

Выбор оптимальных параметров электронного зонда растрового электронного микроскопа при измерении геометрических параметров объектов методом дефокусировки зонда

В. В. АЛЬЗОБА*, А. Ю. КУЗИН*, Ю. В. ЛАРИОНОВ**, А. В. РАКОВ*,
П. А. ТОДУА*, М. Н. ФИЛИППОВ***

* Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума, Москва, Россия, e-mail: fgupnicpv@mail.ru

** Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия, e-mail: luv@kapella.gpi.ru

*** Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Москва, Россия, e-mail: fil@igic.ras.ru

Проведена оценка методической погрешности измерений геометрических параметров объектов методом дефокусировки электронного зонда растрового электронного микроскопа, обусловленной зависимостью результата измерений от параметров зонда. Показано, что эта погрешность может быть уменьшена путем выбора оптимальных параметров зонда, при которых реальные условия измерений в наилучшей степени соответствуют требованиям расчетной модели.

Ключевые слова: растровый электронный микроскоп, метод дефокусировки.

An estimation of methodological error of object geometrical parameters measurements using the scanning electron microscope (SEM) electron probe defocusing method was carried out. This error caused by the dependence of measurement result on the probe parameters. It is shown that this error can be reduced to the level of random error by choosing of optimal parameters of the probe.

Key words: scanning electron microscope, defocusing method.

Измерение геометрических параметров объектов с малыми размерами с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) проводят на основе анализа кривой видеосигнала (ВС), получаемой при сканировании этих объектов электронным зондом. Амплитуда ВС в каждой точке сканирования определяется числом медленных вторичных электронов (МВЭ), возникающих в результате облучения каждой из этих точек электронным зондом.

Наиболее важные величины, которые необходимо учитывать при создании программы расчета кривых ВС, связаны и с деталями геометрического профиля объекта, и с параметрами самого РЭМ. К первой группе относятся высота объекта, угол наклона боковой стенки к основанию рельефного элемента, радиусы закругления около верхнего и нижнего оснований этого элемента, неровность или шероховатость боковых стенок, зарядовые эффекты при наличии даже относительно тонких диэлектрических пленок. Основные параметры РЭМ, определяющие форму кривых ВС, — диаметр зонда и энергия электронов в пучке. Однако точные расчеты по моделированию выхода из поверхности МВЭ довольно сложны и трудоемки [1]. Поэтому часто при решении прямой задачи используют упрощения. Например, заменяют расчетные данные набором экспериментальных, полученных от реальных объектов при дискретном изменении их различных геометрических параметров. Применение библиотеки данных, полученных при дискретном варьировании геометрических параметров измеряемого объекта и параметров зонда, усложняет расчеты при решении обрат-

ной задачи и может привести к возникновению методической погрешности. В целом, измерения данным методом сложны и трудоемки для практического использования.

Существует альтернативный метод измерений, в котором сложности расчета в значительной степени преодолены [2]. Предполагается, что форма сечения зонда представляет квадрат, а плотность электронов одинакова по всему его сечению. Для такой формы зонда вводится понятие эффективного диаметра $D_{эфф}$ [2]. При токе модельного зонда, равном току зонда в эксперименте, $D_{эфф}$ равен стороне квадрата сечения зонда [2]. При указанных допущениях геометрические размеры объекта можно определять по соответствию расстояний между характерными точками на кривой ВС (например, между максимумами) и значениями геометрических параметров измеряемой структуры (ширины верхнего и нижнего оснований, ширины проекции боковых стенок), если известен $D_{эфф}$ зонда. Однако уже при незначительных отличиях профилей сечения объекта и зонда от модельных в результатах измерений таким методом возникает неопределенность, которую сложно оценить без использования альтернативного метода измерений. К настоящему времени разработано несколько разновидностей указанного метода измерений [3, 4], однако все они основаны на одинаковых модельных приближениях.

