

УДК 621.385.833

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ СВЕРХМАЛЫХ РАЗМЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕР С ПРИРОДНЫМИ КОНСТАНТАМИ

А. И. Козлитин, А. В. Никитин, В. Н. Сretenский

Государственный научно-исследовательский институт физических проблем
им. Ф. В. Лукина, Москва, Россия

*"Наука начинается с тех пор, как
начинают измерять; точная наука
немыслима без меры"*

Д. И. Менделеев

Обсуждаются возможности "безэталонных" методов измерений сверхмалых размеров в растровом электронном микроскопе (РЭМ). Показано, что при использовании теоретических моделей формирования видеосигнала, мер периода и природных констант удается снизить погрешности измерений до нескольких нанометров.

Современные масштабы проведения научно-технического эксперимента и потребности высоких технологий приводят к расширению применения кратных и дольных единиц измерения физических величин. Вследствие этого возрастают трудности обеспечения и поддержания точности инструментальных средств на основе системы эталонов. Значение эталонов и мер определяют общемировую систему метрологического обеспечения и в конечном счете — научно-технический потенциал развитых стран.

Значение эталонов и мер для метрологии было осознано вместе с зарождением самой метрологии как науки и практической деятельности. Основоположник отечественной метрологии Д. И. Менделеев писал: "Точная наука немыслима без меры" [1]. Еще ранее Ф. И. Петрушевский определял метрологию как "описание всякого рода мер" [2]. Известны также высказывания по этому поводу М. Ф. Маликова, К. П. Широкова и других метрологов, относящих эталоны и меры к основным проблемам метрологии. Наша страна располагает около полутора сотнями мер, имеющих статус Государственных эталонов, и неизмеримо большим числом образцовых и рабочих мер различных разрядов. Вместе с тем эффективность применения эталонов и мер зависит от их количества, вовлекаемого в контрольно-измерительные процедуры, причем эта зависимость отображается кривой с минимумом [3]. Это означает, что использование как слишком малой, так и чрезмерно обширной системы эталонов и мер приводит к неоправданным затратам ресурсов и общему снижению эффективности метрологического обеспечения.

Воспроизведение и особенно передача размера физических величин от эталона к рабочим средствам измерений в условиях массового производства становится весьма сложной, дорогостоящей процедурой, требующей к тому же значительных затрат времени и плохо поддающейся автоматизации, что не соответствует требованиям современных автоматизированных технологических процессов.

Рассмотрим, сколько и каких эталонов или мер необходимо использовать для достижения наибольшей эффективности в каждом случае? Ответ на этот вопрос зависит от принятого способа использования эталонов (мер), как это показано ниже на примере измерений малых линейных размеров, таких, как элементы интегральных схем (ИС).

Можно указать два варианта использования эталонов (мер) в рамках метрологического обеспечения измерений и контроля элементов ИС в процессе их изготовления: для проведения собственно измерительных процедур и для определения масштаба увеличения измерительного микроскопа. Соответственно этому используемые эталоны (меры) можно разделить на две группы: меры "ширины линий" (linewidth standards) и меры "периода" или "штриховые" меры (pitch standards). Меры первой группы обычно представляют собой пластины из стекла или иного материала (например, монокристаллического кремния), на поверхности которых сформированы полоски различной ширины иной природы (хром, тантал и т. п.). Номинальные значения ширины полосок определены независимым способом с высокой точностью. Качество таких мер определяется в основном диапазоном имеющихся номинальных значений ширины, а также погрешностью аттестации этих номиналов. Современные высококачественные меры ширины охватывают диапазон 0,5—30,0 мкм и характеризуются погрешностью аттестации около $\pm 0,025$ мкм [4]. Создание подобных мер представляет собой сложную техническую и технологическую задачу; такие меры существуют в ограниченном числе экземпляров, а некоторые из них почти уникальны. Поэтому хорошие меры "ширины линий" обычно дороги и малодоступны массовому пользователю.

Меры "периода" или "штриховые" меры проще в изготовлении и, особенно, при проведении их аттестации. Наиболее часто в качестве таких мер используются дифракционные решетки (ДР), изготавливаемые голографическим способом [5].

Рассмотрим два наиболее распространенных приема использования мер при проведении измерений малых линейных размеров.

