

УДК. 621.382.002; 621.382.049.77.002

## КАЛИБРОВКА УСТАНОВОК ИЗМЕРЕНИЙ РАЗМЕРОВ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУР

*ТРАПАШКО Г. А.*

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

Развитие микроэлектроники, имеющей дело с элементами, размеры которых составляют сотни и уже даже десятки нанометров, требует решения проблемы обеспечения единства линейных измерений в субмикронном диапазоне. Эта проблема становится особенно актуальной при выполнении исследовательских работ, создании новых приборов и процессов, предъявлении готовой продукции заказчику и исследовании метрологических характеристик измерительного оборудования.

Для измерения размеров микроструктур в субмикронном диапазоне применяется ряд приборов с различными методами измерений, которые получили развитие в последние десятилетия благодаря острой потребности микроэлектронной технологии в оборудовании для контроля микроразмеров. Принцип «можно изготовить то, что может быть измерено» приобрел в этой области техники особое значение. Исторически все начиналось с применения оптических микроскопов, оснащенных устройствами формирования видеосигналов от контролируемых элементов топологии и алгоритмов получения информации о размере элемента из этого сигнала. По мере сокращения топологического размера минимального элемента микросхем эти приборы были заменены сканирующими электронными микроскопами, обеспечивающими более высокое разрешение.

В ходе дальнейшего повышения сложности топологического рисунка микроэлектронных структур особую актуальность приобретает знание формы элементов, их высоты и угла наклона боковой стенки. Задача трехмерного контроля была решена с помощью методов оптической скаттерометрии и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Для превращения всех измерительных приборов в средства измерений и обеспечения достоверности и единства измерений необходимо осуществлять их калибровку с привязкой к общепризнанному эталону длины. Это можно выполнить, используя меры малой длины, которые должны обладать как свойствами, аналогичными объектам, применяемым в микроэлектронике, так и свойствами, связываемыми их оптимальным образом с первичным эталоном длины и рабочим измерительным оборудованием.

**Анализ составляющих погрешности измерений.** Основная задача калибровки – гарантирование единства измерений. Это означает, что результаты выражены в единицах измерений, величина которых удостоверена эталоном, а погрешности известны. Для калибровки измерительного оборудования с помощью меры малой длины важно исследовать составляющие точности полученного результата измерений, который можно представить в виде

$$D^{\text{изм}} = \alpha D^{\text{этал}} + \beta + \delta, \quad (1)$$

где  $D^{\text{изм}}$  – результат измерений размера элемента;  $D^{\text{этал}}$  – размер эталонного элемента, известный из аттестата на меру малой длины;  $\alpha$  – мультипликативная погрешность или погрешность преобразования масштаба;  $\beta$  – аддитивная погрешность или смещение;  $\delta$  – случайная погрешность измерений, характеризует шумы и нестабильности измерительной установки.

Погрешности измерения  $\alpha$  и  $\beta$  относятся к систематическим составляющим, и их влияние на результат измерений должно быть минимизировано при калибровке измерительного прибора до величин, лежащих за пределами требований точности. Для идеального случая:  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 0$ .

Погрешность преобразования масштаба

$$\alpha(X) = \frac{\Delta X^{\text{скан}}}{\Delta X^{\text{пред}}} \quad (2)$$

характеризует относительное отклонение результата сканирования  $\Delta X^{\text{скан}}$ , полученного измерительной системой прибора, известного расстояния на предмете  $\Delta X^{\text{пред}}$ . Мультипликативная погрешность имеет вариации в пределах диапазона измерений, которые определяют величину нелинейности шкалы измерительного прибора. При измерении методом микроскопии дисторсия оптической системы является главным фактором, искажающим линейность шкалы.

В сканирующей зондовой микроскопии линейность шкалы определяют характеристики сканера. Лучшим методом измерений, с точки зрения минимизации  $\alpha$ , считается интерферометрический, в котором в роли измерительной шкалы используется лазерный интерферометр. Поэтому этот метод является главным при аттестации мер малой длины и эталонов. Принимая во внимание изложенное,  $\alpha$  можно отнести к инструментальной погрешности.

Смещение  $\beta$  является методической погрешностью в связи с тем, что причины, влияющие на ее величину, зависят от метода измерений. Механизм ее влияния на результат должен быть изучен, а величина измерена либо рассчитана, а затем учтена. Аддитивная погрешность также может иметь некоторые колебания в диапазоне измерения. При измерении методом

микроскопии неравномерность освещенности в оптической системе является главным фактором, влияющим на колебания величины  $\beta$  в случае, когда погрешность преобразования масштаба уже скомпенсирована. Особенностью аддитивной погрешности является то, что она существенно зависит от размера измеряемого элемента в начале диапазона измерений, так что допустимая величина  $\beta$  определяет его начало.

