

УДК 537.533

КАЛИБРОВКА РАСТРОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА. 2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

© 2021 г. Ю. А. Новиков*

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991 Россия

**e-mail: nya@kapella.gpi.ru*

Поступила в редакцию 24.12.2020 г.

После доработки 24.02.2021 г.

Принята к публикации 28.02.2021 г.

Рассмотрено влияние обработки изображений растрового электронного микроскопа на калибровку РЭМ с помощью тест-объектов с трапециевидным профилем рельефа и большими углами наклона боковых стенок. Продемонстрировано влияние разных методов линеаризации сигналов РЭМ на точность калибровки. Приведены два метода калибровки РЭМ и осуществлен выбор наилучшего метода. Демонстрируется преимущество корреляционного анализа при калибровке РЭМ. Показано, что только применение виртуального растрового электронного микроскопа гарантирует правильность калибровки РЭМ.

Ключевые слова: тест-объект, калибровка, растровый электронный микроскоп (РЭМ)

DOI: 10.31857/S1028096021090132

1. ВВЕДЕНИЕ

Растровая электронная микроскопия получила широкое распространение в науке, технике и технологии благодаря наличию растровых электронных микроскопов (РЭМ) высокого разрешения и большого количества методов исследования, реализованных на РЭМ [1, 2]. Кроме того, для РЭМ была разработана система передачи размера от Первичного эталона длины – метра, до потребителя [3, 4]. Эта система позволяет проводить измерения линейных размеров рельефных структур на РЭМ в диапазоне от 10 нм до 100 мкм.

Проведение таких измерений требует осуществлять калибровку растровых электронных микроскопов с высокой точностью. Для этого были созданы тест-объекты [5–8] для калибровки РЭМ и сами методы калибровки [5–8]. Кроме того, был создан виртуальный растровый электронный микроскоп (ВРЭМ) [9, 10], который позволяет верифицировать результаты, получаемые на РЭМ.

В настоящее время рекомендуется [3–8] делать калибровку РЭМ с помощью рельефных кремниевых структур [5–8], имеющих трапециевидный профиль с большими углами наклона боковых стенок. Существует несколько видов таких тест-объектов. Однако наибольшее распространение получил тест-объект МШПС-2.0К [5–8]. Качество его изготовления высокое. Однако идеальных технологий не бывает. Поэтому в работах [7, 8] были рассмотрены методы контроля качества изготовления тест-объекта МШПС-2.0К и выбора

наилучших элементов рельефа для использования их в процессе калибровки РЭМ.

Таким образом, были созданы все условия для осуществления калибровки РЭМ. Однако, как оказалось, существуют ряд сложностей, которые затрудняют калибровку РЭМ [11]. Так не при всех режимах работы РЭМ можно проводить его калибровку. Кроме того, на точность калибровки влияют методы обработки изображений тест-объекта. Незнание этих и других особенностей использования тест-объектов в процессе калибровки приводит к ошибкам в интерпретации результатов калибровки, что влечет за собой большие ошибки в измерении линейных размеров элементов рельефных структур нанометрового диапазона.

Для решения этих проблем возникла необходимо рассмотреть все особенности калибровки РЭМ с помощью структур с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок выступов и канавок. Так в работе [11] было рассмотрено влияние параметров РЭМ на его калибровку. Настоящая статья является продолжением работы [11]. Она посвящена методам обработки изображений, полученных в процессе калибровки РЭМ, которые учитывают особенности тест-объекта, влияющие на точность калибровки.

2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

В процессе калибровки РЭМ получается изображение тест-объекта, которое надо обработать

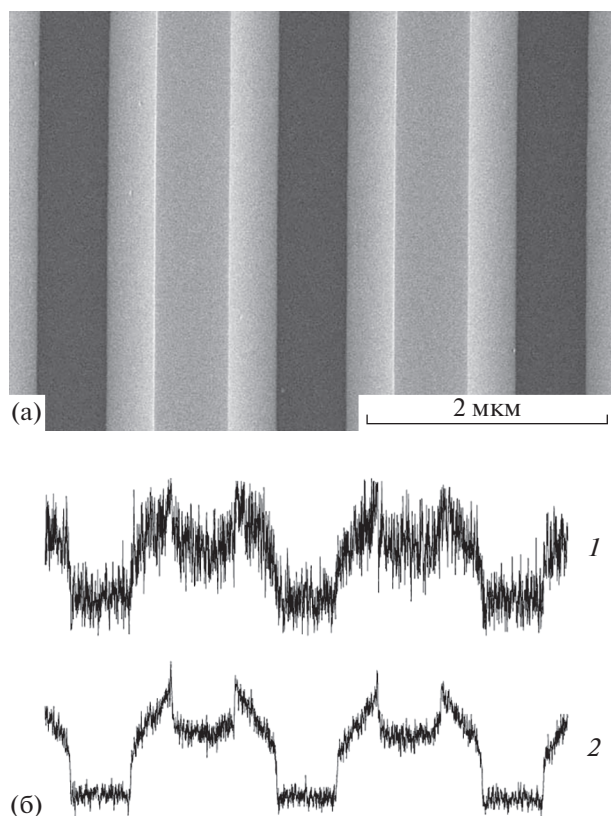


Рис. 1. ВМЭ-изображение (а) шага тест-объекта МШПС-2.0К и сигналы (б) этого изображения. Сигнал 1 является одним из сигналов, из которых состоит изображение, а сигнал 2 получен суммированием 10 соседних сигналов.

для получения информации о параметрах РЭМ. Обычно разрешение современных цифровых изображений составляет 300 точек на дюйм, что соответствует 11 точкам на миллиметр. Работая с изображением, на нем надо выбрать точки, между которыми осуществляется измерение. Но поставить точку точнее 0.5 мм практически невозможно. Поэтому сразу же вводится ошибка в 5 точек. При расстоянии между точками 2 нм ошибка измерения расстояния уже составляет 7 нм. И это еще до начала обработки изображения. Работа с сигналами устраняет эти дополнительные ошибки. В результате в процессе калибровки РЭМ работу необходимо вести не с изображением, а с сигналами, из которых состоит это изображение, точнее с моделями этих сигналов [11]. Поэтому важным элементом калибровки является обработка сигналов изображения – представление их в виде модельных сигналов.

2.1. Суммирование сигналов

Из-за наличия эффекта контаминации (загрязнение поверхности под действием электрон-

ного зонда) [12–14] измерения на РЭМ осуществляются при малых токах зонда. Это проявляется в виде больших шумов изображения. На рис. 1а приведено ВМЭ изображение шага тест-объекта МШПС-2.0К, а на рис. 1б показан один из сигналов (сигнал 1), из которых состоит это изображение [8]. Видно, что, хотя визуально изображение структуры хорошее (рис. 1а), шумы на сигналах (сигнал 1 на рис. 1б) очень большие – достигают 30%. При этом невозможно определить форму сигнала и его соответствие или несоответствие моделям сигналов, описанных в работе [11]. Обработать такой сигнал невозможно. Есть два пути для уменьшения шумов – увеличить ток зонда, но это приведет к увеличению контаминации [12–14], что ухудшит точность калибровки [12], или суммировать соседние сигналы.

Расстояние между строками изображения обычно меньше диаметра электронного зонда в несколько раз. Так при использовании размера изображения 2560×1920 pix (рис. 1а) и длине строки 5 мкм (рис. 1а) расстояние между строками будет составлять величину около 2 нм. В то же время величина диаметра электронного зонда современных РЭМ лежит в диапазоне 10–30 нм. Таким образом, одно и то же место на исследуемом объекте зонд проходит несколько раз. Учитывая высокое качество тест-объекта [7, 8], это позволяет провести суммирование соседних сигналов для уменьшения шумов. Пример такого суммарного сигнала (10 соседних сигналов) показан на рис. 1б (сигнал 2) [8]. Шумы суммарного сигнала 2 значительно (в три раза) меньше шумов одиночного сигнала 1. Сигнал 2 уже можно сравнить со схемой ВМЭ сигнала, описанной в работе [11]. Он хорошо совпадает с этой схемой.