Непосредственное использование мер в процедуре измерений

В этом варианте предусматриваются использование мер ширины и работа измерительного микроскопа (оптического — ОМ, растрового электронного — РЭМ, сканирующего туннельного — СТМ, атомно-силового — АСМ или какого-либо иного) в режиме "инструмента сравнения". Предполагается, что контролируемый объект и мера измеряются последовательно и в идентичных условиях, с использованием одного и того же алгоритма. Полученные значения размера меры L_m и объекта L_o , выраженные в произвольных единицах (чаще всего числом элементов разложения изображения или числом пикселей), связаны с действительным размером объекта L_x пропорцией:

$$L_m / \Pi = L_o / L_x, \quad (1)$$

где Π — паспортный размер меры.

При этом не возникает необходимости определять в явном виде масштаб увеличения микроскопа, поскольку отношение L_m / Π и есть тот самый масштаб.

Приведенное соотношение, однако, не является строгим. Оно выполняется только тогда, когда все существенные для выбранного типа микроскопии характеристики объекта и меры вполне идентичны друг другу. Это относится в первую очередь к геометрическим характеристикам пары объект — мера: наличию и величине рельефа, форме склонов. Для оптической микроскопии, например, требуется дополнительно обеспечить идентичность коэффициентов прозрачности (или отражения) измеряемого элемента и окружающего его "поля" для указанной пары. Последние величины зависят от природы материалов, использованных для изготовления меры и измеряемого образца, но даже при идентич-

ности материалов коэффициенты отражения (прозрачности) зависят также от технологии изготовления: зернистости нанесенных слоев, наличия, природы и толщины поверхностных загрязнений и других факторов. Сходные проблемы возникают и для таких видов микроскопии, как РЭМ, СТМ, АСМ. Понятно, что строгое выполнение условий идентичности всех характеристик объекта и меры — практически не удается реализовать, и потому использование вышеприведенного соотношения оказывается проблематичным.

В этих условиях для реализации метода измерений с непосредственным использованием стандартов (мер) можно обсуждать лишь два варианта: либо необходимо иметь на каждом рабочем месте не единичную меру, но систему мер, изготовленных, например, из разнородных материалов, с различной глубиной рельефа и разными формами склонов, либо создать систему поправок, корректирующих результаты измерений по формуле в зависимости от особенностей измеряемого образца. Первый вариант труднореализуем, поскольку требует изготовления обширной номенклатуры мер ширины линии для каждого рабочего места проведения измерений. С учетом сказанного такая задача вряд ли может считаться разрешимой даже в обозримом будущем. Второй вариант выглядит более привлекательно. Однако необходимая система поправок может быть создана лишь в результате систематических исследований влияния разнородных, перечисленных выше факторов на структуру изображения. Мы полагаем, что такие исследования целесообразно проводить на основе методов математического моделирования процессов формирования изображений, реализуемых в той или иной разновидности микроскопии. Естественно, что в основе таких исследований должна лежать развитая теория формирования соответствующих изображений.

Таким образом, рассматриваемая стратегия непосредственного использования мер в процессе измерений предполагает наличие теории формирования изображений, соответствующих математических моделей и следующих из них закономерностей, формализованных в виде системы поправок. В данном случае адекватная математическая модель в известном смысле заменяет сколь угодно широкую систему материальных мер или стандартов. Возможен, однако, и иной способ использования выводов теории формирования изображений.

Если модели формирования изображений для того или иного вида микроскопии уже разработаны, то, как будет показано ниже, возможно их использование для развития так называемых "безэталонных" методов измерений.

"Безэталонный" метод измерений размеров с использованием природных констант

В развитом виде теория формирования изображения и соответствующая модель, например, модель формирования РЭМ-изображений в обратно рассеянных электронах [6], позволяет с высокой точностью локализовать края измеряемого объекта на его увеличенном и неизбежно искаженном изображении. Расстояние между зафиксированными таким образом краями и есть размер изображения, определяемый с точностью, зависящей от корректности теории и следующих из нее алгоритмов локализации края. Найденный в такой процедуре размер изображения следует лишь пересчитать в размер объекта, для чего необходимо знать увеличение микроскопа. В работе [7] установлено, что эта последняя задача не является слишком сложной. Масштаб увеличения растрового электронного микроскопа (РЭМ), так же, как и ОМ, СТМ или АСМ, можно определять с помощью мер ширины, но, как показано в [7], он определяется проще и точнее при использовании в качестве меры голографической дифракционной решетки (ДР). Для этого достаточно знать с необходимой точностью лишь две ее основные характеристики: среднее значение периода T и вероятный разброс σ (T) индивидуальных значений периода.

