

УДК 537.533

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РЭМ В РЕЖИМЕ ВТОРИЧНЫХ МЕДЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ. 1. СТРУКТУРЫ С БОЛЬШИМИ УГЛАМИ НАКЛОНА БОКОВЫХ СТЕНОК

© 2019 г. Ю. А. Новиков*

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

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

Поступила в редакцию 04.12.2018 г.

После доработки 22.01.2019 г.

Принята к публикации 24.02.2019 г.

Проведено исследование формирования изображений кремниевых микроструктур в растровом электронном микроскопе, работающем в режимах сбора вторичных медленных и обратно рассеянных электронов. В качестве исследуемого объекта использовался тест-объект МШПС-2.0К. Тест-объект состоит из шаговых структур (выступов и канавок в кремнии), профиль которых имеет трапециевидную форму с большими углами наклонов боковых стенок. Показано, что сигнал вторичных медленных электронов формируется по-разному на рельефной и безрельефной поверхностях. В то же время сигнал обратно рассеянных электронов формируется одинаковым образом на рельефной и безрельефной поверхностях.

Ключевые слова: тест-объект, рельефные структуры, растровый электронный микроскоп, РЭМ, вторичные медленные электроны, обратно рассеянные электроны, механизмы формирования изображения.

DOI: 10.1134/S0207352819080122

ВВЕДЕНИЕ

Развитие нанотехнологии требует наличия разных методов диагностики нанообъектов и наноструктур. Среди таких методов выделяется растровая электронная микроскопия. Это связано с тем, что растровый электронный микроскоп (РЭМ) определяет главные характеристики наноструктур и наноматериалов – форму и размеры элементов рельефа поверхности (например, [1–6]). Для измерения этих параметров в РЭМ были разработаны тест-объекты [7–12] для калибровки РЭМ и сами методы калибровки РЭМ [7, 13–15], доведенные до российских национальных стандартов (ГОСТ Р) [16, 17]. Созданы методы измерения линейных размеров [7, 10, 18–24] в микрометровом (1–1000 мкм) и нанометровом (1–1000 нм) диапазонах, обеспеченных прослеживаемостью измерений от Первичного эталона длины (метра) до измеряемого размера [23, 24]. Не последней причиной является наличие высококачественных растровых электронных микроскопов высокого разрешения [25, 26], на которых реализовано большое количество [1, 6] современных методов нанодиагностики.

Растровые электронные микроскопы могут работать в нескольких диапазонах энергий элек-

тронов зонда: низковольтном (НВ) при энергии электронов $E \leq 2$ кэВ и двух высоковольтных ($E > 2$ кэВ) при регистрации вторичных медленных электронов (ВМЭ) и обратно рассеянных электронов (ОРЭ). В настоящее время широкое распространение получили низковольтный режим и высоковольтный режим при регистрации ВМЭ [7–26]. Это связано с тем, что именно для этих режимов разработаны методы калибровки РЭМ и измерения на нем линейных размеров микро- и наноструктур. Режим регистрации обратно рассеянных электронов не получил широкого распространения из-за трудностей, связанных со слабой изученностью механизмов формирования изображения в режиме ОРЭ [27, 29].

В последнее время удалось решить эти проблемы и создать хорошо работающую модель формирования РЭМ-изображений в режиме сбора обратно рассеянных электронов [30, 34]. Однако это поставило новые вопросы уже для режима регистрации вторичных медленных электронов.

Настоящая работа посвящена особенностям формирования ВМЭ-изображений, обусловленных результатами работ [30, 34], и связи этих особенностей с положениями, изложенными в работе [1].

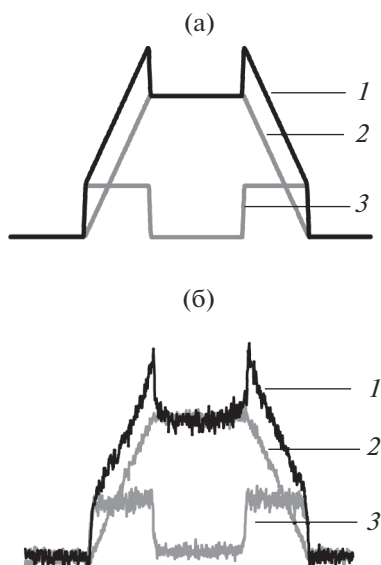


Рис. 1. Модельные (а) и реальные (б) ВМЭ, ОРЭ и НВ-сигналы (1, 2 и 3 соответственно), полученные при сканировании выступа тест-объекта МШПС-2.0К и его модельного аналога.

МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ РЭМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

В работе [1] утверждается, что в сигнал вторичных медленных электронов дают вклад медленные электроны двух сортов, образованные первичными электронами и обратно рассеянными электронами. В работах [35–37] было показано экспериментально, что сигнал вторичных медленных электронов V_{SSE} формируется двумя сигналами: сигналом V_{BSE} , полученным в результате регистрации обратно рассеянных электронов, и сигналом V_{LE} , полученным в низковольтном режиме работы РЭМ,

$$V_{SSE}(t) = A_{BSE}V_{BSE}(t) + A_{LE}V_{LE}(t). \quad (1)$$

Здесь A_{BSE} и A_{LE} вклады соответствующих сигналов. Необходимо отметить, что этот вывод полностью соответствует положениям, изложенным в работе [1]. Таким образом, для описания формирования ВМЭ-изображений необходимо знать механизмы формирования ОРЭ и НВ-изображений.

В работе [34] описана модель формирования изображения в режиме регистрации обратно рассеянных электронов. Согласно этой модели вклад в ОРЭ сигнал дают четыре механизма формирования изображения:

$$V_{BSE}(t) = A_1V_1(t) + A_2V_2(t) + A_3V_3(t) - A_4V_4(t), \quad (2)$$

где параметры A_1 – A_4 (положительные величины) определяют вклады соответствующих механиз-

мов в формирование ОРЭ сигнала, а $V_1(t)$ – $V_4(t)$ описывают четыре механизма формирования изображения:

$$V_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(x, y) F_i(x, y, t) dx dy. \quad (3)$$

Здесь $i = 1, 2, 3, 4$ – номер механизма, $S(x, y)$ – функция, описывающая рельеф поверхности, t – координата сканирования электронным зондом РЭМ, $F_i(x, y, t)$ характеризует плотность распределения электронов в зонде, который формирует изображение данного механизма. В модели принята гауссовская форма зондов:

$$F_i(x, y, t) = \frac{1}{d_i^2} \exp\left(-\frac{(x-t)^2 + y^2}{d_i^2/\pi}\right), \quad (4)$$

где d_i – эффективные диаметры [38, 39] (далее диаметры) соответствующих электронных зондов.

Для структур с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок [7, 10–12], выполненных из дырочного кремния [33, 34], вклад в ОРЭ-сигнал дают только первый и четвертый механизмы [33, 34]:

$$V_{BSE}(t) = A_1V_1(t) - A_4V_4(t). \quad (5)$$

Если элемент рельефа (выступ или канавка) находится в середине рельефной структуры, то в этом случае $A_4 = 0$ [33, 34] и ОРЭ сигнал формируется только за счет первого механизма:

$$V_{BSE}(t) = V_1(t). \quad (6)$$

Моделирование низковольтного сигнала $V_{LE}(t)$ осуществляется в соответствии с моделью, представленной в работах [35, 36]. В этом случае НВ-сигнал можно описать выражением:

$$V_{LE}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} |\text{grad } S(x, y)| F(x, y, t) dx dy, \quad (7)$$

где $F(x, y, t)$ – плотность распределения электронов в зонде РЭМ. Обычно в модельных расчетах в качестве такого распределения используется гауссовская форма (4).

На рис. 1а приведены модельные ВМЭ, ОРЭ и НВ-сигналы для выступа с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок, выполненного из дырочного кремния, которые описываются формулами (3), (4), (6) и (7). При этом модельный ВМЭ-сигнал был получен суммированием сигналов ОРЭ и НВ при равенстве их вкладов в ВМЭ-сигнал.

Рис. 1б демонстрирует реальные ВМЭ, ОРЭ и НВ-сигналы, полученные при сканировании на РЭМ S-4800 выступа тест-объекта МШПС-2.0К, лежащего в середине шаговой структуры. Сигналы отнормированы и наложены друг на друга. Хорошо видно, что реальные ВМЭ, ОРЭ и НВ-сиг-

налы подтверждают выражение (1), а модельные сигналы (3), (4), (6) и (7) правильно описывают реальные сигналы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АППАРАТУРА И ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ

Наибольшее применение растровая электронная микроскопия получила в микро- и нанoeлектронике [2–5], в которых профиль рельефа объектов имеет форму трапеции с большими и малыми углами наклона боковых стенок. Кроме того, структуры с большими углами наклона боковых стенок применяются в качестве тест-объектов – объектов, параметры которых хорошо известны, в том числе и из альтернативных источников.