Случайная погрешность изменяется непредвиденным (хаотическим) образом при проведении повторных измерений одного и того же элемента. Она формируется совместным действием ряда причин: шумами электронных элементов и наводками на цепи электронных схем; шумами, обусловленными дискретизацией измерительных данных; пульсацией источников питающего напряжения; вибрациями и другими факторами, оказывающими влияние на результат измерения и не поддающимися полному контролю. В качестве меры рассеяния результатов измерений используется стандартное отклонение, которое характеризует повторяемость результатов в измерениях одного и того же элемента при неизменных условиях получения данных о размере. Если эти изменения в измерениях подвержены влиянию только случайных факторов, то они описываются нормальным законом распределения и оценка повторяемости  $\sigma$  может проводиться по известным формулам:

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

где  $\bar{x}$  – среднее значение величины;  $x_i$  – текущее измерение;  $n$  – общее количество измерений.

Следует отметить, что иногда пользуются термином «долговременная повторяемость», который учитывает стабильность условий измерения в течение длительного времени (день, неделя или месяц), когда на результат могут оказать влияние факторы внешней среды, деградация источника излучения или дрейф настройки оптики для оптических систем и элементов сканирующей системы для АСМ. В некоторых случаях оценка повторяемости предполагает учет факторов однозначности по-

ложения измеряемого элемента относительно измерительной системы после загрузки-выгрузки образца или его перефокусировки при измерениях методом микроскопии.

Если систематическую погрешность трудно обнаружить, но легко исключить, то случайную, наоборот, легко обнаружить (по разбросу результатов), но невозможно исключить, а можно только уменьшить, например статистической обработкой результатов при многократных измерениях с использованием формул (3).

**Исследование особенностей методической погрешности.** Каждый метод измерения имеет свою специфику формирования методической погрешности, и для разработки алгоритма минимизации ее влияния на результат эта частная специфика должна быть детально исследована. В микроскопии размер элемента определяется по его увеличенному изображению. В этом изображении оператор (при визуальных измерениях на ранних стадиях развития метода) или автоматизированная система при выполнении алгоритма измерений идентифицируют тот уровень интенсивности, который, по мнению оператора или в соответствии с критериями, заданными автоматизированной системе, принимается как уровень, соответствующий краю элемента. Тогда размер элемента определяется как разность координат точек, принадлежащих противоположным краям элемента, имеющим этот уровень интенсивности. Образование аддитивной погрешности  $\beta$  при определении размера светлого элемента по профилю интенсивности светового сигнала от ПЗС-камеры, полученного методом микроскопии, иллюстрирует рис. 1.

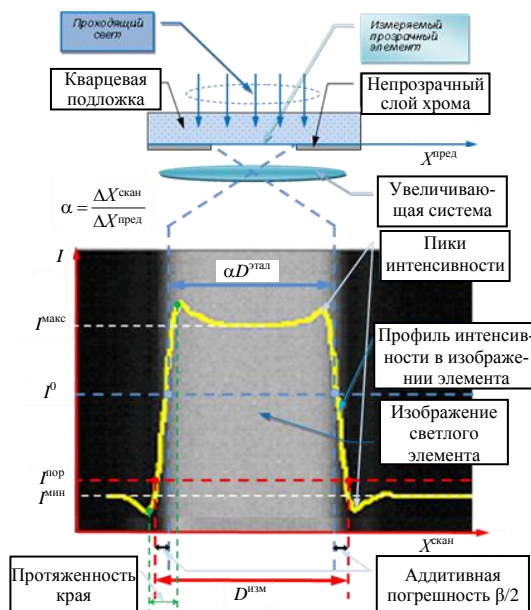


Рис. 1. Схема формирования профиля интенсивности в методе микроскопии и образование методической погрешности  $\beta$

