

УДК 537.533.35

*В. В. Альзоба^{1,2}, А. Ю. Кузин¹, Ю. В. Ларионов³, А. В. Раков¹, П. А. Тодуа^{1,2},
М. Н. Филиппов^{1,4}*

¹Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума

²Московский физико-технический институт (государственный университет)

³Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН

⁴Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН

Анализ методической погрешности измерений геометрических параметров объектов в РЭМ методом дефокусировки зонда, обусловленной параметрами зонда

Проведена оценка методической погрешности измерений геометрических параметров объектов методом дефокусировки электронного зонда РЭМ, 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. В результате значение методической погрешности снижается до уровня случайной погрешности измерений (5–10 нм).

Ключевые слова: растровый электронный микроскоп (РЭМ), метод дефокусировки.

1. Введение

Измерение геометрических параметров объектов с малыми размерами с помощью РЭМ производят 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 влияющие 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 основания этого элемента, неровность или «шероховатость» боковых стенок, зарядовые эффекты при наличии даже относительно тонких диэлектрических пленок. Основные параметры РЭМ, определяющие форму кривых ВС, это диаметр зонда и энергия электронов в пучке. Однако точные расчеты по моделированию выхода из поверхности МВЭ [1] являются довольно сложными и трудоемкими. Поэтому часто при решении прямой задачи используют упрощения. Например, заменяют расчетные данные набором экспериментальных данных, полученных от реальных объектов при дискретном изменении различных их геометрических параметров. Использование библиотеки данных, полученных при дискретном варьировании геометрических параметров измеряемого объекта и параметров зонда, усложняет расчеты при решении обратной задачи и способно привести к возникновению методической погрешности. В целом измерения данным методом сложны и трудоемки для практического использования.

Существует альтернативный метод измерений [2], в котором сложности расчета в значительной степени преодолены. Предполагается, что форма сечения зонда представляет собой квадрат, а плотность электронов одинакова по всему его сечению. Для такой формы зонда вводится понятие эффективного диаметра [2]. При токе модельного зонда, равном току зонда в эксперименте, эффективный диаметр D_{ef} равен стороне квадрата сечения зонда [2]. При указанных допущениях геометрические размеры объекта можно относительно

просто определять по соответствию расстояний между характерными точками на кривой ВС (например, между максимумами) и значениями геометрических параметров измеряемой структуры (ширины верхнего основания, ширины проекции боковых стенок, ширины нижнего основания), если известен эффективный диаметр зонда. Однако уже при малых отличиях профиля сечения объекта и профиля сечения зонда от модельных профилей 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 указанных приближенных методов измерений основан 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 малосущественным. 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.

2. Условия эксперимента

Объекты измерений формировали с помощью анизотропного травления [5]. В результате образовывались выступы с сечением в форме правильной трапеции, при этом высота ступеньки h оказалась равной ~ 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 собой 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 нм позволила использовать эту величину для калибровки увеличения РЭМ. Большая часть измерений для выбранных шаговых структур проводилась с помощью РЭМ S-4800 (фирма Hitachi), который оснащен автоэмиссионным катодом. Для получения РЭМ-изображений в режиме вторичной электронной эмиссии использовался электронный зонд с энергией электронов более 15 кэВ, Увеличение РЭМ составляло, как правило, 90 000 крат, рабочий отрезок в большинстве экспериментов – 6.0 мм.

В ходе реализации указанного метода измерений методом дефокусировки 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, производили измерение расстояний между этими точками L_p для различных значений эффективного диаметра пучка D_{ef} . Значение эффективного диаметра также определялось по расстоянию между характерными точками на кривой ВС [2]. В дальнейшем производилось построение графической зависимости $L_p(D_{ef})$, ее аппроксимация в виде прямой линии $L_p(D_{ef})$ и далее – экстраполяция этой прямой к оси ординат. В [3] постулируется и экспериментально подтверждается, что экстраполяция этой зависимости к значению $D_{ef} = 0$ позволяет определить верхнее основание элемента профи-

ля трапецидального 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_{ef} можно измерить также и ширину нижнего основания трапеции b_p [3]. Этот алгоритм определения размеров нанобъектов 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

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

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

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

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

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 $L_p(D_{ef})$, полученная при нескольких значениях энергии электронов в пучке. Как видно, разница в значениях $L_p(0)$ при различных значениях энергии электронов может достигать ~ 43 нм, что заметно выше среднеквадратического отклонения в значениях средних размеров ширины верхнего основания (~ 10 нм).