Таким образом, сканирование тест-объекта надо проводить при малых токах зонда, а в процессе калибровки РЭМ использовать суммирование сигналов.

2.2. Приближение реальных сигналов модельными сигналами

Получение контрольных точек на сигналах, с помощью которых определяются параметры РЭМ, возможно двумя способами. Во-первых, сигнал можно аппроксимировать ломаной линией. Тогда контрольными точками будут являться точки излома. Во-вторых, отдельные участки сигналов приближаются прямыми линиями. В этом случае контрольными точками являются точки пересечения соседних прямых линий.

2.2.1. Приближение ломаной линией Приближение сигнала ломаной линией может приводить к большим ошибкам в выборе контрольных точек. Это обусловлено тем, что идеальных технологий не бывает. Структуры реального тест-объ-

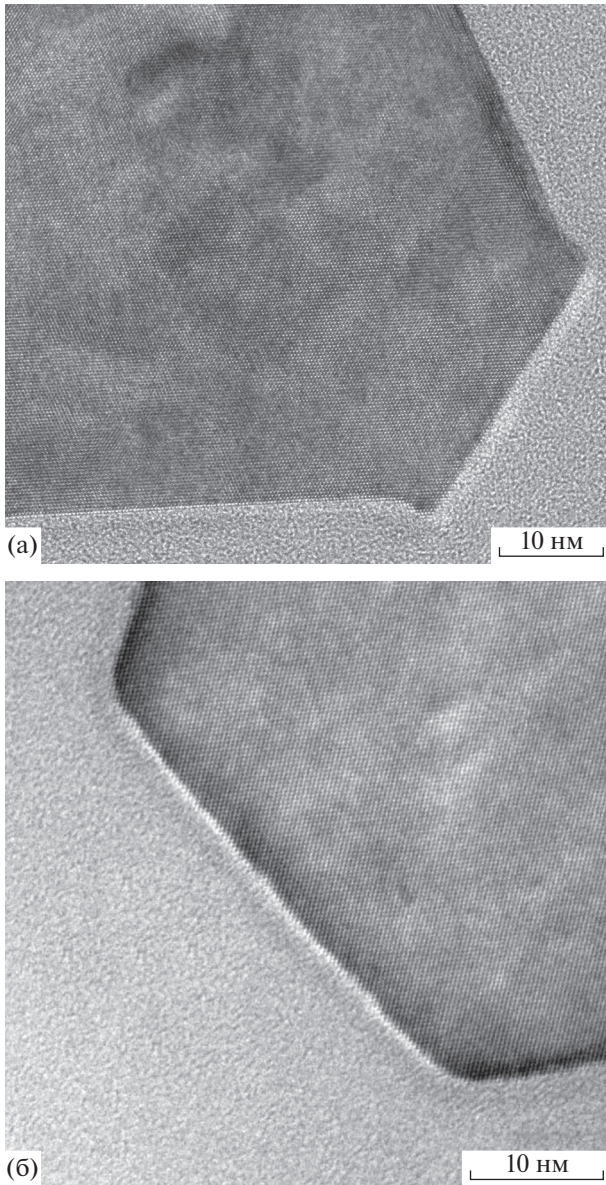


Рис. 2. Изображения в ПЭМ границ верха выступов тест-объектов МШПС-2.0К при разных дефектах технологии изготовления.

екта не являются идеальными трапециевидными структурами. У реальных рельефных структур стороны рельефа совпадают с кристаллографическими плоскостями $\{100\}$ и $\{111\}$ [7]. Однако в районе углов трапеций могут быть отклонения от идеальности из-за недостатков технологии и наличия естественного окисла кремния на поверхности структуры. На рис. 2 приведены изображения в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) таких отклонений [15, 16].

Рис. 2а демонстрирует наличие неотравливания плоскостей $\{111\}$ у границы вершины выступа, а на рис. 2б показано перетравливание плос-

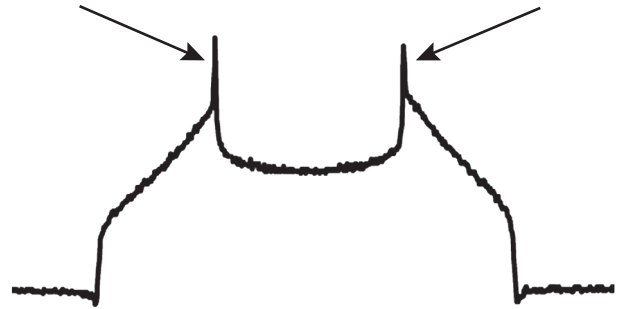


Рис. 3. Форма ВМЭ сигнала при наличии неотравливания плоскостей $\{111\}$ у левой и правой границ вершины выступа. Стрелками указаны узкие пики, которые появляются на сигналах в этом случае.

костей $\{111\}$, которое приводит к сглаживанию границ вершины выступа. Неотравливание проявляется в виде очень узких пиков на сигнале в районе верхних границ выступов (рис. 3), а сглаживание границ вершины выступа при перетравливании приводит к сглаживанию сигнала в этом районе, которое может быть трактовано при калибровке РЭМ как увеличение диаметра зонда.

Физическая природа узкого пика шириной порядка половины диаметра электронного зонда определяется эффектом стряхивания [17, 18] поверхностных электронов первичным электроном,двигающимся под очень малыми углами относительно плоскости, которая образуется в случае неотравливания плоскостей $\{111\}$ (рис. 2а). Эффект стряхивания и его свойства подробно исследовались в работах [17, 18].

В обоих случаях приближение сигнала ломаной линией приведет к сдвигу контрольных точек сигнала и, следовательно, к неконтролируемым ошибкам калибровки РЭМ.

2.2.2. Приближение участков сигналов прямыми линиями. Ошибки калибровки РЭМ, представленные в предыдущем разделе, можно устранить, если использовать приближение отдельных участков сигнала прямыми линиями. Это возможно в связи с тем, что отклонение рельефа тест-объекта от идеальной трапеции осуществляется на расстоянии не более 3–5 нм от границ вершины выступа (рис. 2). Поэтому, отступив от границ рельефа на расстояние порядка 5–10 нм, остальную часть сигнала можно аппроксимировать прямыми линиями. В пересечение таких прямых линий краевые отклонения от идеальности вклада не дают. Поэтому выбор контрольных точек необходимо делать через аппроксимацию отдельных участков сигнала прямыми линиями.

2.3. Выбор контрольных точек на сигналах

Для калибровки РЭМ с помощью трапециевидных структур с большими углами наклона бо-

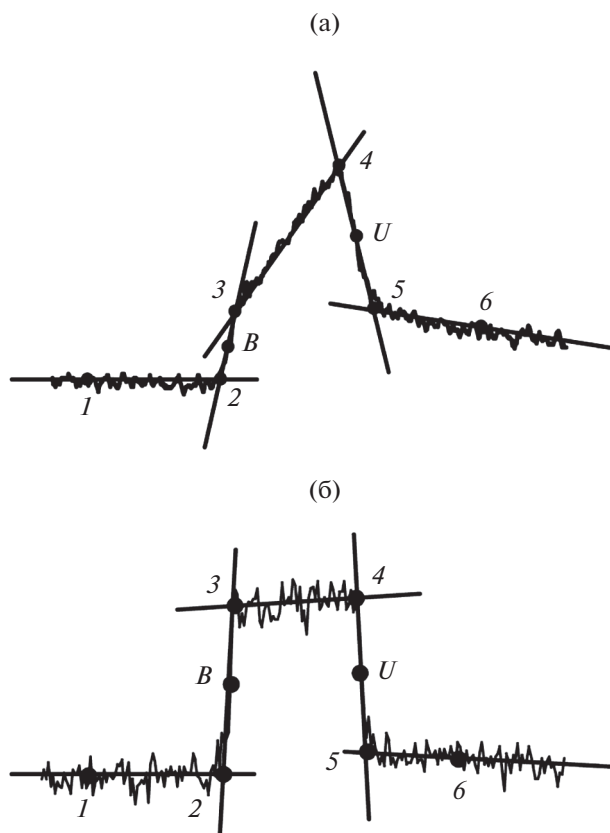


Рис. 4. Линеаризация участков ВМЭ (а) и НВ (б) сигналов, полученных при сканировании ступеньки с большим углом наклона боковой стенки, и определение на сигнале точек основных положений зонда (точки 2–5) и точек B и U , характеризующих границы ступеньки.