На рис. 1 изображены светлый (прозрачный) элемент маски на фотошаблоне, находящийся в поле зрения матричного фотоприемника (ПЗС-видеокамеры), и график распределения интенсивности света (желтая кривая) вдоль выбранного горизонтального направления  $X_{\text{скан}}$ . Термином  $I^{\text{мин}}$  обозначен уровень интенсивности, соответствующий непрозрачным зонам фотошаблона (промежуткам), а  $I^{\text{макс}}$  – прозрачным участкам (элементам). Уровень интенсивности, соответствующий положению характерных точек профиля элемента, расстояние между которыми равно истинному размеру элемента  $D^{\text{этал}}$ , обозначен  $I^0$ . В свою очередь,  $I^{\text{пор}}$  обозначает уровень (порог) интенсивности, при котором получен результат измерений размера элемента  $D^{\text{изм}}$ . Когда погрешность масштаба устранена ( $\alpha = 1$ ), аддитивную погрешность  $\beta$  можно рассматривать как разницу между эталонным и измеренным значениями. При измерении методом микроскопии разрешение системы, увеличивающей изображение контролируемого элемента, является главным фактором, влияющим на величину аддитивной погрешности, так как определяет протяженность зоны на профиле интенсивности, соответствующей границе элемента (переход между  $I^{\text{мин}}$  и  $I^{\text{макс}}$  на рис. 1). Разрешение, в свою очередь, зависит от рабочей длины волны и апертуры объектива, которые являются важнейшими характеристиками из-

мерительного оборудования и сохраняются неизменными в процессе измерений. Эта связь описывается выражением, известным как критерий Релея

$$r = 0,61 \frac{\lambda}{NA}, \quad (4)$$

где  $r$  – минимальное расстояние между элементами, при котором они наблюдаются раздельно;  $\lambda$  – длина волны источника света;  $NA$  – апертура объектива.

Иллюстрация этой зависимости для объектива с апертурой  $NA = 0,9$  и обозначением длин волн источников света, используемых в микроскопах для контроля микроструктур, представлена на рис. 2. Резервы сокращения аддитивной погрешности заключаются в уменьшении длины волны  $\lambda$  (переходе в область глубокого ультрафиолета – ГУФ) и увеличении апертуры  $NA = n \sin \alpha$ , создании объективов с иммерсией, где  $n > 1$  – показатель преломления иммерсионной жидкости,  $\alpha$  – апертурный угол объектива.

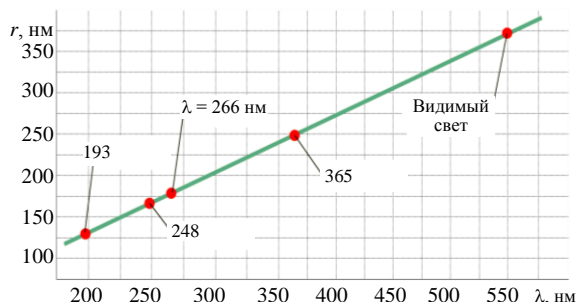


Рис. 2. Зависимость разрешения для объектива с апертурой  $NA = 0,9$  от длины волны источника света

Измерение профиля полупроводниковых структур методом АСМ имеет присущие ему характерные черты образования методической погрешности. Образование аддитивной погрешности  $\beta$  при определении размера выступающего элемента по профилю, полученному методом АСМ при контактном сканировании элемента зондом с конечным размером острия, иллюстрирует рис. 3. На рис. 3  $Z^{\min}$  и  $Z^{\max}$  – высота, соответствующая основанию (дно канавки) и вершине элемента. Высота, которая соответствует истинному размеру элемента  $D^{\text{этал}}$ , обозначена  $Z^0$ , а  $Z^{\text{пор}}$  – высота, при которой измерен размер элемента  $D^{\text{изм}}$ .

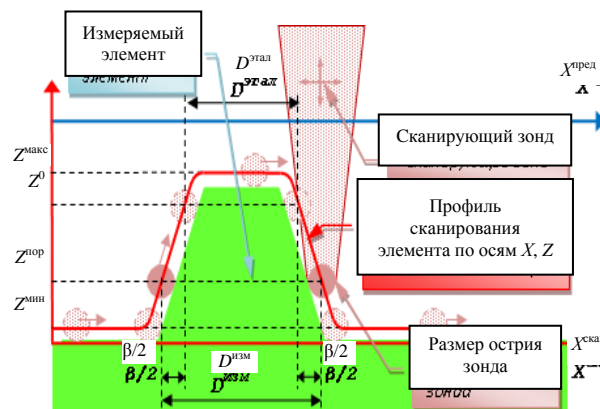


Рис. 3. Образование методической погрешности  $\beta$  при контроле профиля элемента методом атомно-силовой микроскопии

В сканирующей зондовой микроскопии диаметр острия зонда, его форма и амплитуда колебаний (при колебательном режиме сканирования) определяют пространственное разрешение и минимальную величину поправки  $\beta$ . Адаптированные для условий измерения критических размеров (critical dimension – CD) трехмерных полупроводниковых структур атомно-силовые микроскопы (CD АСМ) имеют специализированную форму зонда. С его помощью определяют основные параметры элемента: глубину (высоту); ширину вершины, середины и основания; угол боковой стенки у основания. Дополнительные измерения включают определение вариаций этих основных параметров.