Для того чтобы структура с трапециевидным профилем считалась структурой с большими углами φ наклона боковых стенок [40], необходимо выполнить условие:

$$\varphi \gg \arctg(d/h), \quad (8)$$

где d – диаметр электронного зонда РЭМ [38, 39], h – глубина канавки. Однако более удобно пользоваться другим условием:

$$s = h \operatorname{tg} \varphi \gg d, \quad (9)$$

которое указывает, что диаметр d зонда РЭМ много меньше проекции s боковой наклонной стенки структуры.

В качестве структур с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок будем рассматривать элементы тест-объекта МШПС-2.0К, представляющие собой шаговые структуры, состоящие из выступов и канавок в кремнии. Этот тест-объект используется для калибровки РЭМ [7, 8, 10–15, 23, 24], работающих в режиме сбора вторичных медленных электронов и низковольтном режиме [41]. Аттестация тест-объекта МШПС-2.0К была осуществлена на электронно-оптической метрологической системе [42] в Физико-техническом институте Германии (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) с помощью интерференции лазерного излучения. При номинальной величине шага 2000 нм аттестованное значение шага составило 2001 ± 1 нм. Кроме того, тест-объект МШПС-2.0К прошел международные сличения [43].

Тест-объект МШПС-2.0К состоит из 15 шаговых структур, каждая из которых представляет собой 11 канавок в кремнии. Канавки имеют трапециевидный профиль с большими углами наклона боковых стенок. Подробное описание этого тест-объекта приведено в работах [7, 8, 10–12].

На рис. 2 показаны ОРЭ (рис. 2а) и ВМЭ (рис. 2б) изображения пятого и шестого выступов и канавки между ними центральной шаговой структуры тест-объекта МШПС-2.0К. Именно в

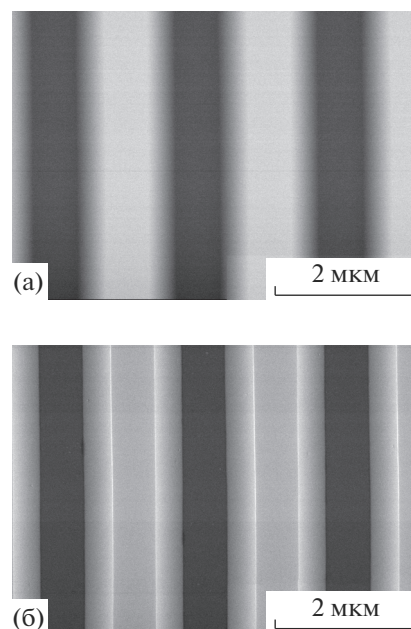


Рис. 2. ОРЭ (а) и ВМЭ (б) изображения шага, состоящего из двух выступов и канавки между ними, шаговой структуры тест-объекта.

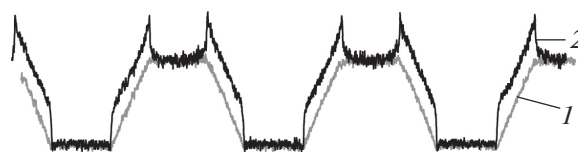


Рис. 3. ОРЭ и ВМЭ-сигналы (1 и 2 соответственно), из которых состоят изображения на рис. 2.

этом месте аттестуется размер шага структуры [11, 12]. Сигналы, приведенные на рис. 1б, соответствуют 5-ому выступу шаговой структуры.