Один из упомянутых выше приближенных методов измерений базируется на последовательном сканировании объекта в РЭМ электронным зондом при различных значениях его диаметра. Это достигается его последовательной

дефокусировкой (в дальнейшем — метод дефокусировки) [3]. При этом предполагается, что характер изменения кривой ВС при последовательном изменении диаметра зонда от дефокусированного состояния к оптимальному фокусу позволяет предсказать положение характерных точек на кривой ВС при стремлении диаметра к нулевому значению. В этом случае отличие модельной функции формы плотности электронов зонда от реальной становится малозначительным. Получив в результате такой операции положение характерных точек на кривой ВС при нулевом диаметре, можно определить и геометрические размеры объекта потенциально с большей точностью, чем по характерным точкам кривой ВС, зафиксированной при ограниченном диаметре зонда. Однако допущения, используемые в методе дефокусировки относительно объекта измерений и параметров зонда, способны привести к методической погрешности измерений.

Цель данной работы — оценка методической погрешности измерений геометрических параметров объектов в РЭМ методом дефокусировки, обусловленной зависимостью результата измерений от параметров зонда, и выбор оптимальных значений этих параметров, позволяющих уменьшить указанную погрешность.

Условия эксперимента. Объекты измерений формировали с помощью анизотропного травления [5]. В результате образовывались выступы сечением в форме правильной трапеции, при этом высота ступеньки h оказалась порядка 500 нм. Наклон боковых стенок к основаниям трапеции определяется расположением кристаллографических плоскостей в кремнии и поэтому воспроизводится с высокой точностью. Топология размещения объектов на поверхности кремниевой пластины представляла набор шаговых структур с одинаковым значением шага (номинально 2000 нм), но с разными размерами ширины выступов. Высокая технологическая воспроизводимость значения шага на уровне нескольких единиц нанометров позволила использовать эту величину для калибровки увеличения РЭМ. Большая часть измерений для выбранных шаговых структур проводилась с помощью РЭМ S-4800 (фирма Hitachi), оснащенного автоэмиссионным катодом. Для получения РЭМ-изображений в режиме вторичной электронной эмиссии использовали электронный зонд с энергией электронов более 15 кэВ, увеличение РЭМ составляло, как правило, 90к, рабочий отрезок в большинстве экспериментов 6,0 мм.

В ходе реализации указанного метода измерений дефокусировкой фиксировали форму нескольких кривых ВС для разных положений фокуса электронного зонда. После этого на каждой кривой ВС выделяли пару характерных точек, в которых достигаются максимумы амплитуды ВС. Далее проводили измерение расстояний между этими точками L_p для различных значений $D_{эфф}$

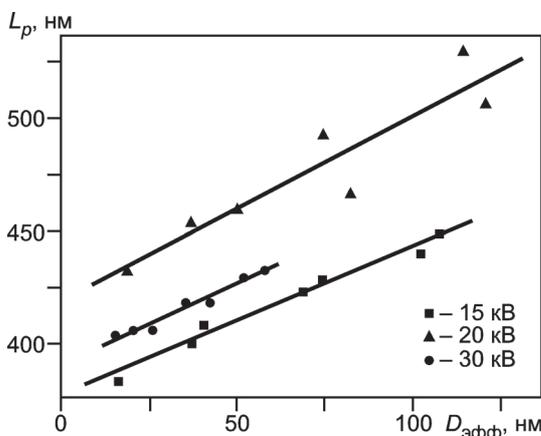


Рис. 1. Зависимость $L_p(D_{эфф})$, полученная для трех значений ускоряющего напряжения

пучка. Значение $D_{эфф}$ также определялось по расстоянию между характерными точками на кривой ВС [2]. В дальнейшем проводилось построение графической зависимости $L_p(D_{эфф})$, ее аппроксимация в виде прямой линии $L_p(D_{эфф})$ и экстраполяция этой прямой к оси ординат. В [3] постулируется и экспериментально подтверждается, что экстраполяция этой зависимости к значению $D_{эфф} = 0$ позволяет определить верхнее основание элемента профиля трапецеидального элемента u_p . По аналогичной зависимости расстояния между другой парой характерных точек кривой ВС G_p , определяемых пересечением боковых участков кривой ВС и уровня фона для этой кривой, от $D_{эфф}$ можно измерить также и ширину нижнего основания трапеции b_p [3]. Этот алгоритм определения размеров нанообъектов основан на общем для всей группы упрощенных методов измерений представлении о зависимости расстояния между характерными точками на кривой ВС и эффективным диаметром зонда в виде

$$L_p(D_{эфф}) = u_p/m + D_{эфф}; \quad (1)$$

$$G_p(D_{эфф}) = b_p/m + D_{эфф}. \quad (2)$$

В методе дефокусировки использование выражений (1) и (2) позволяет определить параметры трапеции при значении $D_{эфф} = 0$. Одинаковый характер зависимости в функциях $L_p(D_{эфф})$, $G_p(D_{эфф})$ свидетельствует о том, что для указанной группы методов ширина проекции боковой стенки трапеции s не зависит от $D_{эфф}$.