Среднее значение периода определяется в стандартном дифракционном эксперименте с погрешностью ΔT , причем эта погрешность обычно не превосходит $10^{-4} \div 10^{-5}$ от номинала. Однако следует быть осмотрительным, чтобы не попасть "в ловушку" при оценке разброса. Суть этой "ловушки" состоит в том, что разброс индивидуальных значений периода невозможно определить из этих же данных, поскольку вычисляемая в дифрактометрическом эксперименте погрешность ΔT среднего значения периода T не является среднеквадратичным отклонением (СКО), как это принято, например, авторами работ [8, 9].

Действительно, отношение $\lambda/\Delta\lambda$, так же, как и практически равное ему отношение $T/\Delta T$, характеризует разрешающую силу ДР и равно произведению порядка дифракции на полное число штрихов ДР, участвующих в дифракции. Указанные отношения не содержат информации о разбросе периода ДР. Здесь ΔT — минимальная разница периодов двух различных ДР, дифракционные максимумы которых разрешаются по критерию Рэлея. Отношения $\lambda/\Delta\lambda$ и $T/\Delta T$, как и входящие в них величины, не зависят от разброса индивидуальных значений периода решетки [10, 11]. Поэтому рекомендации авторов [8, 9] по вычислению разброса индивидуальных значений периода, исходя из дифрактометрической погрешности ΔT , следует признать несостоятельными, и эту характеристику ДР приходится вычислять в ходе прямых измерений индивидуальных значений периода и последующей стандартной статистической обработки результатов.

Подобные эксперименты были проделаны с одним из образцов голографической ДР. Полученные результаты свидетельствуют, что разброс (σ) индивидуальных значений периода использованного экземпляра голографической ДР составляет примерно 1 %, а разброс средних значений периода, усредненных по 3000—5000 индивидуальным измерениям, не превышает 0,1 % (3σ).

Исследована также однородность периода решетки на поле 10 мм^2 (по углам и в центре поля). Разброс усредненных значений периода оказался менее 0,04 %. Полученные данные показывают, что с помощью голографической ДР можно осуществлять точную калибровку с погрешностью, по крайней мере, не более нескольких десятых долей процента.

Таким образом, можно было бы говорить, что на этом пути проведения измерений какие-либо меры ширины линии не являются необходимыми. Это действительно так, но с одной оговоркой. Для проведения измерений подобным "безэталонным" способом нужно быть уверенным, что используемые алгоритмы локализации края являются достаточно точными. Аргументом в пользу этого могут служить обоснованность физических представлений, заложенных в модель, и корректность ее математического описания. Но прямым доказательством работоспособности конкретного "безэталонного" метода измерений может стать лишь его экспериментальная проверка — по результатам измерений именно мер или эталонов ширины линии.

Заметим, что использованный выше термин "безэталонные методы" в действительности весьма неточен. Фактически при проведении каждого измерения таким "безэталонным" методом эталон присутствует. Таким эталоном служит природная константа — длина волны лазерного излучения, с помощью которого в дифракционном эксперименте аттестуется среднее значение периода ДР. Фундаментальным свойством подобных мер с природными константами является обеспечение заданной точности измерений, например, при использовании приемов самокалибровки [12].

В описанной процедуре указанная длина волны передается на материальный носитель — ДР и определяет в абсолютных единицах именно среднее значение ее периода.

В работе [13] описан один из таких "безэталонных" методов — метод измерений размеров субмикронных элементов в РЭМ с использованием "инвариантных точек" на видеосигнале. Результаты измерений мер, полученные в автоматизированном режиме, приведены в таблице.

Результаты измерений щелевых мер

Номинальная ширина, нм	Среднее измеренное значение, нм	Расхождение, нм	СКО среднего, нм
98,9	99,6	+0,7	0,25
150,7	148,7	-2,7	0,28
369,7	374,5	+5,2	0,36
434,7	439,3	+4,6	0,32

Из таблицы следует, что в диапазоне размеров 0,1—0,5 мкм стандартное отклонение среднего по 512 измерениям оказалось менее 0,4 нм, а неисключенная систематическая погрешность составила 1—6 нм. Эти данные, характеризующие методическую погрешность метода, можно рассматривать в качестве прямого доказательства корректности использованных моделей и достоверности алгоритмов локализации края, по крайней мере, в пределах указанных погрешностей.