ковых стенок нужно использовать связь контрольных точек ВМЭ или НВ сигналов с граничными точками структуры [11]. При этом в качестве контрольных точек нужно использовать точки пересечения прямых линий, линеаризующих отдельные участки сигнала. На рис. 4 приведены ВМЭ (рис. 4а) и НВ (рис. 4б) сигналы, полученные при сканировании ступеньки с большим углом наклонной боковой стенки, и линеаризующие их прямые линии. Контрольными точками на этих сигналах могут быть точки 2–5 или точки B и U [11]. В результате получается два метода калибровки РЭМ [10].

Далее будем анализировать только ВМЭ сигналы, так как для низковольтных сигналов анализ аналогичен в связи с изложенными в работе [11] описаниями формирования моделей ВМЭ и НВ сигналов.

2.3.1. Первый метод калибровки РЭМ. Первый метод калибровки РЭМ основан на использовании в качестве контрольных точек точки пересечения прямых линий, аппроксимирующих ВМЭ сигнал [5–8].

На рис. 5 приведены схемы шаговой структуры (рис. 5а) и ВМЭ сигнала РЭМ (рис. 5б), получаемого при сканировании такой структуры, и обозначения параметров элементов структуры и сигнала. При выполнении условий:

$$s_{L,R} \gg d, \quad b_{p,t} \gg d, \quad u_{p,t} \gg d, \quad (1)$$

где d – эффективный диаметр [19, 20] (далее диаметр) электронного зонда РЭМ, а параметры структуры $s_{L,R}$, $u_{p,t}$ и $b_{p,t}$ показаны на рис. 5а. Связь выбранных контрольных точек с параметрами структуры описывается следующими выражениями:

$$t = mT, \quad (2)$$

$$d = mD, \quad (3)$$

$$s_L = mS_L, \quad s_R = mS_R, \quad (4)$$

$$u_p = mL_p - d, \quad b_p = mG_p - d, \quad (5)$$

$$u_t = mL_t + d, \quad b_t = mG_t + d, \quad (6)$$

где m – размер пикселя на изображении, а остальные параметры представлены на рис. 5.

Калибровка РЭМ в первом методе осуществляется следующим образом. На сигналах определяются контрольные точки (1–11 на рис. 5б) – точки пересечения прямых линий, аппроксимирующих отдельные участки сигналов, и определяются расстояния между ними (рис. 5б). Используя аттестованные величины шага t шаговой структуры или проекции боковых наклонных стенок $s_{L,R}$ и измеренные на сигналах размеры T и $S_{L,R}$, при помощи формул (2) или (4) определяется размер пикселя m . Далее, используя выражение (3), определяется диаметр зонда d . Таким образом осуществляется калибровка РЭМ – определение размера пикселя m и диаметр зонда d . Кроме того, в процессе калибровки по формулам (5) и (6) можно определить размеры верхних и нижних оснований трапецевидных выступов и канавок тест-объекта, используемого для калибровки РЭМ.

Необходимо отметить, что, если не выполняется условие:

$$S_L = S_R, \quad (7)$$

то надо пользоваться не выражениями (4), а, согласно результатам работы [21], формулой

$$s = mS, \quad (8)$$

где

$$S = (S_L + S_R)/2, \quad (9)$$

$$s = (s_L + s_R)/2. \quad (10)$$

Причины невыполнения условия (7) обусловлены наклоном тест-объекта – неортогональностью зонда РЭМ относительно плоскости поверхности тест-объекта, которая в РЭМ не контро-

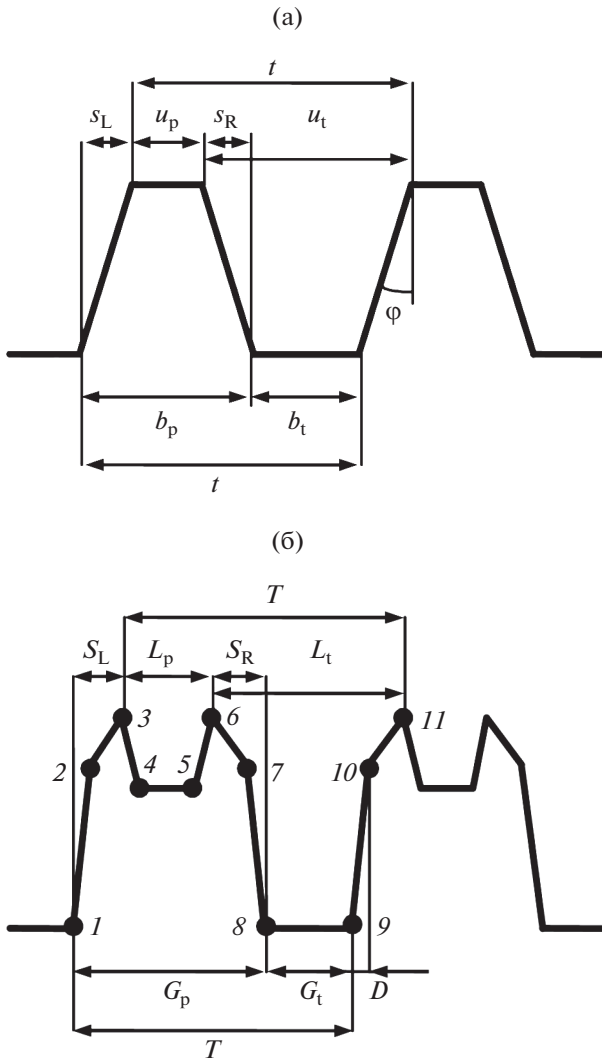


Рис. 5. Схемы профиля шаговой структуры (а) с параметрами, характеризующими структуру, и высоковольтного ВМЭ сигнала РЭМ (б) с измеряемыми на сигнале параметрами.

лируется. Более подробно с этими результатами можно ознакомиться в работе [21].

Отметим также, что при калибровке РЭМ этим методом в определение параметров выступов и канавок вносится большая ошибка измерения диаметра зонда (см. выражения (5) и (6)). Это не очень хорошо из-за того, что в измерение диаметра зонда может войти большая ошибка, обусловленная перетравливанием в тест-объекте плоскостей {111} кремния (раздел 2.2.1 данной работы).

2.3.2. Второй метод калибровки РЭМ. Второй метод калибровки РЭМ основан также на использовании пересечения прямых линий, аппроксимирующих отдельные участки сигнала РЭМ. Однако в качестве контрольных точек используются точки *B* и *U* (рис. 4), определяемые границами струк-

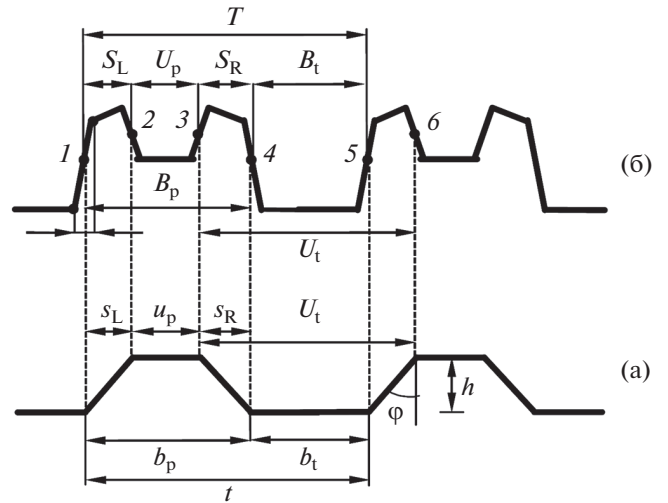


Рис. 6. Схемы шаговой структуры (а) и ВМЭ сигнала РЭМ (б), получаемого при сканировании такой структуры, и обозначения параметров элементов структуры и сигнала. Штриховыми линиями показаны связи граничных точек профиля и контрольных точек (точки 1–6) сигнала.

