

УДК 537.533

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РЭМ В РЕЖИМЕ ВТОРИЧНЫХ МЕДЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ. 2. СТРУКТУРЫ С ТРАПЕЦИЕВИДНЫМ ПРОФИЛЕМ И МАЛЫМИ 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 14.01.2019 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 23.02.2019 г.

Проведено исследование формирования изображений кремниевых микроструктур в растровом электронном микроскопе, работающем в режимах сбора вторичных медленных электронов (ВМЭ) и обратно рассеянных электронов (ОРЭ). В качестве исследуемого объекта использовались канавки в электронном кремнии с трапециевидным профилем и малыми углами наклона боковых стенок с номинальной шириной 1 мкм и глубиной 300 нм. Показано, что из четырех механизмов формирования ОРЭ-изображений, известных в настоящее время, вклад в формирование ВМЭ-изображений дают только два механизма, учитывающие формирование изображения зондом первичных электронов и многократно рассеянными первичными и вторичными электронами, выходящими из поверхности твердого тела. Многократно рассеянные вторичные электроны, двигающиеся по направлению движения электронов зонда, дающие основной вклад в формирование ОРЭ-изображения, вклад в формирование ВМЭ-изображения не дают.

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

DOI: 10.1134/S0207352819090105

ВВЕДЕНИЕ

Растровая электронная микроскопия является одним из самых распространенных методов диагностики нанообъектов и наноструктур. Это обусловлено тем, что растровый электронный микроскоп (РЭМ) определяет основные характеристики наноструктур и наноматериалов: форму и размеры элементов рельефа поверхности [1–7]. Для измерения этих характеристик разработаны тест-объекты [8–13] для калибровки РЭМ и методы калибровки РЭМ [8, 14–16], доведенные до российских национальных стандартов (ГОСТ Р) [17, 18]. Были созданы методы измерения линейных размеров [8, 11, 19–25] в микрометровом (1–1000 мкм) и нанометровом (1–1000 нм) диапазонах, обеспеченные прослеживаемостью измерений от Первичного эталона длины – метра, до измеряемого размера [24, 25]. Кроме того, современная промышленность выпускает высококачественные растровые электронные микроскопы высокого разрешения [26, 27], на которых реализовано большое количество [1, 6, 7] современных методов нанодиагностики.

Растровые электронные микроскопы могут работать в нескольких диапазонах энергий электронов зонда: низковольтном (НВ) – энергия электронов $E \leq 2$ кэВ, и двух высоковольтных ($E > 2$ кэВ) при регистрации вторичных медленных электронов (ВМЭ) и обратно рассеянных электронов (ОРЭ). Однако только два из них получили широкое распространение: низковольтный режим и высоковольтный режим при регистрации ВМЭ [8–27]. Это обусловлено тем, что для этих режимов разработаны методы калибровки РЭМ [8, 14–16] и измерения на нем линейных размеров микро- и наноструктур [8, 11, 19–25]. Режим регистрации обратно рассеянных электронов не получил широкого распространения из-за слабой изученности механизмов формирования изображения в режиме ОРЭ [28–30].

Недавно удалось решить трудности режима ОРЭ и создать хорошо работающую модель формирования РЭМ-изображений в режиме сбора обратно рассеянных электронов [31–35]. Однако, это поставило новые вопросы уже для режима регистрации вторичных медленных электронов [36].

Настоящая работа является продолжением работы [36] и посвящена особенностям формирования ВМЭ-изображений рельефных трапециевидных структур с малыми углами наклона боковых стенок, которые обусловлены результатами работ [31–35], и связи этих особенностей с моделями формирования изображения, изложенными в работах [1, 36].

ФОРМИРОВАНИЕ ВМЭ-ИЗОБРАЖЕНИЯ

Спектр электронов, испущенных назад по отношению к направлению движения первичных электронов, можно представить схемой, изображенной на рис. 1 [37]. Область спектра, обозначенная 1, соответствует однократному упругому рассеянию назад первичных электронов. Область 2 представляет электроны (первичные и вторичные), испытавшие многократное упругое и неупругое рассеяние. В область 3 попадают медленные электроны, которые образуются в тонком поверхностном слое исследуемого образца, толщина которого определяется [37] формулой

$$z_s = 1.9 AZ^{-0.6}/\rho, \quad (1)$$

где A – атомный вес, а Z – атомный номер химических элементов, из которых состоит вещество, ρ – плотность вещества. Если ρ задается в $\text{г}/\text{см}^3$, то z_s выражается в нанометрах. Для кремния формула (1) дает

$$z_s(\text{Si}) = 4.7 \text{ нм}.$$

В область 3 попадают также электроны, испущенные из поверхностных электронных состояний [38] под действием первичных электронов. Этот эффект назван “стряхиванием” [38] поверхностных электронов. Он обладает удивительным свойством – анизотропией относительно движения налетающих электронов. Стряхивание поверхностных электронов осуществляется только в том случае, если первичный электрон пересекает поверхность из вакуума в твердое тело. В противном случае стряхивание электронов не происходит. Подробнее с этим эффектом и его свойствами можно ознакомиться в работе [38].