Проекция формы воронкообразного CD-зонда, позволяющего контролировать даже элементы с острым углом боковой стенки у основания, изображена на рис. 4.

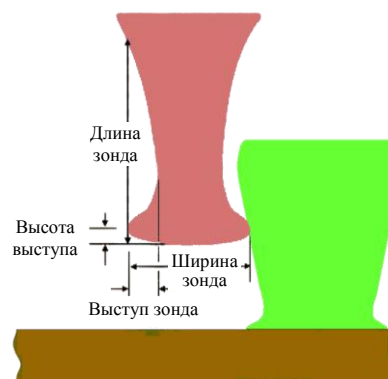


Рис. 4. Форма и параметры воронкообразного CD-зонда для контроля элемента с острым углом боковой стенки

CD АСМ позволяет всесторонне исследовать размеры и формы трехмерных объектов и

является гибким и универсальным метрологическим инструментом. С точки зрения калибровки, в этом случае нет зависимости величины аддитивной погрешности от физических характеристик измеряемых элементов. Поэтому СД АСМ позволяет проверить достоверность результатов измерений, полученных разными методами, исследовать их бюджет погрешностей, а в итоге – улучшить состояние размерной метрологии. Факторами сдерживания широкого распространения этих приборов являются сложность эксплуатации, низкая производительность и высокая стоимость измерения.

**Задачи калибровки.** Из вышеизложенного следует, что при измерении темного элемента микроскопом (промежутка между соседними светлыми элементами) или канавки атомно-силовым микроскопом методическая погрешность  $\beta$  изменяет свой знак. Поэтому выражение (1) для измерения шага периодической структуры с периодом  $T = D^{\text{элемент}} + D^{\text{промеж}}$  будет выглядеть как

$$T^{\text{изм}} = \alpha T^{\text{эт}} + \delta. \quad (5)$$

Из выражения (5) следуют три важных вывода. Первый – величина измеренного шага структуры не зависит от высоты или уровня, на которой (котором) этот шаг измерялся. Второй – точность измерения периодической структуры существенно выше, чем одиночных элементов. Третий – измерения эталонной периодической структуры (решетки) удобно использовать для определения мультипликативной погрешности  $\alpha$  и исследования ее вариаций в диапазоне измерений. Поэтому калибровку измерительной системы нужно начинать с определения мультипликативной погрешности. Для экспериментального исследования вариаций  $\alpha(X)$  в диапазоне измерений используют периодическую структуру с калиброванным малым шагом, охватывающую весь измерительный диапазон. Измерительной системой прибора измеряют все шаги структуры, попавшие в зону измерений, и вычисляют отклонения размера для каждого шага, применяя формулу (5). На основании полученной информации формируется таблица значений  $\alpha(X)$ , данные из которой используются при определении  $D^{\text{изм}}$  по формуле (1). На практике, для минимизации влияния случайных факторов, которые равновероятно

искажают результат либо в сторону его увеличения, либо уменьшения, выполняют серии многократных измерений.

После калибровки масштабной погрешности выполняют калибровку аддитивной погрешности. С этой целью измеряют ряды элементов с эталонными размерами и определяют  $\beta$ , используя формулу (1). Результат этого процесса для измерительной установки, работающей по методу оптической микроскопии, изображен на рис. 5. Параметры калибруемой системы: объектив с апертурой  $NA = 0,9$ , работающий в видимом диапазоне длин волн (550 нм), режим измерений – отраженный свет. Используемая мера малой длины содержала набор светлых, темных и периодических эталонных элементов, выполненных в слое хрома. Графики иллюстрируют поведение методической погрешности  $\beta$  в зависимости от размера и типа измеряемого элемента (светлый, темный, шаг) и подтверждают первый вывод, сделанный из формулы (5).