туры, и их эквиваленты на других ступеньках. Точки *B* и *U* являются средними точками отрезков, на которых они лежат.

На рис. 6 приведены схемы шаговой структуры (рис. 6а) и ВМЭ сигнала (рис. 6б). На схеме сигнала есть контрольные точки (1–6 на рис. 6б), которые характеризуют нижние и верхние границы профиля выступов и канавок (рис. 6а). При симметричной форме электронного зонда эти точки находятся на середине отрезков схемы сигнала, на которых они лежат. При несимметричной форме зонда точки 1–6 будут сдвинуты на величину асимметрии, но всегда в одну сторону и на одну величину. Поэтому в процессе калибровки этот сдвиг можно не учитывать и считать, что точки 1–6 находятся на середине отрезков схемы сигнала, на которых они лежат.

Расстояния между контрольными точками, определяемыми в данном методе, связаны с размерами элементов структуры с помощью выражений:

$$t = mT, \tag{11}$$

$$s_L = mS_L, \quad s_R = mS_R, \tag{12}$$

$$u_p = mU_p, \quad b_p = mB_p, \tag{13}$$

$$u_t = mU_t, \quad b_t = mB_t, \tag{14}$$

$$d = mD. \tag{15}$$

Отметим, что в выражения (13) и (14), определяющие размеры верхних и нижних оснований трапеций, диаметр зонда *d* не входит. Поэтому все размеры элементов шаговых структур можно ис-

Таблица 1. Аттестация размеров элементов ВТО двумя методами

Параметр		ВТО	Метод 1	Метод 2
Шаг, нм		2000	1999.97 ± 0.15	2000.0 ± 0.3
Проекция боковой стенки, нм		500	500.1 ± 1.8	500.07 ± 0.08
Выступ левый	Верх, нм	500	497.4 ± 1.8	499.3 ± 0.2
	Низ, нм	1500	1501.1 ± 1.8	1499.4 ± 0.4
Канавка	Верх, нм	1500	1502.4 ± 1.8	1500.7 ± 0.4
	Низ, нм	500	498.8 ± 1.8	500.6 ± 0.2
Выступ правый	Верх, нм	500	497.8 ± 1.8	499.2 ± 0.2
	Низ, нм	1500	1501.0 ± 1.8	1499.4 ± 0.4

пользовать для определения размера пикселя m . Это очень важное отличие второго метода от первого.

Дело в том, что величина шага структур тест-объекта МШПС-2.0К фиксирована (номинальное значение 2 мкм) и не может быть изменена в процессе создания рельефа тест-объекта. Можно в процессе создания выбирать глубину (высоту) рельефа, которая определяет размер проекции боковой наклонной стенки, и размеры верхних оснований выступов и нижних оснований канавок. Но технологически не удастся сделать проекцию боковой стенки менее 100 нм. А размер верхнего основания выступа удастся сделать вплоть до 10 нм [22]. Поэтому, используя формулу (13), можно калибровать РЭМ при сверхвысоких увеличениях – вплоть до миллиона.

Кроме того, так как в формулы (13) и (14) не входит диаметр зонда, то в этом случае ошибки измерения верхних и нижних оснований выступов и канавок будут меньше на величину ошибки измерения диаметра зонда.

Необходимо отметить один очень важный для калибровки РЭМ момент. Выражения (1) для эксперимента не очень информативны, так как параметры тест-объекта нам могут быть неизвестны (кроме величины шага, который аттестован). По крайней мере, при первом использовании тест-объекта. А диаметр зонда при данном измерении нам еще неизвестен. Поэтому вместо выражения (1) в эксперименте надо использовать другие выражения, полученные с помощью формул (12)–(15)

$$S_{L,R} \gg D, \quad V_{p,t} \gg D, \quad U_{p,t} \gg D. \quad (16)$$

Здесь все параметры представлены на схеме сигнала (рис. 6б). Поэтому, даже визуально легко определить выполняются выражения (16) или нет (сравним сигнал 2 на рис. 1б и модели сигнала на рис. 5б и 6б).

2.3.3. Сравнение методов калибровки РЭМ. Положения точек V и U (рис. 4), на основе которых строится второй метод калибровки РЭМ, определяются точками 2–5 (рис. 4), которые использу-

ются в первом методе калибровки. Таким образом, в обоих методах исходные данные для реализации калибровки РЭМ одинаковые – точки 2–5 (рис. 4). Кроме того, расчетные формулы (11)–(15) второго метода легко получить из формул (2)–(6) первого метода и наоборот. Казалось бы, оба метода должны давать одинаковые результаты (хотя бы для использования шага и проекции боковой наклонной стенки). Однако это не так. Результаты расчетов по первому и второму методам разные. Поэтому необходимо решить каким методом лучше всего пользоваться.

Сравнить методы калибровки РЭМ друг с другом и выбрать лучший возможно только с помощью виртуального растрового электронного микроскопа [10]. Дело в том, что при работе на реальном РЭМ мы не знаем размеры элементов исследуемого объекта. Только у ВРЭМ мы знаем, какие параметры имеет структура на входе виртуального РЭМ, так как сами их задали.

Задача сравнения двух методов калибровки была решена в работе [10]. Для этого был использован модельный тест-объект, состоящий из 11 канавок с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок, представляющий собой виртуальный аналог тест-объекта МШПС-2.0К. Параметры виртуального тест-объекта (ВТО) приведены в табл. 1. Размер пикселя получаемого на ВРЭМ изображении задан $m = 2.250879$ нм/пикс. Диаметр зонда 30 нм. Более подробно с параметрами ВТО, параметрами ВРЭМ и анализом результатов сравнения методов калибровки можно ознакомиться в работе [10]. Здесь же приведем только наиболее важные результаты сравнения.

С помощью ВРЭМ была осуществлена генерация высоковольтного ВМЭ изображения пятого и шестого выступов и канавки между ними для такого модельного объекта. Изображение показано на рис. 7а, а на рис. 7б приведена форма одного из сигналов, из которых состоит это изображение. Размер изображения 2560 × 1920 пикс. Это изображение было обработано для определения

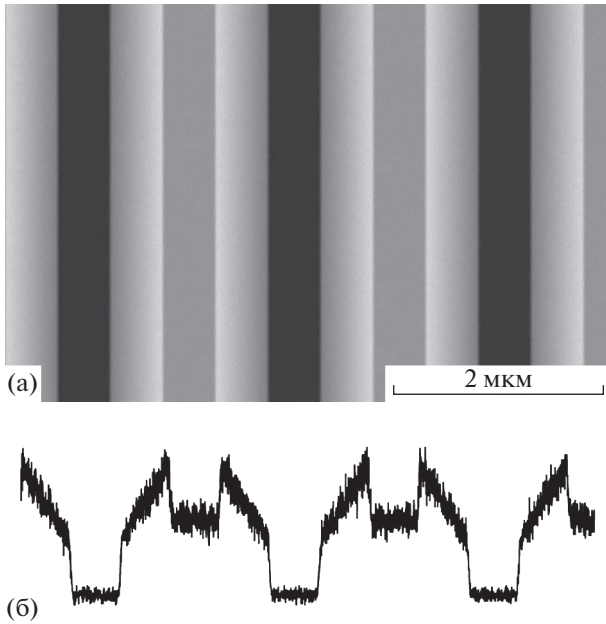


Рис. 7. Изображение сгенерированного ВТО (а) и сигнала (б), из которого состоит изображение.