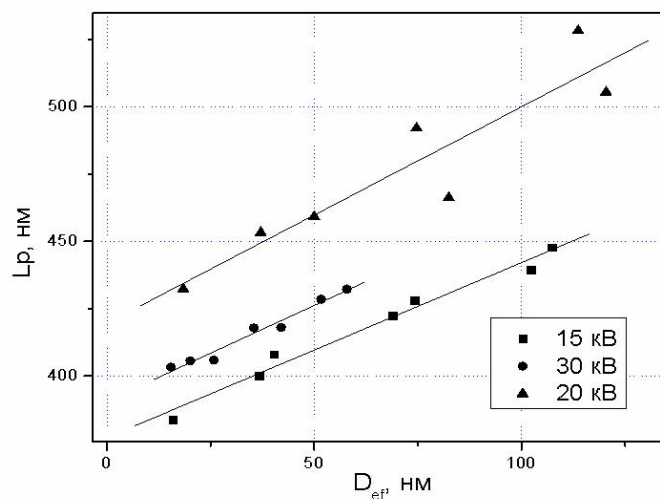


Рис. 1. Зависимость $L_p(D_{ef})$, полученная для трех значений энергии электронов

Эта составляющая методической погрешности измерений может быть уменьшена, если из набора полученных 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 $s(D_{ef})$, полученные для того же образца при тех же значениях энергии электронов.

Три зависимости $s(D_{ef})$, полученные при энергиях электронов 15, 20 и 30 кэВ, рис. 2, соответствуют зависимостям $L_p(D_{ef})$ на рис. 1. Как видно, все они близки к горизонтальным прямым линиям, т.е. ширины проекции боковой стенки от эффективного диаметра проявляется слабо. Это не дает возможности произвести эффективный выбор оптимального значения энергии электронов, в наилучшей степени соответствующей используемой модели. На рис. 2 показана также зависимость $s(D_{ef})$, 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 $s(D_{ef})$ от горизонтальной прямой наиболее заметны. Это означает, что отличия условий измерений в эксперименте от условий, в которых возможно использование модели расчетов, наиболее существенные. Возможной причиной такого вида зависимости $s(D_{ef})$ в последнем случае может быть изменение формы распределения электронной плотности зонда при его дефокусировке и большом рабочем отрезке.

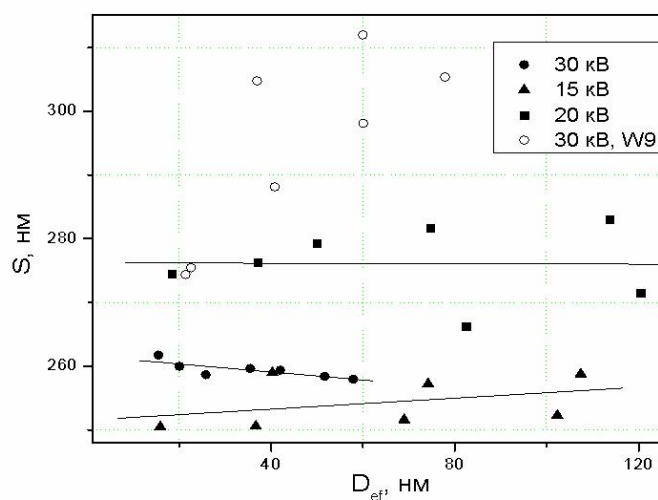


Рис. 2. Зависимость ширины проекции боковой стенки от эффективного диаметра $s(D_{ef})$ при нескольких энергиях электронов зонда и рабочего отрезка

Другим критерием соответствия экспериментальных условий измерений условиям использования модели расчетов является близость зависимостей $L_p(D_{ef})$ и $G_p(D_{ef})$ к прямой линии. В табл. 1 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.

Т а б л и ц а 1

Коэффициенты корреляции при различных ускоряющих напряжениях

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

Как видно из табл. 1, в наибольшей степени близки к прямой линии зависимости $L_p(D_{ef})$ при энергиях электронов 15 кэВ и 30 кэВ (при значениях коэффициента корреляции 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 кВ, т.е. ± 7 нм (в относительных единицах около 2 %). Это значение погрешности сопоставимо со значениями среднеквадратичного отклонения среднего значения $L_p(0)$ при различных значениях энергии электронов.