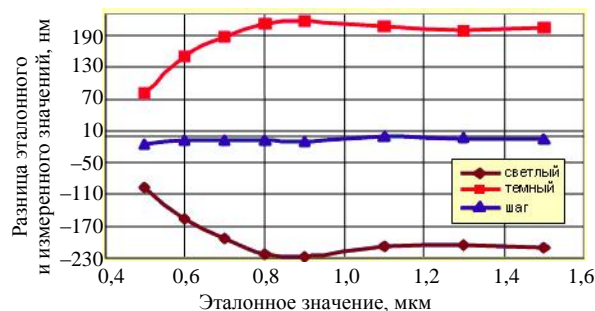


Рис. 5. Результат измерений элементов тестового шаблона

Из рис. 5 видно, что существенная зависимость методической погрешности от размера измеряемого элемента имеется в зоне, где размеры менее 0,75 мкм. Это обстоятельство определяет нижнюю границу диапазона измерений. Для больших размеров некомпенсированная систематическая ошибка имеет величину около 220 нм с разным знаком для светлых и темных элементов. При измерении шага (периода) смещение результата измерений незначительно по причине его компенсации (менее 20 нм). При введении компенсации смещения величиной 220 нм вариации методической погрешности не превысят  $\pm 15$  нм, что является хорошим результатом при измерении элементов с размерами 750 нм и более (менее 2 %) при

известном требовании изготовителя к метрологии критического элемента, заключающемся в технологическом допуске на размер  $\pm 10\%$ .

Очевидно, что для случая, изображенного на рис. 5, возможны измерения элементов, размеры которых меньше нижней границы диапазона 0,75 мкм вплоть до значений 0,50 мкм (минимальный размер меры). Для этого нелинейного участка, где аддитивная погрешность резко меняет свою величину, рекомендуется использовать алгоритм многоточечной калибровки (Multipoint Calibration – MPC). Для реализации этого алгоритма диапазон номинальных значений размеров элементов разбивается на небольшие интервалы, для которых на основе данных измерений тестовых образцов формируется таблица частных масштабных коэффициентов. Затем, при выполнении рабочих измерений, результат корректируется на величину этого коэффициента. Размер и количество интервалов MPC определяются величиной допустимой ошибки измерений и способом интерполяции данных в пределах интервала. Алгоритм MPC, на своем участке работы, компенсирует также влияние на результат измерений других искажений, присущих оптической системе, таких как дисторсия, неравномерность освещенности и т. п. Однако необходимо иметь в виду, что значения масштабных коэффициентов MPC нельзя переносить на другую установку и всякий раз обновлять их, если в данной системе имели место изменения, которые могли повлиять на оптические характеристики. Например, замена компонентов регулировки осветительной системы (апертуры освещения) или изменение настроек алгоритма измерения (изменение величины порога регистрации положения края элемента и т. п.).

Задачу калибровки для приборов, работающих по методу микроскопии (измерения размера по профилю сигнала, полученного в результате сканирования элемента), можно сформулировать как определение величины мультипликативной погрешности  $\alpha(X)$  (и  $\alpha(Y)$ , если для измерений используется координата  $Y$ ) и величины порога  $I = I^0$ , при котором следует проводить измерения элементов. Возможен другой вариант, когда определяется величина поправки  $\beta$ , на которую нужно сместить результат измерений, полученный при условии

$I = I^{пор}$ . Этот вариант также применяется, когда для определения размера используется другой алгоритм, в котором размер элемента находится по расстоянию между характерными точками профиля, например, между пиками интенсивности или точками перегиба на профиле края, где вторая производная от формы сигнала равна нулю. На третьем этапе можно выполнить многоточечную калибровку, если она поддерживается программным обеспечением установки и мера малой длины имеет аттестованные элементы в диапазоне предельного разрешения объектива (от  $r$  до  $2r$ ).

При калибровке аддитивная погрешность требует особого внимания. Это связано с тем, что ее величина в большой степени зависит от формы распределения света в изображении края элемента. А кроме параметров измерительной установки (апертура, диапазон длин волн, режим измерений, параметр когерентности освещения) эта форма зависит, во-первых, от физических характеристик поверхности контролируемых образцов (коэффициентов отражения и преломления или пропускания для режима измерений в проходящем свете) и, во-вторых, от трехмерных параметров измеряемых элементов (высота и угол наклона боковой стенки). На разнице высот при отражении излучения от основания элемента и его вершины возникает разность хода лучей, приводящая к интерференции, в результате которой суммарная интенсивность в зоне края зависит от высоты этого перехода и разницы коэффициентов отражения материалов. Эти два обстоятельства, не затрагивающие погрешность преобразования масштаба, существенно усложняют калибровку приборов, так как выдвигают требование к учету аддитивной погрешности в зависимости от вида поверхности образца и формы элемента. Или, другими словами, для каждого типа объектов, различающихся по своим оптическим характеристикам и по геометрической форме края контролируемых элементов, необходимо определять «свою» аддитивную поправку.