контрольных точек сигналов с помощью приемов, описанных выше. Далее эти точки использовались для определения размеров элементов ВТО при заданном размере пикселя с помощью обоих методов калибровки.

Оказалось [10], что оба метода дают хорошие результаты. На рис. 8 приведены результаты измерения шага структуры для первого метода (рис. 8а) и второго метода (рис. 8б) при разных номерах измерений. Дело в том, что размер шага (и проекции боковой наклонной стенки) можно определить по разным контрольным точкам на сигнале. Использование такого определения будем называть измерениями и присваивать им номер [10]. У первого метода определения шага таких измерений восемь, а у второго метода их — четыре (более подробно см. [10]). Это приводит к тому, что, хотя случайные ошибки каждого измерения близки для обоих методов калибровки, но средние значения, представленные в табл. 1, имеют разные ошибки. У первого метода ошибка определения шага меньше, чем у второго в два раза. Однако погрешность аттестации реального тест-объекта составляет 1 нм [7]. Поэтому можно признать, что в процессе калибровки реального РЭМ оба метода дадут одинаковую ошибку величины среднего значения шага.

Определение размера проекции боковой наклонной стенки ВТО первым методом приведено на рис. 9а (8 измерений), а для второго метода на рис. 9б (четыре измерения). Бросается в глаза разное поведение проекций в зависимости от номера измерений (от того, по каким контрольным точкам

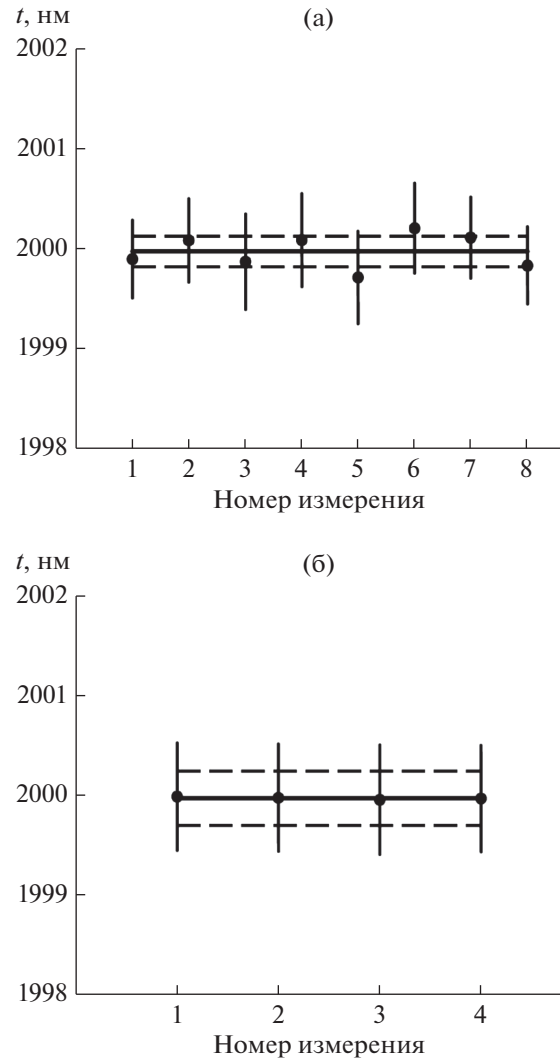


Рис. 8. Результаты определения шага t виртуальной структуры первым (а) и вторым (б) методами, полученные при обработке сгенерированного высоковольтного ВМЭ-изображения, представленного на рис. 7а.

кам проводилось определение проекции боковой наклонной стенки).

Первый метод показывает зависимость определения проекции боковой наклонной стенки от номера измерения. Различия в величинах проекции значительно выходят за случайные ошибки. Это создает большую систематическую ошибку (почти в 2 нм) определения среднего значения проекции. Именно эта систематическая ошибка и является ошибкой определения проекции боковой стенки.

Второй метод калибровки не имеет систематической ошибки — только случайные. Величины средних значений проекции боковой стенки представлены в табл. 1. Хорошо видно, что ошибка второго метода в 20 (!) раз меньше, чем первого (хотя количество измерений у второго метода в

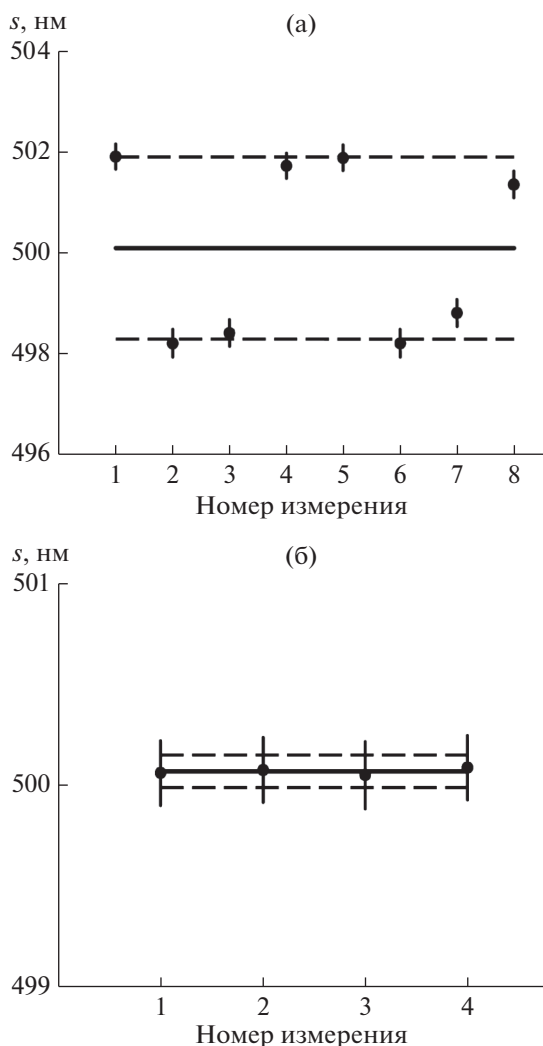


Рис. 9. Результаты определения проекции s боковой наклонной стенки виртуальной структуры первым (а) и вторым (б) методами, полученные при обработке сгенерированного высоковольтного ВМЭ-изображения, представленного на рис. 7а.

два раза меньше, чем у первого). Причины таких различий были объяснены в работе [10].

Необходимо отметить, что в первом методе нельзя использовать калибровку по одной проекции боковой стенки выступа или канавки. Нужно всегда минимум две проекции – у двух сторон выступа или канавки (рис. 9а), чтобы скомпенсировать систематическую ошибку. Это резко уменьшает диапазон калибровки РЭМ. Второй метод устраняет это ограничение – можно использовать даже измерение одной проекции боковой наклонной стенки.

В табл. 1 приведены результаты расчета всех параметров виртуального тест-объекта обоими методами. Из этих данных видно, что второй метод дает ошибки измерения параметров ВТО в 5–10 раз

меньше, чем у первого. Таким образом, калибровку РЭМ надо осуществлять по второму методу, используя выражения (11)–(15) при условиях (7)–(10).

2.3.4. Влияние диаметра зонда на калибровку РЭМ. В настоящее время существует три определения диаметра зонда РЭМ – российское [19, 20], американское [23] и японское [24]. Все они дают разные величины диаметра для одного и того же зонда.

В российском определении диаметр зонда есть размер d_R стороны эффективного квадратного пучка с равномерной плотностью распределения электронов [19, 20]. Такое определение позволяет использовать этот размер в разных формулах (см., например, (5) и (6)) без физически мало понятных числовых коэффициентов при диаметре зонда, которые возникают в этих формулах, если используются американское или японское определение диаметра.