Такая организация "безэталонных" измерений имеет ряд очевидных преимуществ. Прежде всего, не возникает необходимости тиражирования дорогих и трудоемких в изготовлении комплектов мер ширины для оснащения ими каждого рабочего места. Достаточно воспользоваться их единичными (уникальными) экземплярами (только на стадии отработки и испытаний метода). Необходимую калибровку увеличения микроскопа несложно выполнить в соответствии с [7] по голографической ДР, которая является широко доступным и дешевым тест-объектом.

Кроме того, при проведении испытаний метода и определении его методической погрешности нет необходимости использовать систему мер различной природы и геометрии. Можно предположить, что использование для этих целей мер ширины различной природы приведет и к различающимся точностным характеристикам метода. Однако поскольку в используемых теоретических моделях учитываются все существенные особенности меры, то нет оснований ожидать значительных вариаций методической погрешности при замене меры. Тем не менее, повторные испытания метода следует считать желательными, и их проведение можно осуществлять по мере разработок новых экземпляров мер различной природы.

Автоматизированные методы измерения сверхмалых линейных размеров, созданные применительно к изделиям микроэлектроники и основанные на разработанных математических моделях с использованием априорных достоверных данных и природных констант (в данном случае скорости света и связанной с ней длиной световой волны), оказываются технически и экономически целесообразными и являются доступными для обслуживающего персонала средней квалификации. Используемые модели базируются на современных представлениях физики твердого тела и они совершенствуются по мере уточнения входящих в них констант.

Таким образом "безэталонные" методы измерений размеров могут считаться перспективными для проведения измерительных и контрольных процедур в лабораторных и промышленных условиях. Имеется возможность реализации принципа автономности (децентрализации) [3] метрологического обеспечения массо-

вых измерений сверхмалых геометрических размеров в производстве изделий микроэлектроники и в других отраслях, использующих "высокие технологии".

Литература

1. Менделеев Д. И. Сочинения. Т. XXII. Метрологические работы. — Л. — М.: Изд-во АН СССР, 1950. — 866 с.
2. Петрушевский Ф. И. Метрология, или описание мер, весов, монет и времени счисления. — С.-Петербург: Типография Департамента народного просвещения, 1831. — 365 с.
3. Сретенский В. Н. Природные константы и их значение для развития техники высокоточных измерений//Электронная пром-сть, 1985. № 3. С. 9—12.
4. Lagrabe R. D. Submicrometer optical linewidth metrology//Proc. of SPIE, 1987. V. 775, P. 46—49.
5. Francón M. Holographie//Masson et Cie Editeurs. — Paris, 1969.
6. Козлитин А. И., Никитин А. В. Модель формирования РЭМ-изображения в отраженных электронах//Измерительная техника, 1995. № 2, С. 21—24.
7. Козлитин А. И., Никитин А. В., Репин О. И. Дифракционная решетка как мера для калибровки, увеличения растрового электронного микроскопа//Там же, № 9. С. 33—35.
8. Новиков Ю. А., Раков А. В., Стеколин И. Ю. Оптическая дифракционная решетка как эталонная мера для растрового электронного микроскопа//Известия АН. Сер. Физическая, 1993. Т. 57. № 8. С. 79—83.
9. Новиков Ю. А., Раков А. В., Стеколин И. Ю. Калибровка РЭМ с помощью шаговых структур//Измерительная техника, 1995. № 2. С. 64—66.
10. Born M., Wolf E. Principles of Optics //Pergamon Press. — Oxford, London, Edinburgh, New York, Paris, Frankfurt, 1968. — 720 p.
11. Ландсберг Г. С. Оптика. — М.: Наука, 1976. — 928 с.
12. Волков В. В., Масалов В. В., Сретенский В. Н. Возможности самокалибровки измерительных устройств с использованием квантовых мер и микропроцессоров//Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1992. Вып. 1. С. 52—55.
13. Амосов Р. М., Козлитин А. И., Никитин А. В. Метод прецизионных измерений субмикронных и нанометровых объектов в РЭМ// Электронная пром-сть, 1994. № 7—8. С. 163—168.

THE ACCURACY WARRANTY IN AUTOMATIZED MEASUREMENTS OF ULTRA SMALL FEATURES BY USING OF THEORETICAL MODELS, MEASURES AND NATURAL CONSTANTS

A. I. Kozlitin, A. V. Nikitin, V. N. Sretensky

Lookin's Government Research Institute of Physical Problem, Moscow, Russia

The possibilities of "standardless" method for measurements of ultra-small features in Scanning Electron Microscope (SEM) are discussed.

It is shown that measurement errors may be decreased up to several nanometers by using of theoretical model for videosignal simulation, pitch standards and natural constants.