

КОНТРОЛЬ МИКРОРАЗМЕРОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИС

ЗАДАЧИ И ОСОБЕННОСТИ

Г.Трапашко tga@kbtem-omo.com

Фотолитография – ключевой технологический процесс в производстве полупроводниковых приборов и микросхем. Суть процесса заключается в переносе оригинала топологии интегральной схемы на поверхность полупроводниковой пластины. Характеристики микросхем зависят от точности изготовления их минимальных элементов. Задача фотолитографии – обеспечить качественное формирование этих элементов на всем поле кремниевой пластины с соблюдением допускаемых отклонений размеров элементов и их расположения относительно нижележащих структур, сформированных в предыдущем цикле.

В фотолитографии особую актуальность приобретает правило "если нельзя измерить, то невозможно и изготовить". В производственной практике такие минимальные размеры называются критическими (critical dimension – CD), а операция контроля контролем критических размеров (КР).

Продолжительность обработки пластин обычно 6-8 недель, а фотолитография занимает приблизительно 40-50% от этого времени. Кроме того, для формирования структуры современного прибора пластине требуется до 35 технологических циклов фотолитографии (рис.1) и их число постоянно растет по мере повышения сложности прибора.

Объем метрологических данных контроля критических размеров на пластинах, необходимый для качественного переноса изображения, значителен, и сегодня количество измерений может достигать 10 тыс. на одной пластине.

КОНТРОЛЬ КРИТИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ НА ПЛАСТИНАХ

Важно обратить внимание, что в фотолитографии значение слов "CD control" имеет определенный смысл – управление критическими размерами (смысловое ударение на слове "управление"). Это связано с тем, что на размеры элементов на кремниевой пластине влияют не только параметры оптического тракта степпера, но и параметры процессов дальнейшей обработки – проявления и травления. Для обеспечения стабильной повторяемости заданных размеров критических элементов проводят серии экспериментов по определению оптимальных значений фокуса и дозы экспозиции степпера. В результате определяется диапазон изменения этих параметров, в пределах которого размер критического элемента не выходит за рамки допуска. Этот диапазон называется технологическим окном и является важной характеристикой фотолитографического процесса. Тех-

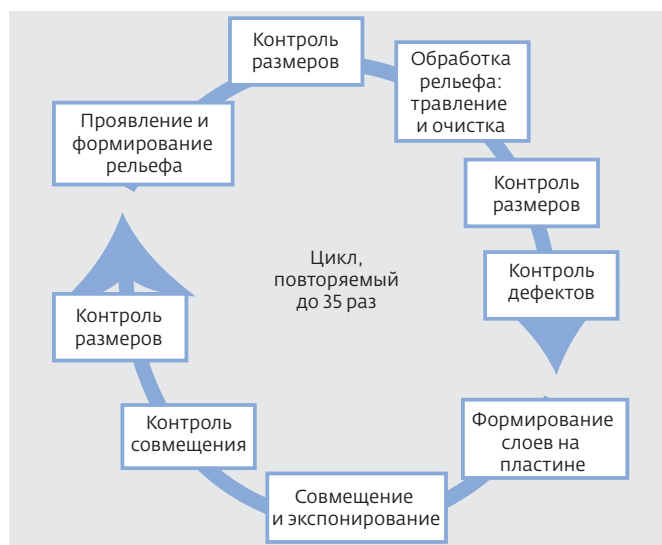


Рис.1. Операции, выполняемые в процессе одного цикла обработки кремниевой пластины

нологическое окно процесса (рис.2) определяется из анализа массивов данных об изменениях размеров критических элементов в зависимости от параметров технологического процесса. В координатах "доза экспозиции-дефокусировка" на рисунке показаны две области: в одной изменение размера минимального элемента составляет не более 10% от номинального значения 0,25 мкм (синие линии), в другой – изменение угла наклона боковых стенок резистивной маски лежит в пределах 85–92 угл. град. (желтые линии). Прямоугольный участок – это и есть технологическое окно, которое показывает допустимые изменения дозы экспозиции и отклонений от точной фокусировки.