Результаты экспериментов. Одним из источников методической погрешности измерений геометрических параметров измеряемых объектов может быть вариация параметров электронного зонда. Рассмотрим влияние изменения энергии электронов зонда на результат измерений ширины верхнего основания трапеции. На рис. 1 показана зависимость $L_p(D_{эфф})$, полученная при нескольких значениях энергии электронов в пучке. Как видно, разница в значениях $L_p(0)$ при различных значениях энергии электронов может достигать порядка 43 нм, что заметно выше среднего квадратического отклонения (СКО) в значениях средних размеров ширины верхнего основания (порядка 10 нм).

Эта составляющая методической погрешности измерений может быть уменьшена, если из набора полученных

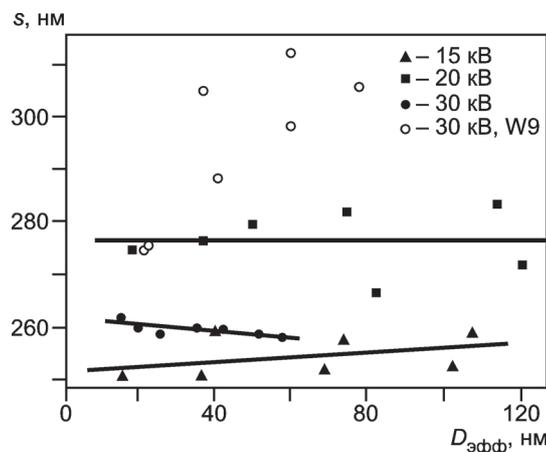


Рис. 2. Зависимость ширины проекции боковой стенки от эффективного диаметра $s(D_{эфф})$ при нескольких ускоряющих напряжениях и рабочего отрезка

данных будут исключены те, которые в меньшей степени удовлетворяют требованиям используемой модели расчетов. Такой подход позволяет выбрать во всем диапазоне изменения параметров зонда такие их оптимальные значения, которые и необходимо использовать при измерениях геометрических параметров объекта. Как было указано выше, одним из критериев соответствия модели условиям измерений является независимость определяемого значения ширины проекции боковой стенки s от диаметра зонда. На рис. 2 показаны зависимости $s(D_{эфф})$, полученные для того же образца при тех же значениях энергии электронов.

Три кривые $s(D_{эфф})$, полученные при энергиях электронов 15, 20 и 30 кэВ, на рис. 2 соответствуют зависимостям $L_p(D_{эфф})$ на рис. 1. Как видно, все они близки к горизонтальным прямым линиям, т. е. зависимость ширины проекции боковой стенки от эффективного диаметра проявляется слабо. Это не дает возможность выбрать оптимальное значение энергии электронов, наиболее соответствующей используемой модели. На рис. 2 показана также зависимость $s(D_{эфф})$, полученная при энергии электронов зонда 30 кэВ, но при значении рабочего отрезка 9 мм (вместо 6 мм для всех других зависимостей, данные измерений показаны кружочками). Видно, что в этом случае отличия зависимости $s(D_{эфф})$ от горизонтальной прямой наиболее заметные. Это означает, что отличия условий измерений в эксперименте от условий, в которых возможно использование модели расчетов, наиболее существенные. Причиной такого вида зависимости $s(D_{эфф})$ в последнем случае может быть изменение формы распределения электронной плотности зонда при его дефокусировке и большом рабочем отрезке.

Другим критерием соответствия экспериментальных условий измерений условиям использования модели расчетов является близость зависимостей $L_p(D_{эфф})$ и $G_p(D_{эфф})$ к прямой линии. В таблице вместе со значениями $L_p(0)$ для трех прямых на рис. 1 показаны соответствующие коэффициенты корреляции Пирсона R для трех наборов данных измерений, полученных при разных энергиях электронов, которые характеризуют близость указанных зависимостей к прямой линии.