В случае измерений элементов на фотошаблоне в режиме проходящего света трехмерность элемента, выполненного в слое хрома с антиотражающим покрытием или без него и с толщиной в несколько раз меньше длины волны измерения (в пределах 60–120 нм), сказыва-



ется не столь существенно, и вариантов материалов подложки не много – это кварц или стекло. Такого нельзя сказать об элементах на полупроводниковых пластинах, выполненных в слоях с широкой комбинацией материалов и высотой элементов, иногда превышающей длину волны освещения. При работе в режиме отраженного света изменение фазы на краю элемента, имеющего форму ступеньки, приводит к образованию пиков интенсивности в зоне края (рис. 1), высота которых иногда может превышать амплитуду сигнала от элемента.

К сказанному следует добавить, что на вариации аддитивной погрешности влияют неравномерность освещенности и топологическое окружение в зоне измерений. Оба эти обстоятельства нарушают симметричность формы изображения краев элемента. Асимметричное распределение неравномерности освещенности вызывает смещение результатов даже при измерении шага структур. Шероховатость стенок элемента, неровность края добавляют неопределенности в величину аддитивной погрешности.

Метод АСМ дает результаты, не зависящие от свойств материала поверхности измеряемых образцов. Поэтому с точки зрения калибровки для него достаточно одного трехмерного эталонного образца, чтобы определить коэффициент преобразования масштаба  $\alpha$  и аддитивную погрешность  $\beta$ . Как говорилось выше, в сканирующей зондовой микроскопии эффективный диаметр острия зонда определяет пространственное разрешение и аддитивную погрешность  $\beta$ , которая может иметь разные значения для координат  $X$  и  $Y$ . Термин «эффективный диаметр» означает, что для контроля размеров часто используется колебательный режим зонда (*tapping mode*), уменьшающий травмирование поверхности и сокращающий случаи поломки зонда. В этом режиме эффективный диаметр зонда превышает свой физический размер на величину размаха колебаний. Для установления размеров зонда используются тестовые структуры специальной формы. В последующем, при определении размеров, эффективный диаметр зонда исключается при обработке результатов измерений.

Задачу калибровки для метода АСМ можно сформулировать как определение величины

мультипликативной погрешности  $\alpha(X)$ ,  $\alpha(Y)$  и  $\alpha(Z)$ , так как измерение осуществляется трехкоординатным сканером и аттестацией формы зонда по параметрам, приведенным на рис. 3.

**Меры малой длины.** Анализируя архитектуру построения технологического оборудования формирования топологической структуры на маски в связи с вопросами точности, видно, что координаты элементов рисунка фотошаблона формируются с использованием данных о перемещениях экспонирующего луча, полученных от интерферометрического измерителя, построенного на базе двухчастотного лазерного интерферометра, работающего на длине волны 632,8 нм. Известно, что на базе эффекта интерференции построена передача размера от первичного эталона к рабочим средствам измерений, а в международной практике значения длины волны излучения He-Ne/J2 лазера, стабилизированного по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде, является рекомендованным. Поэтому в самом методе формирования топологии маски заложена привязка к эталону длины. Впоследствии изготовленный фотошаблон контролируется на совмещаемость комплекта (смещение положения элементов) на установках контроля положения элементов с прецизионностью лучше 1 нм. Для минимизации влияний окружающей среды это происходит в климатической камере, которая поддерживает изменения температуры в пределах сотых градуса и влажности в пределах единиц процента.

Из сказанного следует, что современный фотошаблон, изготовленный в условиях жесткого метрологического контроля, обеспеченных новейшими достижениями измерительной техники, сам может являться эталоном шага периодической структуры и при некоторых обстоятельствах использоваться для калибровки масштаба. Однако для потребителя величина шага (расстояния между эквивалентными стенками элементов структуры) в большинстве случаев практически не нужна, так как не она определяет физические характеристики изготавливаемых приборов – быстродействие и энергопотребление, а размер критического элемента. Пользователю необходимо знать расстояние между противоположными стенками элементов структуры – так называемую ширину линии.

Для измерения ширины линии необходимо определить величину аддитивной погрешности с помощью эталонов или мер малой длины для линий и промежутков.