С возрастанием сложности и стоимости используемых в фотолитографии оборудования и материалов проведение экспериментальных работ требует все больших материальных и временных затрат. Поэтому сегодня инструментом технолога стало программное обеспечение и моделирование. В ряде случаев предпочтение отдается моделированию с помощью пакетов программ Virtual Stepper, PROLITH или SOLID-C. Благодаря фундаментальному физическому подходу моделирование позволяет определить и оптимизировать параметры фотолитографического оборудования до этапа экспонирования пластины и моделировать трехмерную топографию элементов в фоторезисте на различных стадиях фотолитографической обработки. В результате увеличивается выход годных изделий и полностью используются возможности существующего технологического оборудования.

Допуски на отклонения размеров элементов приборов устанавливаются в процессе проектирования топологии прибора для каждого этапа технологического процесса формирования топологии: экспонирования и проявления, травления через маску фоторезиста с учетом технических требований к геометрии фотошаблона. Общее отклонение размера в фотолитографии складывается из погрешности, вносимой шаблоном, погрешности масштаба проекционной системы, формирующей изображение в слое фоторезиста, ухода размера в результате травления и допуска на совмещения топологических слоев. Из этого следует, что линейный размер в фотолитографическом процессе выступает в роли параметра качества, относительно которого настраивается и контролируется фотолитографическое оборудование, рассматривается воспроизводимость свойств материалов, используемых в процессах, определяются оптимальные методики измерений и измерительное оборудование. В работе [1] приведены данные о приблизительном влиянии изменений фотолитографического процесса на отклонения линейных размеров (табл.1).

В субмикронном диапазоне понятие критического размера элемента еще более усложняется. Важны не только определенные линейные размеры элемента в плане (linewidth), но и его трехмерная конфигурация – ширина основания (линия А) и вершины (линия В), высота и угол наклона боковой стенки (рис.3).

На практике структуры могут иметь рваные края, боковые стенки наклонные (а не вертикальные) и профиль линии может быть даже асимметричным (основание по размеру меньше вершины). Поэтому ширина элемента зависит от выбора высоты, на ко-

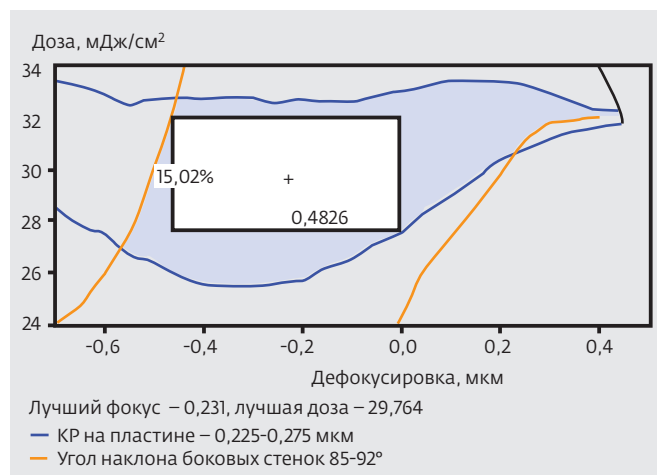


Рис.2. Технологическое окно процесса

Таблица 1. Влияние изменений фотолитографического процесса на отклонения линейных размеров

Наименование измеряемого параметра	Колебания величины, %	Изменения ширины линии, мкм
Толщина пленки фоторезиста	10	0,05
Время сушки	10	0,01
Температура сушки	10	0,02
Экспозиция	10	0,25
Время проявления	10	0,15
Температура второй термообработки	10	0,11
Время анизотропного травления	10	0,15–1,0
Температура анизотропного травления	10	0,05
Концентрация проявителя	5	0,21
Температура проявителя	± 0,1°C	0,15

торой ее нужно определить, а значение высоты зависит от текущего технологического процесса.

С уменьшением ширины элемента увеличивается влияние неравномерности ширины линии (linewidth roughness - LWR) и неровности края линии (line-edge roughness - LER) на характеристики прибора. Изменения ширины элемента от транзистора к транзистору (рис.4) рассматривают как изменение CD, изменение ширины линии по ее длине определяется как неравномерность ширины, эквивалентное колебание положения отдельного края линии по длине называют неровностью края. Вариации этих параметров могут вызвать изменения в канале от транзистора к транзистору и профиля концентрации легирующей примеси, что может впоследствии привести к изменениям быстродействия интегральной схемы, токов управления и утечки [2].