Несмотря на это, даже в российских работах используются разные определения диаметра зонда. Так в работе [25] применяют американское определение, а в работе [26] – японское. Однако в большинстве российских работ [3–8, 27–29] все же применяются российское определение диаметра зонда.

В работах [19, 20] подробно рассмотрено отличие всех трех определений друг от друга. Было показано, что в случае, если зонд имеет гауссовскую форму плотности распределения электронов, переход от российского определения размера зонда d_R к другому размеру d_X можно выполнить с помощью выражения

$$d_X = k_b d_R. \quad (17)$$

Численные значения коэффициента k_b для разных определений диаметра зонда приведены в табл. 2. Поэтому, если используется американское или японское определение диаметра зонда или параметр σ гауссиана, то необходимо после калибровки РЭМ перевести величину диаметра зонда с помощью формулы (17) и табл. 2 в величину американского, японского или гауссовского определения диаметра зонда. Однако в некоторые формулы диаметр зонда не входит (13) и (14). Поэтому они справедливы при любом определении диаметра зонда.

3. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ РЭМ

Структуры тест-объекта с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок выполнены по технологии жидкостного анизотропного травления [5, 6] пластин кремния с ориентацией поверхности (100). Поэтому их боковые стороны и основания (верхние выступов и нижние канавок) должны совпадать с кристаллографиче-

скими плоскостями кремния {111} и {100} соответственно. Если это так, то должна наблюдаться корреляция между координатами некоторых точек на структуре.

Эта корреляция поясняется с помощью рис. 10, на котором сплошной линией изображен профиль трапециевидного выступа. В случае изменения ширины маски из-за наличия дефекта технологии, с помощью которой получена данная структура, то новый профиль будет другой, например, изображенный штриховой линией. Если линии 3–4 и 3'–4' характеризуются кристаллографическими плоскостями {111}, а линии 3–3' и 4–4' характеризуются кристаллографическими плоскостями {100}, то расстояния 3–3' и 4–4' равны. Это означает, что координаты точек 3 и 4 коррелируют друг с другом – при любой ширине выступа расстояния 3–3' и 4–4' равны. Аналогичная корреляция будет существовать и для координат точек 1 и 2. Точки границ боковых стенок 1–2 и 3–4 на рис. 10 соответствуют точкам 1–2 и 3–4 на схеме ВМЭ сигнала РЭМ (рис. 6б). Поэтому корреляция должна быть и между соответствующими точками на ВМЭ сигнале.

Количественно корреляция характеризуется коэффициентом корреляции:

$$K = \frac{\overline{(x_i x_j)} - \bar{x}_i \bar{x}_j}{\sigma_i \sigma_j} \quad (18)$$

Здесь x_i и x_j ($i \neq j$) – характеристики объектов (в нашем случае координаты соответствующих контрольных точек на ВМЭ сигналах РЭМ (рис. 6б)), для которых определяется корреляция. Черта над соответствующей величиной означает ее усреднение по всем обрабатываемым сигналам. Величины σ_i и σ_j – стандартные неопределенности значений координат указанных точек. Диапазон изменения коэффициента корреляции составляет:

$$-1 \leq K \leq +1. \quad (19)$$

В случае осуществления корреляции величина коэффициента корреляции должна быть близка к единице. Однако наличие шумов на сигналах уменьшает величину коэффициента корреляции. Именно коэффициент корреляции количественно характеризует качество изготовления тест-объекта [8].

В работе [8] были определены корреляции координат пар контрольных точек на сигналах РЭМ, из которых состоит изображение тест-объекта МШПС-2.0К. Для этого были получены ВМЭ изображения всех 10 шагов (два выступа и канавка между ними) одной из шаговых структур тест-объекта. Причем каждый выступ (кроме первого и последнего) были представлены два раза – в левой части изображения (первый выступ) и в правой (второй выступ).

Таблица 2. Численные значения коэффициента, связывающего разные определения диаметра зонда для гауссовской формы зонда

Диаметр зонда	k_b
σ гауссиана	0.40
Американский	0.67
Японский	1.13
Российский	1

В табл. 3 представлены коэффициенты корреляции координат пар контрольных точек на сигналах РЭМ для первого (левый) и второго (правый) выступов на каждом изображении. Все коэффициенты корреляции близки к единице, что указывает на высокое качество тест-объекта и правильность проведения выбора контрольных точек в процессе калибровки РЭМ.

Необходимо отметить, что знание коэффициента корреляции имеет еще одно положительное свойство. Оно позволяет проводить корреляционные измерения. В этом случае расстояние между двумя точками можно измерить с повышенной точностью, если коэффициент корреляции будет близок к единице. Дело в том, что при случайных ошибках измерений стандартные неопределенности σ_1 и σ_2 координат точек x_1 и x_2 и неопределенность расстояния между этими точками σ_{12} связаны друг с другом и коэффициентом корреляции K выражением [30]:

$$\sigma_{12}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2K\sigma_1\sigma_2. \quad (20)$$

При $K = 1$ (наличие корреляции) получим величину

$$\sigma_{12}(K = 1) = |\sigma_1 - \sigma_2|, \quad (21)$$

которая значительно меньше величины σ_{12} при обычном измерении $K = 0$ (отсутствие корреляции):

$$\sigma_{12}(K = 0) = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}. \quad (22)$$

Необходимо отметить, что в процессе измерений (но не с данным тест-объектом) возможна антикорреляция ($K = -1$). В этом случае

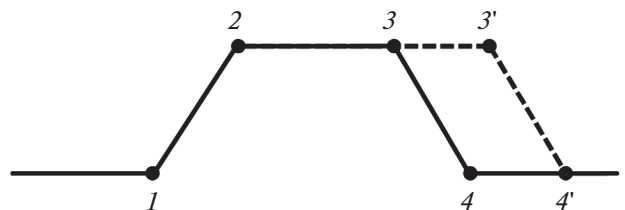


Рис. 10. Схема трапециевидной структуры и ее изменение, поясняющее корреляцию контрольных точек на структуре. Подробности в тексте.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции координат пар контрольных точек на сигналах РЭМ для первого и второго выступов на каждом изображении

№ выступа шаговой структуры	Первый выступ на изображении		Второй выступ на изображении	
	левая стенка	правая стенка	левая стенка	правая стенка
1	0.856	0.862	—	—
2	0.875	0.868	0.841	0.878
3	0.923	0.881	0.875	0.900
4	0.871	0.893	0.910	0.936
5	0.918	0.914	0.849	0.925
6	0.876	0.920	0.912	0.921
7	0.902	0.893	0.920	0.899
8	0.789	0.868	0.885	0.898
9	0.919	0.836	0.827	0.870
10	—	—	0.862	0.870

$$\sigma_{12}(K = -1) = \sigma_1 + \sigma_2. \quad (23)$$

Выражение (23) указывает, что, хотя координаты точек имеют случайный разброс величин, неопределенность расстояния между этими точками ведет себя как систематическая ошибка и ее величина значительно больше, чем величины, представленные выражениями (21) и (22).

В работе [8] было проведено сравнение точности результатов выполнения корреляционных и некорреляционных (обычных) измерений размера шага для изображения пятого и шестого выступов шаговой структуры исследуемого тест-объекта. При корреляционном измерении величина среднего значения шага на изображении составило:

$$T = 1009.96 \pm 0.11 \text{ pix},$$

а обычное измерение показало

$$T = 1010.6 \pm 0.7 \text{ pix}.$$

В пределах ошибок оба измерения дают одинаковую величину среднего значения шага. Однако ошибка корреляционного измерения шага оказалась меньше ошибки обычного измерения в 6.5 раза.