Коэффициенты корреляции при различных ускоряющих напряжениях

U , кВ	$L_p(0)$, нм	R
30	390,6	0,985
20	419,5	0,923
15	377,0	0,990

Как видно из таблицы, в наибольшей степени близки к прямой линии зависимости $L_p(D_{эфф})$ при энергиях электронов 15 и 30 кэВ (при значениях $R = 0,98-0,99$). Поэтому значением ширины верхнего основания следует считать среднее их значение 384 нм. Тогда исследуемая составляющая методической погрешности может быть определена как половина разности между значениями $L_p(0)$ при энергиях электронов 15 и 30 кэВ, т. е. ± 7 нм (в относительных единицах около 2 %). Это значение погрешности сопоставимо со значениями СКО среднего значения $L_p(0)$ при различных значениях энергии электронов.

Представленный способ выбора оптимальных параметров электронного зонда, при котором достигается наилуч-

шее соответствие условий проведения измерений условиям использования модели расчетов, был проверен при измерении геометрических параметров объектов с помощью другого РЭМ — JSM-6460LV (Jeol), который имеет термоэмиссионный катод, а также больший диаметр электронного зонда по сравнению с соответствующим параметром РЭМ S4800. Выбранный объект измерений с помощью РЭМ S4800 был также измерен с помощью РЭМ JSM-6460LV (см. рис. 1). Измерения с помощью РЭМ JSM-6460LV проводились при значении рабочего отрезка 6 мм и энергии электронов 20 кэВ при таком же значении тока зонда, что и при измерении с помощью РЭМ JSM-6460LV — 40 нА. На рис. 3 показана зависимость $L_p(D_{эфф})$, полученная с помощью РЭМ JSM-6460LV. Как видно, зависимость в этом случае не является монотонной, что свидетельствует о несоответствии условий измерений — области применимости модели измерений. Заметим, что наибольшие значения диаметра зонда на рис. 1 (более 60 нм) находятся внутри диапазона изменения диаметра на рис. 3. Таким образом, относительно большие значения диаметра электронного зонда в РЭМ JSM-6460LV не могут быть ответственными за немонотонный характер зависимости $L_p(D_{эфф})$. По-видимому, причина немонотонного характера изменения $L_p(D_{эфф})$ связана с изменением распределения плотности электронов в электронном зонде в РЭМ JSM-6460LV при его дефокусировке. Следовательно, использовать метод дефокусировки для измерения геометрических параметров объектов с малыми размерами можно не на всех типах РЭМ.

Выводы. Установлено, что при измерениях геометрических параметров объектов в РЭМ с помощью метода дефокусировки (одного из приближенных косвенных методов измерений) возникает методическая погрешность, обусловленная зависимостью результата измерений от параметров зонда — энергии электронов и рабочего отрезка. Для некоторых РЭМ величина этой погрешности может быть настолько большой, что использование их для реализации метода дефокусировки оказывается невозможным. Для других РЭМ значение этой погрешности может быть уменьшено до уровня случайной погрешности измерений геометрических параметров объекта (5—10 нм) при оптимизации параметров электронного зонда. Выбор оптимальных параметров зонда основан на использовании критериев соответствия

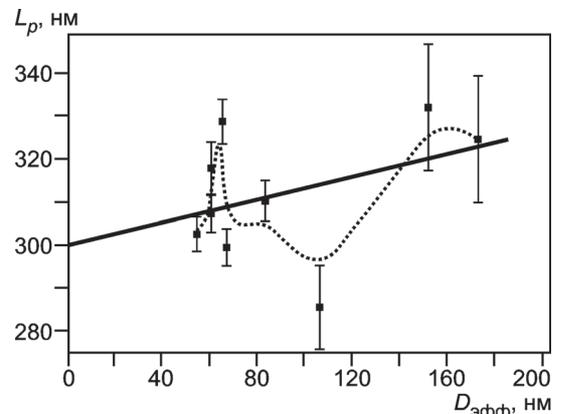


Рис. 3. Зависимость $L_p(D_{эфф})$, полученная с помощью РЭМ JSM-6460LV

полученных экспериментальных зависимостей (расстояний между характерными точками на кривой видеосигнала от эффективного диаметра зонда) характеру изменения этих зависимостей в случае соответствия реальных профилей сечения объекта и формы плотности электронов зонда модельным. Предложенные критерии выбора оптимальных параметров зонда могут быть использованы также для оценки пригодности РЭМ для реализации метода дефокусировки.