Неравномерность ширины линии LWR определяется как 3σ отклонения измеренного значе-

ния ширины CD_i от среднего CD из выбранного количества сечений i [3]:

$$LWR = 3 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (CD_i - \overline{CD})^2}{n-1}} \quad (1)$$

Неровность линии определяется отдельно для левого LER_l и правого LER_r краев [4] как 3σ расстояния от измеренного среднего значения координаты положения левого края x_l или правого x_r до каждой точки края из выбранного количества сечений i, а **общая неровность LER** – это среднеквадратическое значение этих двух величин:

$$LER_l = 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,l} - \overline{x}_l)^2}{n-1}}; LER_r = 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,r} - \overline{x}_r)^2}{n-1}}; \quad (2)$$

$$LER = \sqrt{\frac{LER_l^2 + LER_r^2}{2}}$$

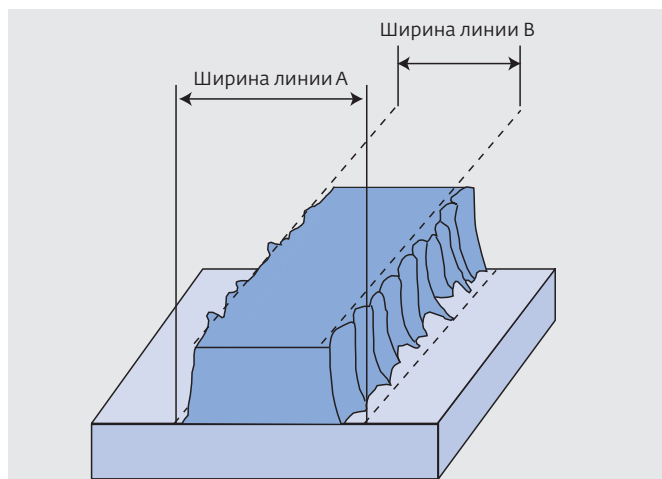


Рис.3. Трехмерное изображение критического элемента

Результаты измерений принято характеризовать понятиями "воспроизводимость" и "точ-

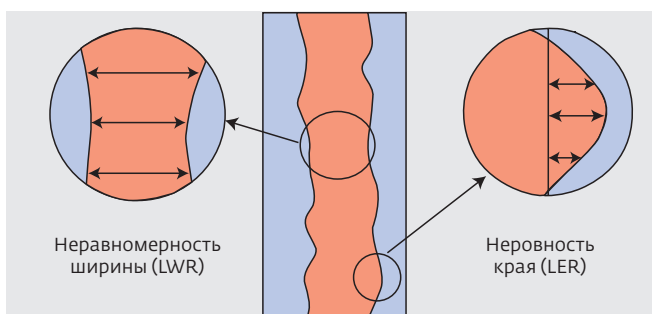


Рис.4. Неравномерность ширины линии и неровность края линии

ность". Воспроизводимость количественно характеризует изменения в измерениях одного и того же элемента при неизменных условиях получения данных о размере. Если эти изменения подвержены влиянию только случайных факторов, то они описываются нормальным законом распределения, и оценка воспроизводимости σ может проводиться по известным формулам:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (3)$$

где σ – среднее значение величины, x_i – текущее измерение и n – **общее количество измерений**.

Различают кратковременную и долговременную воспроизводимости, хотя эти различия условны. Кратковременная воспроизводимость в большей степени характеризует измерительный тракт установки, влияние шумов и вибраций. Долговременная воспроизводимость учитывает стабильность условий измерения, когда на результат могут влиять факторы внешней среды – деградация источника излучения и других элементов оптической схемы, дрейф настройки оптики для оптических систем или фактор однозначности положения измеряемого элемента относительно измерительной системы после загрузки-выгрузки образца. Вычисляя среднее значение данных в серии измерений, можно уменьшить влияние случайных факторов на результат измерения.

Точность характеризует степень соответствия результатов измерений абсолютному эталону или определенному стандарту. Другими словами, точность – это алгебраическая разность между результатом измерений и истинным значением измеряемой величины, вызванная несовершенством метода и средств измерения, не-

постоянством условий измерения. Эту разность можно уменьшить, используя операцию калибровки измерительного прибора. Однако калибровка никогда полностью не приводит к абсолютной точности, потому что стандартные образцы и измерительные меры имеют свою собственную погрешность. Кроме того, трудно учесть разницу в физических характеристиках измерительной меры и реального объекта (об этом подробнее будет сказано ниже).

На практике большее значение имеет воспроизводимость измерений, так как конечная цель всего процесса – увеличение выхода годных изделий и главную роль здесь играют стабильность и надежность полученных данных. Точность же важна при интеграции различных процессов, их согласованности и при обмене данными между устройствами, процессами и предприятиями.