Эксперименты проводились в РЭМ S-4800 при энергии электронов зонда 20 кэВ. Размер изображений 2560×1920 pix. Калибровка РЭМ [7, 8, 10–12] осуществлялась с помощью самого тест-объекта по методу, изложенному в работах [7, 8, 10]. Она дала размер пикселя $m = 2.250 \pm 0.002$ нм/pix (значение размера пикселя, представленное фирмой изготовителем РЭМ, было равно 2.254972), диаметр электронного зонда $d = 15 \pm 2$ нм и величину проекции боковой наклонной стенки $s = 395$ нм при стандартном отклонении $\sigma = 2$ нм. Видно, что неравенство (9) хорошо выполняется и элементы данной структуры (выступы и канавки) являются структурами с большими углами наклона боковых стенок.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 3б приведены ОРЭ- и ВМЭ-сигналы (1 и 2 соответственно), из которых состоят изображения, показанные на рис. 2. Сигналы норми-

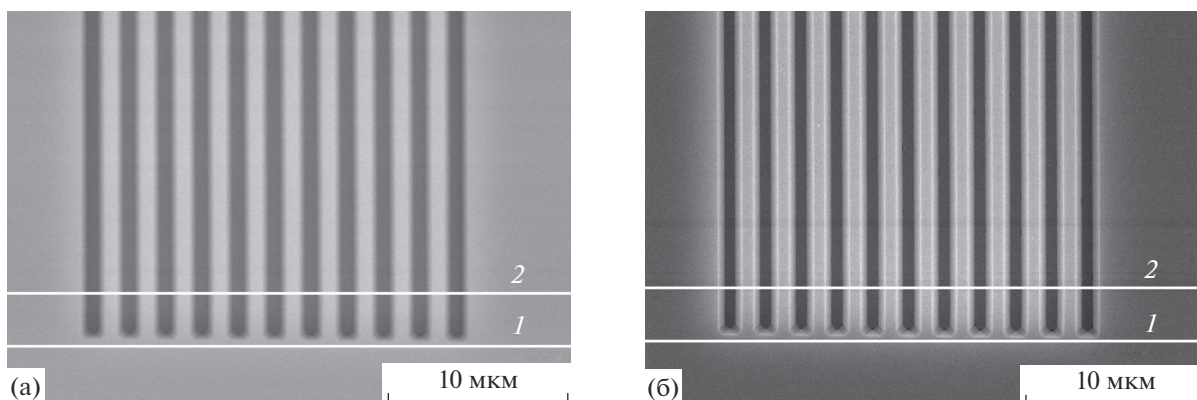


Рис. 4. Изображения концевой участка шаговой структуры тест-объекта в РЭМ, работающего в режимах сбора ОРЭ (а) и ВМЭ (б), на которых указаны положения сигналов (1 и 2), используемых для анализа.

рованы и наложены друг на друга. Нормировка сигналов необходима в связи с тем, что изображения в РЭМ получаются в режиме автоконтраста, и, поэтому, реальная амплитуда сигналов неизвестна. Видно, что ВМЭ-сигнал состоит из двух сигналов: ОРЭ-сигнала и сигнала, похожего на сигнал низковольтного РЭМ [35] (рис. 16). Это подтверждает правильность выражения (1). Но это в центре шаговой структуры.

В работах [33, 34] было показано, что модель формирования ОРЭ-сигнала (5) хорошо описывает реальные ОРЭ-сигналы как в центре шаговой структуры, так и на ее краях. В то же время НВ-сигналы [35, 36] не зависят (7) от положения рельефного элемента в шаговой структуре. Поэтому, в силу (1) модельные ВМЭ-сигналы должны хорошо описывать реальные ВМЭ-сигналы как в центре шаговой структуры, так и на ее краю.

На рис. 4 приведены ОРЭ (рис. 4а) и ВМЭ (рис. 4б) изображения концевых участков шаговой структуры тест-объекта МШПС-2.0К. На каждом изображении указаны положения двух сигналов, используемых для анализа. Сигналы 1 на рис. 5а, б соответствуют сканированию электронным зондом области около конца шаговой структуры [33, 34]. При этом сам электронный зонд РЭМ не задевает шаговую структуру, а область многократного рассеяния (ОМР) электронов зонда сканирует шаговую структуру. Согласно работам [33, 34], размер ОМР значительно больше величины шага структуры, поэтому на сигналах 1 (рис. 5) не видны элементы шаговой структуры, как для ОРЭ-сигнала (рис. 5а), так и для ВМЭ-сигнала (рис. 5б). Сигналы 2 на рис. 5а, б соответствуют сканированию электронным зондом шаговой структуры далеко от ее конца [33, 34]. При этом сканирование рельефа осуществляется как зондом первичных электронов, так и областью многократного рассеяния. В обоих случаях (ОРЭ и ВМЭ) сигналы 1 и 2 отнорми-

рованы и наложены друг на друга соответственно для ОРЭ (рис. 5а) и ВМЭ (рис. 5б). Видно, что сигналы 1 являются фоном для сигналов 2, как в случае ОРЭ, так и в случае ВМЭ. Уровень фона в обоих случаях соответствует верху сигналов как в центре шаговой структуры, так и в области краев структуры. Причем совпадение происходит как справа, так и слева от границ структуры.