Таким образом, в процессе калибровки РЭМ необходимо проводить корреляционный анализ сигналов [8], выбранных для осуществления калибровки, так как корреляционный анализ дает гарантию правильности осуществления процесса калибровки [8]. Кроме того, знание коэффициента корреляции создает возможность проведения корреляционных измерений, что значительно повышает точность измеряемой величины.

4. РАБОТА С ВИРТУАЛЬНЫМ РАСТРОВОМ ЭЛЕКТРОННЫМ МИКРОСКОПОМ

Все, представленное выше и в предыдущей работе [11], позволяет правильно провести калиб-

ровку РЭМ. Но не позволяет доказать правильность результатов калибровки. Дело в том, что ВМЭ изображение тест-объекта некорректно представляет рельеф тест-объекта. Эта некорректность иллюстрируется на рис. 6. Профиль тест-объекта имеет трапециевидную форму, а профиль сигнала нет. В этом случае задача определения параметров калибровки из экспериментальных данных становится некорректной или частично некорректной. Для некорректной задачи повышение точности входных данных может не приводить к повышению точности выходных данных [31]. Может даже ухудшить точность выходных данных.

Примером частично некорректной задачи является калибровка РЭМ по первому методу, представленная выше. На рис. 9а приведены результаты определения проекции боковой наклонной стенки тест-объекта. Сколько не уменьшай случайную ошибку измерения, конечную ошибку будет определять систематическая ошибка, которая гораздо больше случайной. Убедительно доказать правильность результатов калибровки РЭМ может только виртуальный растровый электронный микроскоп [10]. Схема применения виртуального РЭМ в процессе измерений приведена на рис. 11.

В процессе работы РЭМ получается реальное изображение тест-объекта. Далее осуществляется обработка изображения с помощью методов, представленных выше. При этом определяются не только параметры микроскопа (размер пикселя и диаметр зонда), но и создается модель тест-объекта. То есть определяются все характеристики тест-объекта — размеры выступов и канавок и проекция боковой наклонной стенки (при калибровке по шагу) или величина шага (при калибровке по проекции боковой стенки).

На основе этих данных создается виртуальный тест-объект с характеристиками, соответствующими

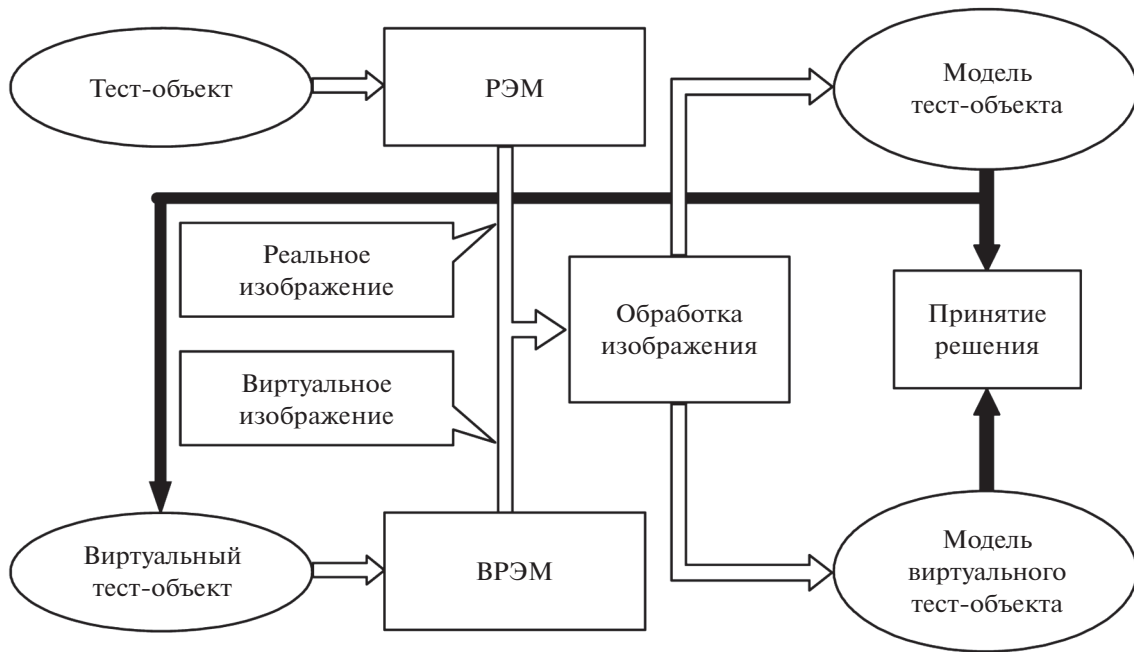


Рис. 11. Схема работы РЭМ и ВРЭМ в процессе калибровки РЭМ.

щими модели тест-объекта. ВРЭМ генерирует изображение ВТО при тех же размере пикселя и диаметре зонда, какие были получены в процессе обработки реального изображения. После этого изображение ВТО обрабатывается с помощью тех же методов, которые использовались при обработке реального изображения, и с теми же параметрами обработки. В результате этого получают параметры модельной калибровки РЭМ и модель виртуального тест-объекта с его характеристиками. Сравнивая между собой параметры РЭМ при реальной и модельной калибровке и модели тест-объекта и ВТО, принимается решение о достоверности или о недостоверности калибровки РЭМ. Если результаты совпадают, то результаты калибровки признаются достоверными. Если совпадения нет, то меняют параметры обработки изображений и проводят новую обработку реального изображения. Создают новый ВТО. Генерируют новое изображение ВТО и обрабатывают его с новыми параметрами. Такую процедуру осуществляют до тех пор, пока результаты обработки не совпадут. Если параметры все равно не совпадают, то надо менять программу обработки изображений. Например, надо переходить от первого метода обработки сигналов изображения ко второму методу, представленному выше.

Необходимо подчеркнуть особенность применения виртуального растрового электронного микроскопа. Мы знаем, какой объект имеется на входе ВРЭМ, а для реального РЭМ мы не знаем, что у него на входе. Поэтому применение вирту-

ального РЭМ является гарантией правильности результатов калибровки РЭМ.

5. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ КАЛИБРОВКИ РЭМ

В недавнем прошлом под калибровкой РЭМ подразумевалось только определение увеличения микроскопа. Поэтому растровая электронная микроскопия являлась не измерительным методом, а исключительно наблюдательным — получение изображения и его качественный или полуквантитативный анализ. Причем увеличение микроскопа M_{SEM} , выдаваемое фирмой изготовителем РЭМ, являлось величиной, отличной от увеличения изображения M_I исследуемого объекта, которое получалось в процессе калибровки, так как в увеличение изображения входит еще неизвестное увеличение фотоизображения M_P :

$$M_I = M_{SEM} \times M_P. \quad (24)$$

Поэтому в результате калибровки РЭМ осуществлялась калибровка изображения, а не калибровка РЭМ, а диаметр зонда вообще не измерялся.

Переход к цифровым изображениям и создание тест-объектов с трапециевидным профилем рельефа и большими углами наклона боковых стенок выступов и канавок привел к тому, что калибровка РЭМ стала комплексным методом определения всех основных параметров растрового электронного микроскопа. В настоящее время удается измерять не только размер пикселя на изображении (аналог увеличения изображения) в

том числе и по двум координатам, но и калибровать РЭМ в широком диапазоне увеличений, когда увеличение (размер пикселя) можно произвольно менять, зная при этом его величину в каждый момент времени. Появилась возможность определять величину диаметра зонда в сфокусированном и дефокусированном виде, углы сходимости-расходимости зонда, глубину фокусировки, плотность распределения электронов в зонде, ортогональность зонда относительно плоскости образца и линейность сканирования в микроскопе.

Поэтому в настоящее время под калибровкой РЭМ подразумевается определение всех основных параметров растрового электронного микроскопа. И для определения всех этих параметров необходимо осуществлять все описанные выше и в работе [11] процедуры.