В Международной карте технологии для полупроводников (ITRS) [5] определены величины и допуски на операции контроля критических размеров (табл.2) для технологических уровней 130–65 нм.

Известное требование изготовителя к метрологии критического элемента – допуск на размер $\pm 10\%$ CD – может быть удовлетворено только тогда, когда чувствительность средства измерения согласно принятому в метрологии правилу будет иметь величину 1–3% CD. Таким образом, размер затвора с номиналом 90 нм должен контролироваться прибором, имеющим чувствительность 1–3 нм. Спектр оборудования для контроля микроразмеров достаточно широк. Установки контроля построены на базе различных методов: оптических (компьютерная микроскопия и скатерометрия) и методов электронной и атомно-силовой микроскопии. Оптимальный выбор зависит от требований и особенностей технологии и финансов.

Таблица 2. Величины и допуски на операции контроля критических размеров

Наименование измеряемого параметра	Технологический уровень, нм				
	130	115	100	90	65
Полушаг элементов ДОЗУ, нм	130	115	100	90	65
Ширина печатных линий затвора микропроцессора, нм	90	75	65	53	35
Ширина изолирующих линий затвора микропроцессора, нм	65	53	45	37	25
Допуск на неравномерность ширины линии 3σ , нм	5,2	4,2	3,6	3,0	2,0
Допуск на измерения неравномерности ширины линии 3σ , нм	1,0	0,85	0,72	0,59	0,40
Допуск 3σ на измерения неровности края, нм	0,74	0,60	0,51	0,42	0,28

КОНТРОЛЬ КРИТИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ НА ФОТОШАБЛОНАХ

Уменьшение размеров при переходе на субмикронные технологические нормы нигде не ощущается так сильно, как в фотолитографии. Фотошаблон становится избранным инструментом в современной технологии. Это можно считать следствием возрастания требований по прецизионности, увеличения числа генерируемых элементов и использования технологий расширения технических возможностей – таких как OPC (Optical Proximity Correction – коррекция оптической близости), PSM (Phase-Shift Masks – фазосдвигающие фотошаблоны) или SRAF (Sub-Resolution Assist Feature – структура содействия сверхразрешению), которые являются основой сегодняшнего и будущего успеха в печати элементов с критическими размерами (рис.5).

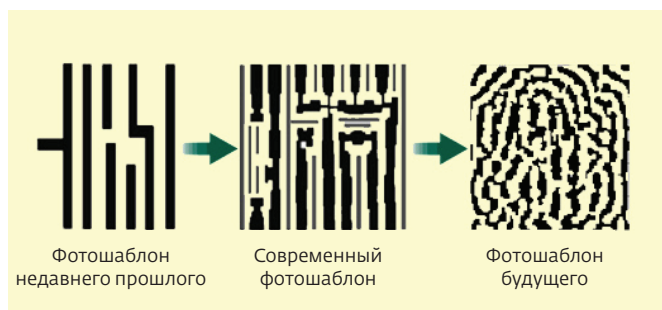


Рис.5. Динамика изменения фрагмента рисунка фотошаблона по информации Intel

В связи с возрастанием сложности фотошаблонов значительно увеличивается их стоимость. Например, капитальные затраты на производство комплекта фотошаблонов технологического уровня 90 нм составляют приблизительно 60 млн. долл. [6]. Технологический уровень 45 нм требует увеличения затрат приблизительно до 80 млн. долл., а для 22 нм затраты возрастают уже до 100 млн. долл. При этом общий объем производства составляет примерно два комплекта фотошаблонов в день.

Такие большие затраты заставляют производителей искать более эффективные пути для производства качественных фотошаблонов, высокой точности и реальной стоимости. Гарантировать качество масок после формирования топологии с увеличенным уровнем сложности почти невозможно, поэтому контроль и ретушь рисунка становятся незаменимыми элементами при бездефектном изготовлении фотошаблонов. Сегодня лучший способ гарантировать изготовление

качественного фотошаблона – это доведение его параметров до заданного уровня качества. Операция контроля критических размеров маски при этом – один из необходимых инструментов. Значение ее увеличивается и она, наряду с рутинной функцией контроля по типу "годен-негоден", является регулятором всего технологического процесса производства фотошаблона (рис.6).