На рис. 6 показаны отнормированные и наложенные друг на друга ОРЭ и ВМЭ-сигналы. При этом сигналы на рис. 6а взяты в положениях 1 на рис. 4, а на рис. 6б показаны сигналы, взятые в положениях 2 на рис. 4. Видно, что ОРЭ и ВМЭ-сигналы (рис. 6а), полученные при сканировании канавок электронами из области многократного рассеяния, в пределах шумов совпадают.

Однако для ОРЭ и ВМЭ-сигналов, представленных на рис. 6б (эти сигналы получены скани-

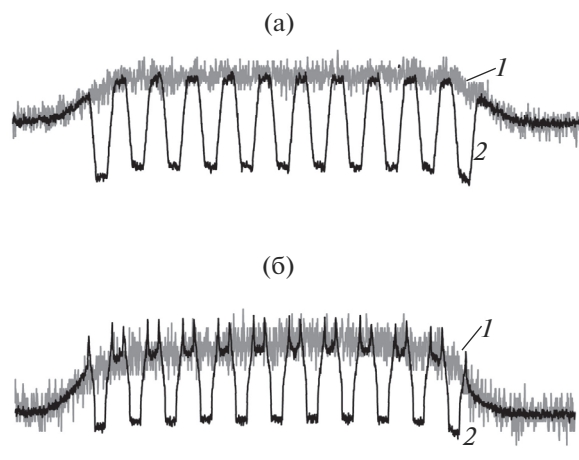


Рис. 5. ОРЭ (а) и ВМЭ (б) сигналы, наложенные друг на друга, которые получены при сканировании канавок шаговой структуры тест-объекта в положениях 1 и 2 на рис. 4.

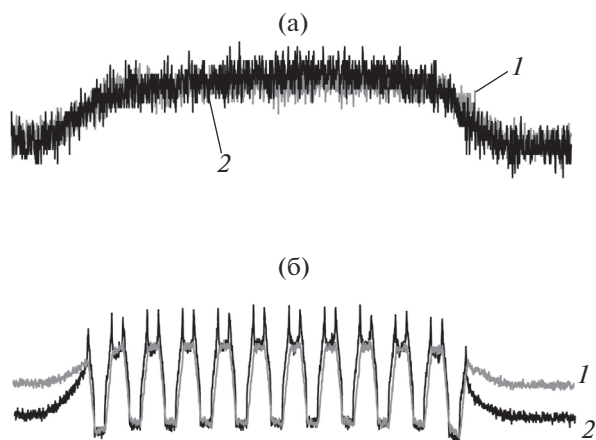


Рис. 6. ОРЭ и ВМЭ сигналы (1 и 2 соответственно), наложенные друг на друга, которые получены при сканировании канавок шаговой структуры тест-объекта в положениях 1 (а) и 2 (б) на рис. 4.

рованием как зондом первичных электронов, так и электронами из области многократного рассеяния), ситуация совсем другая. Сигналы делятся на две части. Первая часть соответствует рельефу шаговой структуры. Здесь верхняя часть ОРЭ и ВМЭ-сигналов от выступов и нижняя часть сигналов от канавок совпадают, как это происходит с сигналами, показанными на рис. 3, причем даже там, где сигналы искажаются за счет их близости к краю рельефа. Вторая часть соответствует той части структуры, где рельеф отсутствует. В этой области сигналов совпадений нет. ОРЭ и ВМЭ-сигналы различаются очень сильно. Отметим, что на рис. 6а различий не наблюдаются. Хотя на сигналах, представленных на рис. 6а, очень большой шум и трудно делать какие-либо заключения.