Для создания мер малой длины в требуемом диапазоне необходимо выполнить исследования механизмов формирования измерительной информации об объекте в используемом методе измерений, разработать алгоритмы измерений и соответствующее им программное обеспечение, которые позволили бы учитывать влияние взаимодействия измерительного прибора с измеряемой мерой малой длины. Меры малой длины должны содержать одиночные элементы (линии и промежутки) известной ширины, которые можно использовать в оптических микроскопах, сканирующих зондовых микроскопах (атомно-силовых, туннельных), сканирующих электронных микроскопах и т. д. в субмикронном и нанометровом диапазоне. Мера малой длины также должна содержать структуры для калибровки шага и сопровождаться паспортом с точным значением ширины линий, промежутков и периодов.

Национальный институт стандартов и технологии (NIST, США) предложил для калибровки установок измерения критических размеров на фотошаблонах эталонную меру ширины линии SRM 2059 (SRM – Standard Reference Material) с калиброванными размерами светлых и темных линий [1]. Элементы выполнены методом фотолитографии в слое антиотражающего хрома на кварцевой подложке с номинальными значениями ширины линий в пределах от 0,25 до 32,00 мкм, аттестованных с неопределенностью 25 нм для одиночных линий/промежутков и 9 нм – для шага структур. Мера SRM 2059 предназначена для улучшения состояния размерной метрологии бинарных фотомасок, которые занимают около 80 % в мировом объеме производства. Топология тестового модуля изображена на рис. 6.

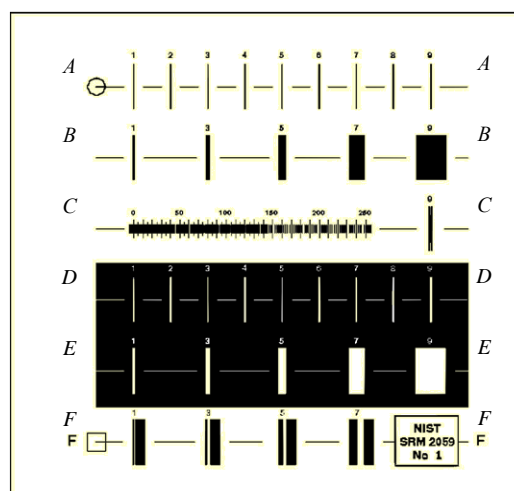


Рис. 6. Тестовый модуль меры ширины линии SRM 2059

Ряды одиночных элементов *A* и *B* на рис. 6 содержат 14 непрозрачных линий на прозрачном фоне, а ряды *D* и *E* – 14 прозрачных линий на непрозрачном фоне с такими же номинальными размерами. Эти непрозрачные и прозрачные линии используются для калибровки оптических микроскопов и предназначены для определения аддитивной погрешности  $\beta$  для изолированных (одиночных) линий и промежутков. Все ряды на SRM 2059 содержат прерывистую горизонтальную реперную линию шириной 2 мкм, которая определяет измерительную позицию на каждом топологическом элементе. В этой зоне все размеры усреднены, чтобы уменьшить влияние неравномерности края линии. Ряд *C* содержит три последовательные серии линий с номинальными периодами: 1,0 мкм – 50 периодов, 2,0 мкм – 50 периодов и 4,0 мкм – 25 периодов. Общая протяженность ряда – 250 мкм. Этот ряд предназначен для использования в качестве линейной шкалы для определения нелинейности мультипликативной погрешности  $\alpha$  (как функции положения в поле зрения), определения размера пикселя устройства регистрации изображения и оптической дисторсии измерительной системы. Он может быть также использован для контроля разрешающей способности объективов. Мера ширины SRM 2059 содержит четыре таких модуля, один из которых аттестован и имеет сертификат, и еще четыре модуля с разворотом топологии на 30°, 45°, 60° и 90°. Пользователь может откалибровать любой другой модуль на своем измерительном оборудовании



и использовать его в случае повреждения аттестованного.