Рис.6. Технологический процесс производства фотошаблона

Операции по контролю размеров структур, выполненных на фотошаблоне, можно разделить на два типа: контроль достоверности рисунка (смещение изображения, критический размер, размеры элементов OPC и SRAF, фаза) на соответствие заданным проектным нормам и контроль фотолитографической пригодности. Другими словами, это прогнозирование величин критических размеров на пластине с учетом действия технологий OPC, PSM и SRAF.

Международная карта технологии для полупроводников [5] определяет величины и допуски на операции контроля критических размеров масок (табл.3).

Достоверность рисунка важна для изготовителя маски, так как это основа всего производственного процесса. Изготовители пластин прежде всего интересуются фотолитографической пригодностью фотошаблона, так как им важно знать, что структуры, сформированные на маске, правильно напечатаются на пластине их

Таблица 3. Величины и допуски на операции контроля критических размеров масок

Наименование измеряемого параметра	Технологический уровень, нм			
	130	100	90	65
Полушаг элементов ДОЗУ, нм	130	100	90	65
Минимальный размер изображения элемента на маске, нм	360	260	212	140
Размер элементов ОРС, нм	180	130	106	70
Неравномерность КР 3σ, нм: изолированные линии групповые линии	7,4	5,1	4,2	2,5
	10,4	8,0	7,2	4,2
Смещение положения элементов, нм	27	21	19	14
Прецизионность контроля КР элементов 3σ, нм	1,8	1,3	1,1	0,7

фотолитографической установкой. Контроль и анализ фотошаблонов на фотолитографическую пригодность производятся на установках, выпускаемых фирмой Carl Zeiss SMS (модели AIMS fab 248, AIMS fab 193 и AIMS fab 193i, AIMS – Aerial Image Measurement System – система измерения воздушного изображения). Установки имеют систему освещения фотошаблона, подобную сканеру (степперу), отличающуюся только мощностью источника. Длина волны излучения, тип, апертура и степень когерентности освещения устанавливаются как у фотолитографической установки. Благодаря такой конструкции условия взаимодействия фотошаблона и рабочего излучения в обеих установках одинаковы, а это – основа для получения идентичных изображений, отличающихся только масштабом. Объектив установки AIMS с входной рабочей апертурой, равной апертуре сканера (степпера), строит увеличенное изображение участка фотошаблона на фотоприемной матрице ПЗС. Схемы формирования воздушного изображения маски в сканере/степпере и на установке AIMS, на котором символом NA обозначены входные и выходные апертуры объективов установок, иллюстрирует рис.7.

За счет уменьшения поля зрения и энергии рабочего излучения конструкция объектива установки AIMS значительно упрощается по сравнению с объективом сканера, но физические параметры и условия формирования воздушного изображения маски воспроизводятся как в случае экспонирования пластины. В результате компьютерного анализа воздушного изображения маски принимается решение о фотолитографической пригодности фотошаблона и определяются параметры технологического окна процесса. Такая технология измерения воздушного изображения масок является ключевым элементом

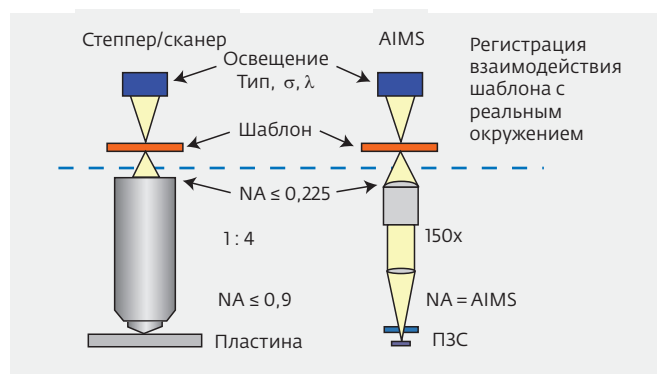


Рис.7. Схемы формирования воздушного изображения маски в сканере/степпере и на установке AIMS

бездефектного изготовления фотошаблонов [7]. Ее в равной степени могут использовать как изготовители масок для оптимизации процесса изготовления и проверки технологий расширения технических возможностей (ОРС, PSM или SRAF), так и изготовители чипов для инспекции масок и определения параметров технологического окна процесса для различных режимов фотолитографии и различных моделей фотолитографического оборудования.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Главная задача метрологии – обеспечение единства измерений или обеспечение состояния, когда результаты измерений выражены в единицах, величина которых подтверждена эталоном, а погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