Работа проводилась при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации с использованием оборудования Центров коллективного пользования МФТИ и НИЦГВ (госконтракт № 16.552.11.7038).

Литература

1. **David C. Joy** Monte Carlo modeling for electron microscopy and microanalysis. Oxford: Oxford University Press, 1995.

2. **Волк Ч. П. и др.** Проблемы измерения геометрических характеристик электронного зонда растрового электронного микроскопа // Линейные измерения микрометрового и нанометрового диапазонов в микроэлектронике и нанотехнологии. Труды ИОФАН. М.: Наука, 2006. С. 77—120.

3. **Filippov M. N. e. a.** SEM probe defocusing method of measurement of linear sizes of nanorelief elements // Proc. SPIE. 2010. V. 7521. P. 7521161-9.

4. **Данилова М. А. и др.** Тест-объект с шириной линии менее 10 нм для растровой электронной микроскопии // Измерительная техника. 2008. № 8. С. 20—23; **Danilova M. A. e. a.** A test object with a line width less than 10 nm for scanning electron microscopy // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 8. P. 839—843.

5. **Novikov Yu. A. e. a.** Test objects with right-angled and trapezoidal profiles of the relief elements // Proc. SPIE. 2008. V. 7042. P. 704208-1 — 704208-12.

Дата принятия 18.10.2011 г.

535.6+621.398

Искусственные нейронные сети в цветовых измерениях

В. А. СОЛОВЬЕВ, М. Н. МОРОЗОВА

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия, e-mail: morozova89_89@mail.ru

Предложен интегральный колориметр, работающий на принципах искусственных нейронных сетей. Рассмотрены методы повышения точности воспроизведения относительной спектральной чувствительности измерительных каналов колориметра, которая должна соответствовать функции сложения цветов стандартного наблюдателя в процессе производства.

Ключевые слова: цвет, координаты, интегральный колориметр, нейронные сети, функция сложения цветов стандартного наблюдателя, синаптический коэффициент.

The integral colorimeter working on the principles of artificial neural networks is proposed. Methods of improving the accuracy of reproduction of relative spectral sensitivity of colourimeter measuring channels which should correspond to functions of colour composition of standard observer in the process of manufacturing are considered.

Key words: colour, coordinates, integral colourimeter, neural networks, functions of colour composition of standard observer, synaptic coefficient.

Появление на рынке многоэлементных фотоприемников, в том числе и с цифровым выходом, которые широко используются в оптических приборах, позволило взглянуть на идеологию построения интегральных колориметров с позиций искусственных нейронных сетей. Этому способствовало и то, что механизм цветового зрения человека основан на передаче информации о свете и цвете от множества палочек и колбочек зрительного аппарата к мозгу в результате сложного взаимодействия нейронов.

Интегральные колориметры привлекают разработчиков цветоизмерительной аппаратуры простотой и относительной дешевизной. Их работа базируется на принципе одновременного преобразования фотоприемником световых потоков с различной длиной волны в суммарный фототок. Фотоприемники в интегральном колориметре служат в качестве интеграторов, которые суммируют световые потоки разных длин волн λ , с весовыми коэффициентами, учитыва-

ющими функции сложения цветов стандартного наблюдателя. При этом сигналы U_X , U_Y , U_Z каналов измерения координат X , Y , Z цвета определяются в виде [1]:

$$\begin{aligned} X &= K_X U_X = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_p(\lambda) S_X(\lambda) T_X(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda; \\ Y &= K_Y U_Y = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_p(\lambda) S_Y(\lambda) T_Y(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda; \\ Z &= K_Z U_Z = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_p(\lambda) S_Z(\lambda) T_Z(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (1)$$

где K_X , K_Y , K_Z — коэффициенты передачи по каналам измерения X , Y , Z (устанавливаются при калибровке прибора по