Для решения возникшей проблемы были получены ОРЭ (рис. 7а) и ВМЭ (рис. 7б) изображения в области начала шаговой структуры (область без рельефа, первая и вторая канавки, первый выступ). Сигналы, из которых состоят эти изображения, приведены на рис. 8б. На эти сигналы наложены модельные сигналы, полученные с помощью полуэмпирической модели [36]. Параметры структуры, используемые при моделировании, и параметры самого моделирования приведены в табл. 1 и 2. В модельный ОРЭ-сигнал дают вклады только первый и четвертый механизмы (выражение (5)) формирования ОРЭ-изображения. Более подробно об этом написано в работах [33, 34].

Хорошо видно, что для ОРЭ-сигналов совпадение идеальное. В то же время для ВМЭ сигналов хорошее совпадение осуществляется только в области рельефа. В области, где нет рельефа, сигналы существенно различаются. Это совпадает с результатами, представленными на рис. 6б.

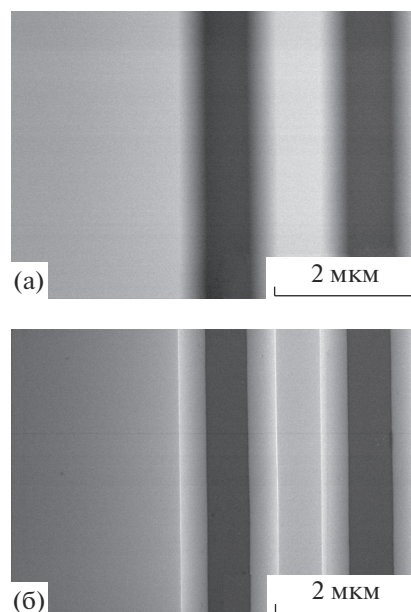


Рис. 7. ОРЭ (а) и ВМЭ (б) изображения крайних канавки и выступа (первая и вторая канавки и первый выступ) шаговой структуры тест-объекта.

Отнормируем реальные ОРЭ и ВМЭ-сигналы, из которых состоят изображения, показанные на рис. 7, и наложим их друг на друга так же, как это было сделано на рис. 3. Наблюдается совпадение сигналов в области верха и низа элементов рельефа. Полученный результат представлен на рис. 9а, 9б. Хорошо видно, что в области трапецевидного рельефа (справа от стрелки, которая указывает границу рельефа) результат такой же, как и на рис. 3: выражение (1) хорошо выполняется даже на границе рельефа, где сигналы искажаются. В то же время, слева от стрелки (в этой области нет рельефа) выражение (1) не выполняется.

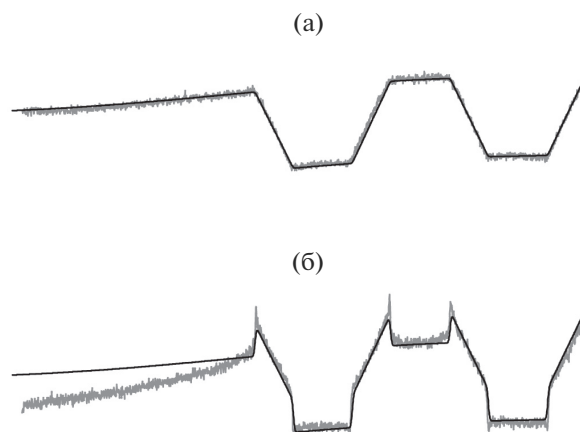


Рис. 8. ОРЭ (а) и ВМЭ (б) сигналы, из которых состоят изображения на рис. 7, и наложенные на них модельные сигналы.

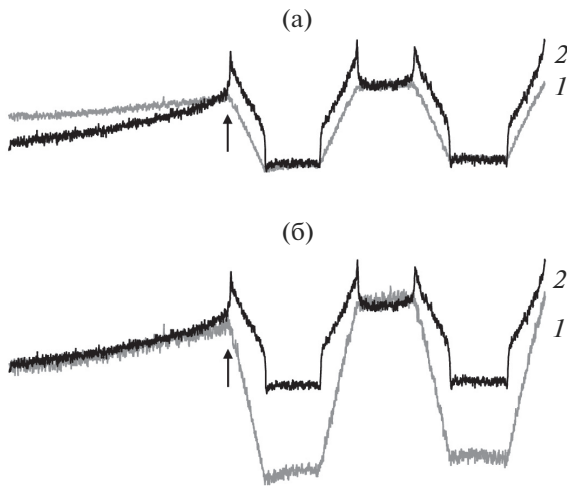


Рис. 9. ОРЭ и VMЭ-сигналы (1 и 2 соответственно), полученные при сканировании одного и того же места шаговой структуры тест-объекта, изображения которых показаны на рис. 7, при разных нормировках сигналов: а – нормировка по рельефу, б – нормировка по безрельфной поверхности.