На практике для технологов важным является воспроизводимость измерений критических размеров элементов, поскольку масштабная (мультипликативная) составляющая систематической погрешности размера критического элемента пренебрежимо мала. Последнее связано с методом формирования топологии, в котором заложена абсолютная привязка к первичному эталону метра в виде длины волны лазерного излучения 632,8 нм. Тем не менее, вопросы абсолютной точности иногда требуют решения, в особенности, при выполнении исследовательских работ, создании новых приборов и процессов и предъявлении готовой продукции заказчику. Для обеспечения единства измерений необходимо проводить калибровку измерительных устройств по эталонным образцам – мерам малой длины. Существуют меры, предназначенные для калибровки оптических микроскопов, сканирующих зондовых микроскопов, сканирующих электронных микроскопов. Топологический рисунок мер содержит наборы одиночных линий и периодических структур, и каждая мера сопровождается паспортом или аттестатом с указанием значений размеров элементов и условий их измерения.

В практике применения мер малой длины следует учитывать, что физические свойства поверхности структурных элементов меры, например, коэффициент отражения и форма края элемента (высота и угол наклона боковой стенки), в совокупности с параметрами измерительной системы будут влиять на величину аддитивной составляющей систематической ошибки, определенной в результате калибровки. Поэтому в процессе измерений необходимо поддерживать постоянство этих параметров. В противном случае результаты измерений будут искажаться тем в большей степени, чем больше будет их отличие от параметров, установленных при калибровке.

Национальный институт стандартов и технологии (NIST) (США) предложил для калибровки установок измерения критических размеров на фотошаблонах эталонную меру ширины линии SRM 2059 с калиброванными размерами светлых и темных линий [8]. Элементы выполнены ме-

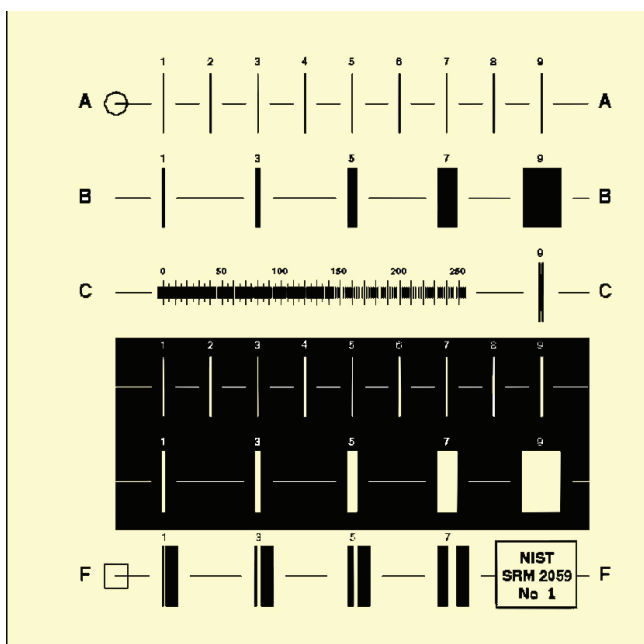


Рис.8. Тестовый модуль меры ширины линии SRM 2059

тодом фотолитографии в слое антиотражающего хрома на кварцевой подложке с номинальными значениями ширины линий в пределах от 0,25 до 32 мкм, аттестованных с неопределенностью 25 нм для одиночных линий/промежутков и 9 нм – для шага структур. Мера SRM 2059 (рис.8) предназначена для измерений на бинарных фотомасках, которые занимают более 85% в мировом объеме производства.

В ОАО "Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума" РАН разработана эталонная трехмерная шаговая мера МШПС-2,0К (рис.9), предназначенная для калибровки средств измерений линейных размеров, применяемых в микроэлектронике и нанотехнологии [9]. Аттестуемые элементы меры – ширина, высота линии и период. С ее помощью возможно осуществлять калибровку увеличения (кратности) и измерение диаметра электронного зонда РЭМ, а в случае атомно-силовых микроскопов еще и радиусов острия зондов (кантилеверов), линейность шкал и неортогональность сканеров. Разработан комплект государственных стандартов из семи документов [10], регламентирующий процедуры калибровки и поверки меры. Мера состоит из пяти групп шаговых структур по три структуры в каждой. Одна из шаговых структур (см. рис.9) состоит из 11 канавок с трапециевидным профилем в кремнии. Мера имеет следующие параметры: ширина линии 30–1500 нм, высота рельефа 100–1500 нм, погрешность аттес-

