений на различных установках технологической цепочки.

2. Возможность создания единой системы преобразования проектных данных при построения искусственного изображения для генератора изображений и установки автоматического контроля топологии. Эта система включает в себя единую систему технологических припусков на размеры элементов топологии. Совместимость по проектным данным между генератором изображений, с одной стороны, и установкой автоматического контроля топологии, с другой стороны, реализуется на уровне

не только форматов данных, но и внутренних алгоритмов обработки.

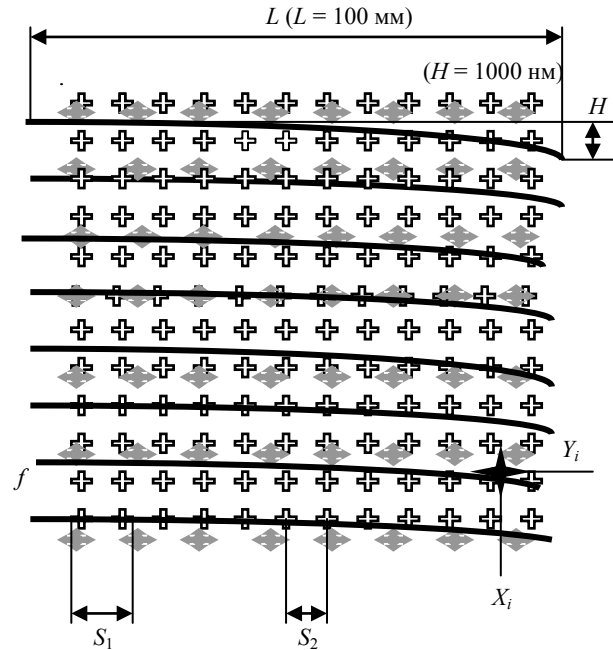


Рис. 1. Погрешность при компенсации нелинейной неперпендикулярности координатных систем: L – размер рабочего поля; f – функция неперпендикулярности; H – максимальное рассогласование; S_1, S_2 – шаг измерения координат в процессе аттестации; d_1, d_2 – поправки на неперпендикулярность; ΔX_i^{\max} – возможные отличия координат траектории движения;

$$S_1 = 12,5 \text{ мм} \quad S_2 = 8,5 \text{ мм}$$

$$\{S_1, d_1 = \Delta H_1 / \Delta L_1\}; \{S_2, d_2 = \Delta H_2 / \Delta L_2\}$$

$$d_1 = 80 \text{ нм} / 12,5 \text{ мм}; \quad d_2 = 118 \text{ нм} / 8,5 \text{ мм}$$

$$\Delta X_i^{\max} = X_i^1 - X_i^2 = 10-15 \text{ нм}$$

Это касается, например, алгоритмов округления координат элементов, алгоритмов формирования огибающих контуров и т. д. На рис. 2 в качестве примера показана двухкоординатная бинарная модель изображения. Видно, что при формировании диагонального размера возможны ситуации, при которых переход от векторного к растровому представлению происходит неоднозначно. Комплексный подход позволяет исключить подобные ситуации. Поставляемые комплектно генератор изображений и установка автоматического контроля топологии оснащаются однотипными системами векторно-растрового преобразования, что позволяет однозначно производить переход от абстрактных координат системы проектирования к представлению площадных объектов в оборудовании, что в конечном счете позволяет избавиться от большой группы ложных дефектов при автоматическом контроле топологии.