В ОАО «Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума» Российской академии наук разработана эталонная трехмерная шаговая мера МШПС-2.0К, предназначенная для калибровки средств измерений линейных размеров, применяемых в микроэлектронике и нанотехнологии [2]. Мера имеет в качестве аттестуемых элементов ширину и высоту линии и период. С ее помощью возможно осуществлять калибровку увеличения и измерение диаметра электронного зонда РЭМ, а в случае атомно-силовых микроскопов – еще и радиусы острия зондов, линейность шкал и неортогональность сканеров. Разработан комплект государственных стандартов из семи документов [3], регламентирующий процедуры калибровки и поверки меры и указанных микроскопов. Мера состоит из пяти групп шаговых структур по три структуры в каждой. На рис. 7 приведено изображение одной из шаговых структур. Структура состоит из 11 канавок с трапецевидным профилем в кремнии. Мера имеет следующие параметры: ширина линии – 30–1500 нм; высота рельефа – 100–1500 нм, погрешность аттестации – шаг  $\pm 1$  нм; ширина линии  $\pm 1$  нм; высота рельефа  $\pm 1$  %.

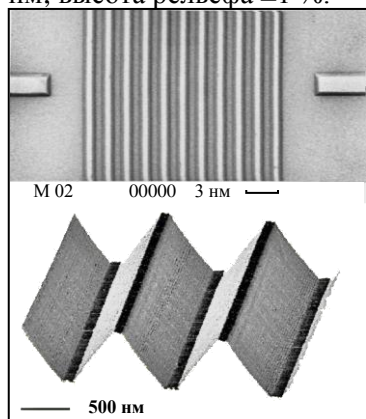


Рис. 7. Шаговая структура меры МШПС-2.0К и ее трехмерный профиль

Все эталонные меры ширины линии имеют неопределенность и точность поверки. Погрешность измерений на неизвестном образце – это комбинация точности эталонной меры, используемой для поверки, неопределенности калибровки с использованием меры и неопределенности измерений неизвестного образца. Поэтому

точность пользовательских измерений образца не может превысить точность мер малой длины.

## ВЫВОДЫ

В практике калибровки с применением мер малой длины пользователям измерительного оборудования следует учитывать следующее.

1. Меры малой длины используют для определения мультипликативной и аддитивной поправок, которые применяют для коррекции метрологических данных в пределах номинального диапазона характеристик эталонной меры. Поправки можно формировать для каждой новой меры малой длины и использовать в соответствии с измеряемым образцом. Современные установки контроля микроразмеров имеют программную поддержку формирования, хранения и автоматического учета массивов поправок.

2. Область применимости калибровки систем, работающих по методу микроскопии, существенно ограничивает различие физических характеристик меры малой длины и реальных объектов. В их число входят высота перехода линия – промежуток, угол наклона этого перехода, коэффициент преломления маскирующего покрытия и подложки, коэффициент отражения от поверхности линии и промежутка. Этот факт показывает необходимость иметь свою меру малой длины для элементов, различающихся физическими характеристиками. Указанием на то, что свойства меры и пользовательского образца значительно отличаются, является заметное различие форм их профилей интенсивности в области изображения края элемента. Этого недостатка лишены методы контроля, не использующие изображение для определения размера, а построенные на принципах непосредственного взаимодействия (контакта) с измеряемым элементом, как, например, различные варианты атомно-силовой микроскопии.

3. Необходимо сохранять постоянство параметров измерительного оборудования при измерениях такими, какими они были при калибровке. Например, для микроскопии это апертура объектива и осветителя, режим освещения, диапазон длин волн, равномерность освещенности в поле измерений. В связи с этим любое вмешательство в настройки и регулировки этих параметров влечет за собой новую калибровку системы. Для точных измерений рекомендуется проводить калибровку после замены и регулировки

положения лампы осветителя. Для зондовых методов измерений важно следить за изменением параметров зонда (износом).

4. При наличии на мере малой длины двух или более калиброванных значений ширины линий в области предельного разрешения объектива, где поведение методической погрешности принимает нелинейный характер, с целью расширения диапазона измерений рекомендуется использовать алгоритм многоточечной калибровки МРС.

5. Для наилучшей реализации калибровки и унификации выполняемых действий рекомендуется разработать методику калибровки, в ко-

торой будет изложена установленная совокупность операций, условий и правил, выполнение которых обеспечивает получение наилучших результатов калибровки согласно данному методу измерений, используемому измерительному оборудованию и мерам малой длины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. [https://www.nist.gov/srmors/certificates/view\\_certGIF.cfm?certificate=2059](https://www.nist.gov/srmors/certificates/view_certGIF.cfm?certificate=2059)
2. **Тодуа, П. А.** Метрология в нанотехнологии / П. А. Тодуа // Российские нанотехнологии. – 2007. – Т. 2, № 1–2. – С. 61–69.
3. <http://www.gostbaza.ru/?a=001.017.040.001>

Поступила 27.12.2011