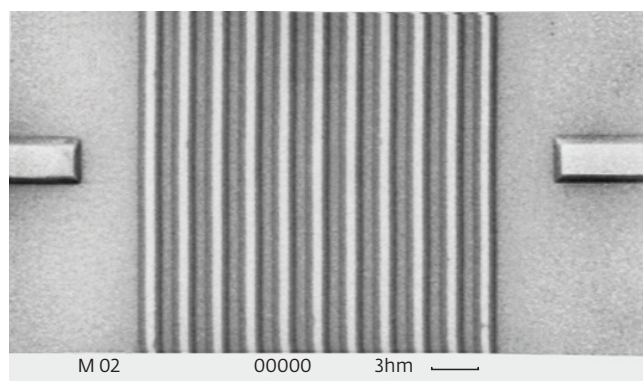


Рис.9. Шаговая структура меры МШПС-2,0К и ее трехмерный профиль

тации – шаг ± 1 нм, ширина линии ± 1 нм, высота рельефа $\pm 1\%$.

В заключение можно сказать следующее. Получение информации об изменении критических размеров элементов полупроводниковых структур – одна из основных задач в фотолитографии. Анализ этой информации позволяет настраивать технологическое окно процесса фотолитографии и корректировать параметры литографического оборудования, что задача гораздо сложнее и шире, чем простое установление того факта, что размер критического элемента находится в допустимом интервале. Поэтому этот процесс можно назвать управлением критическими размерами.

Для экономии ресурсов и времени при определении параметров технологического окна предлагается использовать программы моделирования, анализирующие совокупный вклад факторов, которые влияют на трехмерную топографию критических элементов в слое фоторезиста. Моделировать фотолитографическую пригодность критических элементов топологии реальной маски можно на установках анализа воздушного изображения. Программное обеспечение установок позволяет моделировать "печатаемость" в фоторезисте элементов топологии до начала дорогостоящей и требующей времени операции проекционного переноса ее изображения на полупроводниковую пластину. Моделирование повышает качество решения задачи, так как не требуется выполнения дополнительных операций при расширении поля исследования.

Установки контроля критических размеров должны обеспечивать контроль с прецизионностью лучше 1-3% от критического размера. При контроле критических размеров элементов наиболее важны воспроизводимость измерений и минимизация аддитивной составляющей системати-

ческой ошибки (постоянное смещение размера). Предлагается использовать меры малой длины для калибровки измерительных устройств. При этом необходимо иметь в виду, что высота и угол наклона края критического элемента вместе с физическими свойствами его поверхности определяют величину смещения размера, которая искажает результат измерений тем в большей степени, чем больше указанные параметры отличаются от параметров эталонной меры.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Точицкий Я.И.** Оптические технологии микро- и нанoeлектроники. – Минск, РИВШ, 2010.
2. **C.Diaz, H.Tao, Y.Ku, A.Yen, and K.Yound.** An experimentally validated. – IEEE Electron Device, Letters, 2001, v.22, p.287-289.
3. **In Wook Cho, Hyunsu Kim, Joo-Yoo Hong and Hye-Keun Oh.** Reduction of Line Width and Edge Roughness by Using a Resist Reflow Process for Extreme Ultraviolet Lithography. – Journal of the Korean Physical Society, June 2010, v.56, № 6.
4. **G.Mosdzen, F.Rudenuer, W.Costin, P.Satter, P.Hudek.** Ultra low voltage SEM for high accuracy measurements of CD/LWR/LER. <http://www.fhv.at/media/pdf/forschung/mikrotechnik/ultra-low-voltage-sem-for-high-accuracy-measurements-of-cd-lwr-ler>
5. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), <http://member.itrs.net> (выборка данных)
6. M.LaPedus, Analysis: Photomask Business Model is Broken, EETimes, <http://www.insurancetech.com/managementstrategies/showArticle.jhtml?articleID=211100224&pigno=5>
7. Проспекты фирмы Carl Zeiss SMS.
8. https://www-s.nist.gov/srmors/certificates/view_certificate.cfm?certificate=2059
9. **Тодуа П.А.** Метрология в нанотехнологии. – Российские нанотехнологии, 2007, т.2, №1-2, с.61-69.
10. <http://www.gostbaza.ru/?a=001.017.040.001>