6. ВЫВОДЫ

Правильную и достоверную калибровку РЭМ с помощью тест-объектов с трапециевидным профилем рельефа и большими углами наклона боковых стенок рельефа можно осуществить только в том случае, если выполнять следующие условия.

1. Калибровка РЭМ осуществляется в низковольтном режиме работы или в высоковольтном режиме при регистрации вторичных медленных электронов. Калибровка РЭМ в режиме сбора обратно рассеянных электронов не проводится.

2. Энергия первичных электронов в низковольтном режиме должна быть не более 2 кэВ.

3. Энергия первичных электронов в режиме сбора вторичных медленных электронов должна быть более 10 кэВ.

4. Автоматический режим выбора рабочего отрезка РЭМ должен быть выключен, а величина рабочего отрезка должна быть такой, чтобы глубина фокусировки РЭМ была больше высоты (глубины) рельефа тест-объекта.

5. Одна и та же область тест-объекта может использоваться ограниченное число раз (зависит от тока зонда). Ближайшая область сканирования структуры, используемая для калибровки РЭМ в режиме сбора ВМЭ, должна располагаться на расстоянии от другой области сканирования не менее 10 мкм поперек канавок тест-объекта и не менее 20 мкм вдоль канавок.

6. Дефектные области, видимые на изображении, исключаются из калибровки РЭМ.

7. Уменьшение шумов на изображении осуществляется суммированием соседних сигналов, а не увеличением тока электронного зонда.

8. Осуществляется контроль формы сигналов на их соответствие модели сигналов. Сигналы, не соответствующие модели, из обработки исключаются.

9. Сигналы РЭМ линеаризуются – отдельные участки сигналов аппроксимируются прямыми линиями. При аппроксимации исключаются области сигналов, близкие к точкам пересечения аппроксимирующих прямых линий. Точки пересечения соседних прямых линий являются контрольными точками, которые используются при калибровке РЭМ.

10. Калибровка РЭМ осуществляется по контрольным точкам, соответствующим границам элементов тест-объекта (второй метод), исключая влияние диаметра зонда на калибровку РЭМ.

11. В процессе калибровки осуществляется корреляционный анализ сигналов РЭМ и проводятся корреляционные измерения.

12. Достоверность результатов калибровки подтверждается с помощью виртуального растрового электронного микроскопа.

Отклонение от этих условий в лучшем случае увеличит ошибки калибровки РЭМ. При этом реальные величины ошибок будут неизвестны. В худшем случае калибровка будет вообще не верна.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю благодарность А.В. Ракову и В.Б. Митюхлеву за помощь в проведении экспериментов и полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Reimer L.* Scanning electron microscopy: physics of image formation and microanalysis. / Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, N.Y. 1998.
2. Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Методы и применение. / Под ред. У. Жу и Ж.Л. Уанга. Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 582 с.
3. *Гавриленко В., Новиков Ю., Раков А., Тодуа П.* // Наноиндустрия. 2009. № 4. С. 36.
4. *Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A.* // Proc. SPIE. 2009. V. 7405. P. 740504. <https://doi.org/10.1117/12.826164>
5. *Волк Ч.П., Горнев Е.С., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., Прохоров А.М., Раков А.В.* // Микроэлектроника. 2002. Т. 31. № 4. С. 243.
6. *Novikov Yu.A., Gavrilenko V.P., Ozerin Yu.V., Rakov A.V., Todua P.A.* // Proc. SPIE. 2007. V. 6648. P. 66480R. <https://doi.org/10.1117/12.733134>
7. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2017. № 11. С. 77. <https://doi.org/10.7868/S0207352817110105>
8. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2018. № 12. С. 86. <https://doi.org/10.1134/S0207352818120144>
9. *Новиков Ю.А.* // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 6. С. 456. <https://doi.org/10.7868/S0544126914060076>

10. Новиков Ю.А. // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. № 4. С. 306.
<https://doi.org/10.7868/S0544126915030072>
11. Новиков Ю.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2021. № 5. С.102.
<https://doi.org/10.31857/S1028096021040117>
12. Novikov Yu.A. // J. Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2020. V. 14. № 6. P. 1387.
<https://doi.org/10.1134/S1027451020060397>
13. Ларионов Ю.В., Митюхляев В.Б., Филиппов М.Н. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2008. № 9. С. 53.
14. Гавриленко В.П., Митюхляев В.Б., Раков А.В., Тодуа П.А., Филиппов М.Н., Шаронов В.А. // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 2. С. 2.
15. Васильев А.Л., Гавриленко В.П., Ковальчук М.В., Митюхляев В.Б., Озерин Ю.В., Раков А.В., Роддэ-тис В.В., Тодуа П.А., Филиппов М.Н. // Труды МФТИ. 2013. Т. 5. № 1. С. 25.
16. Filippov M.N., Gavrilenko V.P., Kovalchuk M.V., Mityukhlyayev V.B., Ozerin Yu.V., Rakov A.V., Roddatis V.V., Todua P.A., Vasiliev A.L. // Measurement Science and Technology. 2011. V. 22. P. 094014.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/9/094014>
17. Новиков Ю.А., Прохоров А.М., Раков А.В. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1993. № 3. С. 22.
18. Новиков Ю.А., Раков А.В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 1999. № 8. С. 24.
19. Волк Ч.П., Горнев Е.С., Новиков Ю.А., Плотников Ю.И., Раков А.В., Тодуа П.А. // Труды ИОФАН. 2006. Т. 62. С. 77.
20. Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. // Proc. SPIE. 2008. V. 7042. P. 70420C.
<https://doi.org/10.1117/12.794891>
21. Новиков Ю.А. // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. № 2. С. 152.
<https://doi.org/10.7868/S0544126915020052>
22. Данилова М.А., Митюхляев В.Б., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Раков А.В., Тодуа П.А. // Измерительная техника. 2008. № 8. С. 20.
23. SEM Performance Standard. Standard Reference Material 2069a. NBS, 1985.
24. Oho E., Sasaki T., Kanaya K. // Research Reports of Kogakuin University. 1985. № 59. P. 106.
25. Грачёв Е.А., Черёмухин Е.А., Чуличков А.И. // Математическое моделирование. 2003. Т. 15. № 3. С. 83.
26. Лукьянов Ф.А., Рау Э.И., Сенов Р.А., Якимов Е.Б., Зайцев С.И. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77. № 3. С. 39.
27. Альзоба В.В., Кузин А.Ю., Ларионов Ю.В., Раков А.В., Тодуа П.А., Филиппов М.Н. // Труды МФТИ. 2013. Т. 5. № 1. С. 4.
28. Ларионов Ю.В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2014. № 11. С. 51.
<https://doi.org/10.7868/S0207352814090121>
29. Ларионов Ю.В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. № 12. С. 96.
<https://doi.org/10.7868/S0207352816120143>
30. Идье В., Драйард Д., Джеймс Ф., Рус М., Садуле Б. Статистические методы в экспериментальной физике. / Пер. с англ. Под ред. А.А. Тяпкина. М.: Атомиздат. 1976. 335 с.
31. Новиков Ю.А. // Микроэлектроника. 2013. Т. 42. № 1. С. 34.
<https://doi.org/10.7868/S0544126912060105>

Calibration of Scanning Electron Microscope.

2. Methods of Signals Processing

Yu. A. Novikov*

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow 119991 Russia

**e-mail: nya@kapella.gpi.ru*

The influence of SEM images processing on SEM calibration with the help of test objects with the trapezoid profile of the relief and large corners of an inclination of lateral walls is considered. The influence of different methods of SEM signal linearization on calibration accuracy is demonstrated. 2 methods of SEM calibration are given and the choice of the best method is carried out. The advantage of the correlation analysis is demonstrated at SEM calibration. It is shown, that only application virtual scanning electron microscope guarantees correctness of SEM calibration.

Keywords: test object, calibration, scanning electron microscope (SEM).