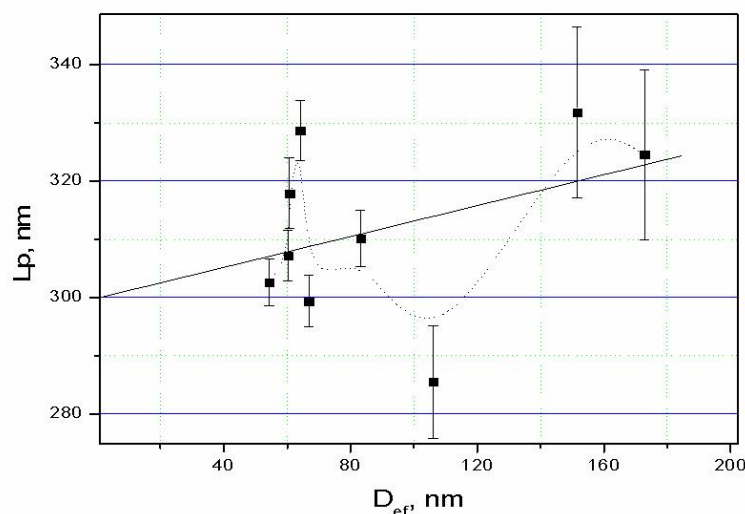


Рис. 3. Зависимость $L_p(D_{ef})$, полученная с помощью РЭМ JSM-6460LV

Представленный способ выбора оптимальных параметров электронного зонда, при котором достигается наилучшее соответствие условий проведения измерений условиям использования модели расчетов, был проверен при измерении геометрических параметров объектов с помощью другого РЭМ, JSM-6460LV (Jeol). РЭМ JSM-6460LV имеет термоэмиссионный катод, а также относительно 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 JSM-6460LV проводились при значении рабочего отрезка 6 мм и энергии электронов $U = 20$ кэВ при таком же значении тока зонда, что и при измерении с помощью РЭМ JSM-6460LV – 40 пА. На рис. 3 показана зависимость $L_p(D_{ef})$, полученная с помощью РЭМ JSM-6460LV. Как видно, эта зависимость в таком 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. Следовательно, относительно большие значения диаметра электронного зонда в РЭМ JSM-6460LV не могут быть ответственными за немонотонный характер зависимости $L_p(D_{ef})$. По-видимому, причина немонотонного характера изменения $L_p(D_{ef})$ связана с изменением распределения плотности электронов в электронном зонде в РЭМ JSM-6460LV при его дефокусировке. Таким образом, использовать метод дефокусировки для измерения геометрических параметров объектов с малыми размерами можно не на всех типах РЭМ.

4. 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 геомет-

рических параметров объекта (5–10 нм) при оптимизации параметров электронного зонда. Выбор оптимальных параметров зонда основан на использовании критериев соответствия 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 финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 16.523.12.3005) с использованием оборудования Центров коллективного пользования МФТИ и НИЦПВ.

Литература

1. *Li Y.G., Mao S.F., Ding Z.J.* Monte-Carlo simulation of SEM and SAM Images // Part 4 in Applications in Monte-Carlo method in Science and Engineering. — 2009. — P. 231–296.
2. *Волк Ч.П., Горнев Е.С., Новиков Ю.А., Плотников Ю.И., Раков А.В., Тодуа П.А.* Проблемы измерения геометрических характеристик электронного зонда растрового электронного микроскопа // Линейные измерения микрометрового и нанометрового диапазонов в микроэлектронике и нанотехнологии // Труды ИОФАН: Наука. — 2006. — С. 77–120.
3. *Fillipov M.N., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A.* SEM probe defocusing method of measurement of linear sizes of nanorelief elements // Proc. of SPIE. — 2010. — V. 7521. — N 7521161-9.
4. *Данилова М.А., Митюхляев В.В., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Раков А.В., Тодуа П.А.* Тест-объект с шириной линии менее 10 нм для растровой электронной микроскопии // Измерительная техника. — 2008. — № 8. — С. 20–23.
5. *Novikov Yu.A., Gavrilenko V.P., Rakov A.V., Todua P.A.* Test objects with right-angled and trapezoidal profiles of the relief elements // Proc. of SPIE. — 2008. — V. 7042, N 704208-1 — 704208-12.

Поступила в редакцию 16.12.2011.