Сделаем другую нормировку сигналов: таким образом, чтобы сигналы по возможности совпадали слева от стрелки. Этот результат представлен на рис. 9б. Хорошо видно, что совпадение VMЭ и ОРЭ-сигналов слева от стрелки очень хорошее. В то же время справа от стрелки сигналы сильно различаются. Однако оба сигнала совпадают в области верха выступов. Как было показано в работах [33, 34], ОРЭ-сигнал в области верха выступа

Таблица 1. Параметры структур для модельного описания экспериментальных сигналов на рис. 8

Элемент	Параметр	Размер
1-я канавка	Верх, нм	1396
	Низ, нм	606
1-й выступ	Верх, нм	611
	Низ, нм	1401
2-я канавка	Верх, нм	1396
	Низ, нм	606
	s , нм	395
	h , нм	559

Таблица 2. Параметры моделирования для описания экспериментальных сигналов на рис. 8

Параметр	ОРЭ	НВ
$A_{BSE, LE}$, %	65	35
d_1 , нм	30	30
d_4 , нм	4500	—
A_1 , %	50	—
A_4 , %	50	—

соответствует уровню фона ОРЭ сигнала при работе по рельефу.

Таким образом, VMЭ сигнал состоит из двух областей: там, где есть рельеф, и там, где нет рельефа. Причем граница перехода очень мала: не более размера зонда первичных электронов. Такие свойства ОРЭ и VMЭ-сигналов указывают на то, что выражение (1) выполняется для сигналов и справа и слева от стрелки, но, по-видимому, вклады A_{BSE} и A_{LE} сигналов справа и слева от стрелки разные. И этот переход очень резкий. Можно предположить, что есть еще, по крайней мере, один механизм формирования VMЭ-изображения, отличный от представленных в выражении (1). Необходимы дальнейшие исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследования формирования изображений канавок в кремнии, имеющих трапециевидный профиль, и большие углы наклона боковых стенок, в РЭМ, работающем в режимах сбора вторичных медленных и обратно рассеянных электронов. Показано, что формирование VMЭ-сигналов осуществляется по-разному на рельефной и безрельфной поверхностях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reimer L. Scanning electron microscopy: physics of image formation and microanalysis / Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, N.Y. 1998.
2. Marchman H.M., Griffith J.E., Guo J.Z.Y., Frackoviak J., Celler G.K. // J. Vac. Sci. Technol. 1994. V. B12. № 6. P. 3585.
3. Новиков Ю.А., Раков А.В. // Микроэлектроника. 1996. Т. 25. № 6. С. 417.
4. Новиков Ю.А., Раков А.В. // Измерительная техника. 1999. № 1. С. 14.
5. Postek M.T., Vadar A.E. Critical Dimension Metrology and the Scanning Electron Microscope. / Handbook of Silicon Semiconductor Metrology. Ed. A.C. Diebold. Marcel Dekker Inc. N.Y. – Basel. 2001. P. 295.
6. Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Методы и применение / Под ред. Жу У. и Уанга Ж.Л. Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2013. 582 с.
7. 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.
8. Novikov Yu.A., Gavrilenko V.P., Rakov A.V., Todua P.A. // Proc. SPIE. 2008. V. 7042. P. 704208-1. <https://doi.org/10.1117/12.794834>
9. Gavrilenko V.P., Mityukhlyayev V.B., Novikov Yu.A., Ozerin Yu.V., Rakov A.V., Todua P.A. // Measurement science and technology. 2009. V. 20. P. 20. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/8/084022>
10. Frase C.G., Hassler-Grohne W., Dai G., Bosse H., Novikov Yu.A., Rakov A.V. // Measurement science and technology. 2007. V. 18. P. 439. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/2/S16>

11. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. Т. 46. № 11. С. 77. <https://doi.org/10.7868/S0207352817110105>
12. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2018. № 12. С. 86.
13. *Новиков Ю.А., Стеколин И.Ю.* // Труды ИОФАН. 1995. Т. 49. С. 41.
14. *Волк Ч.П., Горнев Е.С., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., Раков А.В.* // Микроэлектроника. 2004. Т. 33. № 6. С. 419.
15. *Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A., Volk Ch.P.* // Proc. SPIE. 2009. V. 7272. P. 72720Z. <https://doi.org/10.1117/12.813514>
16. *Гавриленко В.П., Лесновский Е.Н., Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А., Филиппов М.Н.* // Известия РАН. Серия Физическая. 2009. Т. 73. № 4. С. 454.
17. *Gavrilenko V.P., Filippov M.N., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A.* // Proc. SPIE. 2009. V. 7378. P. 737812. <https://doi.org/10.1117/12.821760>
18. *Gavrilenko V.P., Kalnov V.A., Novikov Yu.A., Orlikovskiy A.A., Rakov A.V., Todua P.A., Valiev K.A., Zhikharev E.N.* // Proc. SPIE. 2009. V. 7272. P. 727227. <https://doi.org/10.1117/12.814062>
19. *Данилова М.А., Митюхляев В.Б., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Раков А.В., Тодуа П.А.* // Измерительная техника. 2008. № 8. С. 20.
20. *Новиков Ю.А., Раков А.В., Филиппов М.Н.* // Известия РАН. Серия Физическая. 1998. Т. 62. № 3. С. 543.
21. *Filippov M.N., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A.* // Proc. SPIE. 2010. V. 7521. P. 752116-1. <https://doi.org/10.1117/12.854696>
22. *Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A.* // Proc. SPIE. 2006. V. 6260. P. 626015. <https://doi.org/10.1117/12.683401>
23. *Гавриленко В., Новиков Ю., Раков А., Тодуа П.* // Наноиндустрия. 2009. № 4. С. 36.
24. *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>
25. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013. № 5. С. 105. <https://doi.org/10.7868/S0207352813050107>
26. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013. № 8. С. 105. <https://doi.org/10.7868/S0207352813080131>
27. *Новиков Ю.А., Раков А.В., Филиппов М.Н.* // Труды ИОФАН. 1998. Т. 55. С. 100.
28. *Новиков Ю.А., Раков А.В., Филиппов М.Н.* // Известия вузов. Электроника. 1998. № 1. С. 91.
29. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2011. № 10. С. 5.
30. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2014. № 8. С. 46. <https://doi.org/10.7868/S0207352814080101>
31. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 5. С. 78. <https://doi.org/10.7868/S0207352815050091>
32. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 10. С. 59. <https://doi.org/10.7868/S0207352815100170>
33. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. № 2. С. 66. <https://doi.org/10.7868/S0207352816020086>
34. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. № 9. С. 12. <https://doi.org/10.7868/S0207352816090110>
35. *Новиков Ю.А.* // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 4. С. 263. <https://doi.org/10.7868/S0544126914040073>
36. *Новиков Ю.А.* // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 6. С. 456-467. <https://doi.org/10.7868/S0544126914060076>
37. *Новиков Ю.А.* // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. № 4. С. 306. <https://doi.org/10.7868/S0544126915030072>
38. *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.
39. *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>
40. *Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А.* // Измерительная техника. 2009. № 2. С. 22.
41. *Волк Ч.П., Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А.* // Измерительная техника. 2009. № 1. С. 15.
42. *Haessler-Grohne W., Bosse H.* // Measurement Science and Technology. 1998. V. 9. P. 1120.
43. *Волк Ч.П., Горнев Е.С., Календин В.В., Митюхляев В.Б., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Раков А.В., Bosse H., Frase C.G.* // 12 Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. Черноголовка. 2001. Тезисы докладов. С. 128.

Features of Formation of SEM Images in a Mode of Secondary Slow Electrons.

1. Structures with Large Side Wall Inclinations

Yu. A. Novikov

The research of the images formation of silicon microstructures in scanning electron microscope in the secondary slow electrons and backscattered electrons collection mode is carried out. As researched object the test object MShPS-2.0Si was used. The test object consists of pitch structures (protrusions and grooves in silicon), which structures has the trapezoid form with the large side wall inclinations. It is shown that the signal of secondary slow electrons are formed on different laws on relief and not relief of surfaces. At the same time the signal of backscattered electrons are formed by an identical on relief and not relief of surfaces.

Keywords: test object, relief structures, scanning electron microscope, SEM, secondary slow electrons, backscattered electrons, mechanisms of the image formation.