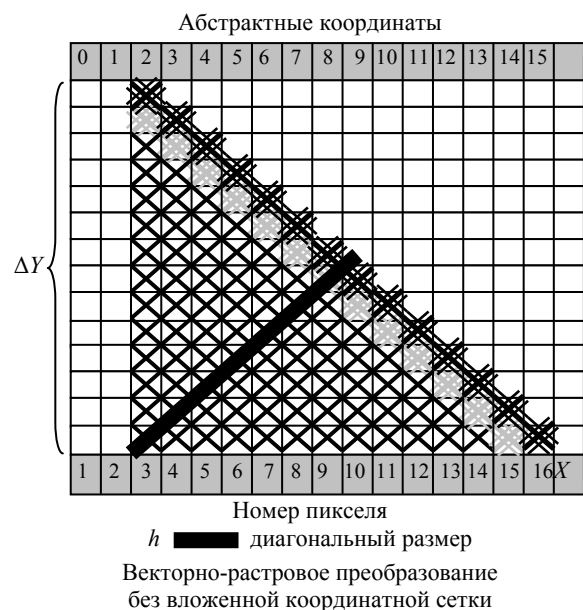
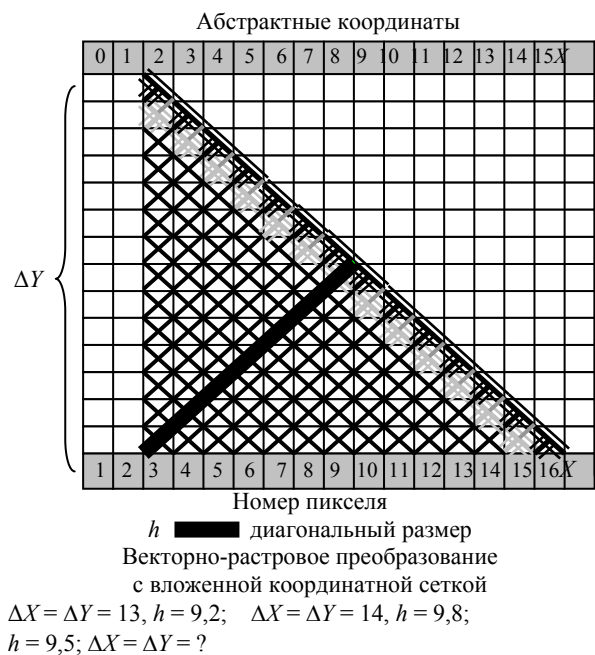


Рис. 2. Варианты формирования диагонального размера при векторно-растровом преобразовании с вложенной координатной сеткой и без нее

3. Возможность гибкого проведения изменений форматов данных о дефектах для установок автоматического контроля и ремонта фотошаблонов и возможность представления координат дефектов с единой точкой отсчета.

4. Возможность разработки систем управления на единой элементной базе. Для всех трех установок используется большое количество идентичных компонентов, в частности:

- модули усилителей мощности приводов;
- модули управления координатной системой;
- фотоприемники;

- интерферометры;
- модули формирования эталонного (искусственного) изображения;
- комплекты принадлежностей и запасных частей.

5. Возможность разработки общих интерфейсов и библиотек программного обеспечения.

6. Снижение стоимости разработки и изготовления оборудования вследствие унификации систем управления и программного обеспечения, а также узлов оптико-механических устройств.

ВЫВОДЫ

1. Создан и освоен в производстве комплект оптико-механического оборудования, обеспечивающий возможность изготовления фотошаблонов, предназначенных для производства интегральных схем, разработанных с проектными нормами до 0,35 мкм.

2. В стадии создания находится второй комплект оптико-механического оборудования, который обеспечит возможность изготовления фотошаблонов уровня 90 нм.

3. Интегрированный подход к созданию комплекта оптико-механического оборудования предоставляет ряд дополнительных технических, эксплуатационных и экономических преимуществ, обеспечивающих максимальный уровень эффективности работы оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Results** from a new die-to-database reticle inspection platform / W. Broadbent [et al.] // Metrology, Inspection and Process Control for Microlithography XXI, Chas N. Archie, Ed., Proc. of SPIE, Vol. 6518: P. 651821, 2007. – P. 1–14.
2. **Avakaw, S.** High productivity object-oriented defect detection algorithms for the new modular die-to-database reticle inspection platform / S. Avakaw // SPIE. – 2005. – Jun. – V. 5835. – P. 290–299.
3. **Avakaw, S.** A prospective modular platform of the mask pattern automatic inspection using the die-to-database method / S. Avakaw, A. Korneliuk, A. Tsitko // SPIE. – 2005. – Jun. – V. 5853. – P. 965–976.
4. **Kwok-Kit Wong Alfred.** Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography / Alfred Kwok-Kit Wong // SPIE PRESS, USA. – 2001. – P. 1–213.
5. **Behringer Uwe.** Foreword of the 19th European Mask Conference on Mask Technology for Integrated Circuits and Micro-Components. Lectures held at the GMM-Conference. January 13–15, 2003 in Sonthofen / Uwe Behringer. – Germany. – P. 1–2.
6. **A complete** set of the special process equipment for the defect-free production of reticles. The 23rd European Mask and Lithography Conference EMLC-2007 January 22–25, 2007 / S. Avakaw [et al.]. – Grenoble, France, 2007. – P. 29–30.

Поступила 19.09.2007