В растровом электронном микроскопе спектральный анализ электронов не производится. Детекторы РЭМ регистрируют электроны двух типов. К первому типу, названному обратнo рассеянные электроны, относятся электроны, входящие в области 1 и 2 (рис. 1). Ко второму типу, названному вторичные медленные электроны, принадлежат электроны, попадающие в область 3 (рис. 1). Отметим, что в низковольтном режиме работы РЭМ регистрирует электроны из области 3. Каждый тип электронов регистрируется своим особым детектором [1, 6]. Необходимо отметить, что в силу конструкции современных детекторов ОРЭ они регистрируют электроны с энергиями

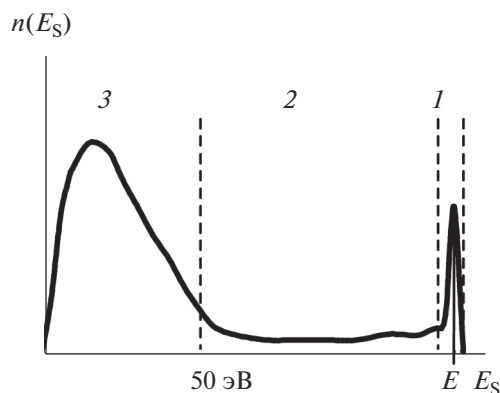


Рис. 1. Схема распределения по энергиям электронов, испущенных назад по отношению к первичным электронам.

более 2 кэВ. Поэтому часть диапазона ОРЭ (от 50 эВ до 2 кэВ) не участвует в формировании РЭМ-изображений.

На рис. 2 приведены схемы, поясняющие образование вторичных медленных электронов. Тонкий приповерхностный слой, толщиной z_s , пересекают первичные электроны 1 и обратно рассеянные электроны 2. Они генерируют в этом слое вторичные медленные электроны 3. Кроме того, первичные электроны 1 облучают поверхность образца и стряхивают поверхностные электроны 4, которые тоже дают вклад во вторичные медленные электроны. Необходимо отметить, что обратно рассеянные электроны 2 (рис. 2) не осуществляют стряхивание поверхностных электронов. Более подробно описание формирования вторичных медленных электронов с помощью этих эффектов приведено в работе [38].

Таким образом, ВМЭ-сигнал V_{SSE} должен формироваться двумя сигналами: сигналом V_{BSE} , полученным в результате регистрации обратнo рассеянных электронов, и сигналом V_{LE} , полученным в низковольтном режиме работы РЭМ,

$$V_{SSE}(t) = A_{BSE}V_{BSE}(t) + A_{LE}V_{LE}(t), \quad (2)$$

где A_{BSE} и A_{LE} – вклады соответствующих сигналов. Необходимо отметить, что результат, аналогичный (2), был описан еще в работе [1].

Правильность формулы (2) было подтверждено в работе [36], в которой исследовались особенности формирования ВМЭ-изображений рельефных структур с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок. Однако, в отличие от работы [1], величины вкладов обратнo рассеянных электронов и электронов низковольтного режима РЭМ различны [36] для рельефной и безрельфной поверхностей.

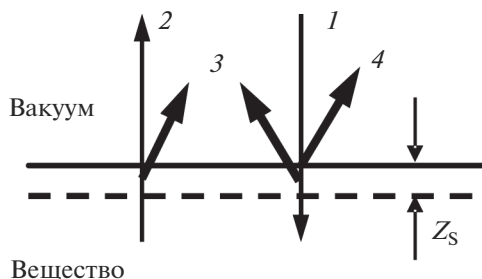


Рис. 2. Схема формирования вторичных медленных электронов первичными электронами I и обратно рассеянными электронами 2 за счет образования медленных электронов 3 в тонком приповерхностном слое и электронов 4 за счет эффекта стряхивания поверхностных электронов.

МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ РЭМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

В работах [34, 35] описана модель формирования изображения в режиме регистрации обратно рассеянных электронов. Согласно этой модели, вклад в ОРЭ-сигнал дают 4 механизма формирования изображения:

$$V_{\text{BSE}}(t) = A_1 V_1(t) + A_2 V_2(t) + A_3 V_3(t) - A_4 V_4(t), \quad (3)$$

где параметры $A_1 - A_4$ (положительные величины) определяют вклады соответствующих механизмов в формирование ОРЭ-сигнала, а $V_1(t) - V_4(t)$ описывают 4 механизма формирования изображения, которые можно описать выражением

$$V_i(t) = \int S(x, y) F_i(x, y, t) dx dy. \quad (4)$$

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:

$$F_i(x, y, t) = \frac{1}{d_i^2} \exp\left(-\frac{(x-t)^2 + y^2}{d_i^2/\pi}\right), \quad (5)$$

где d_i – эффективные диаметры [39, 40] (далее диаметры) соответствующих электронных зондов.

Для структур с трапециевидным профилем и малыми углами наклона боковых стенок [33, 35], выполненных из электронного кремния, вклад в ОРЭ-сигнал дают только первый, третий и четвертый механизмы [33, 35]:

$$V_{\text{BSE}}(t) = A_1 V_1(t) + A_3 V_3(t) - A_4 V_4(t). \quad (6)$$

Причина отсутствия второго механизма будет приведена ниже.

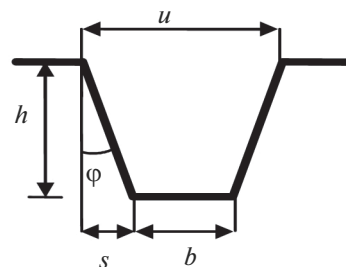


Рис. 3. Схема канавки с трапециевидным профилем и параметрами, определяющими ее форму.

Сигнал низковольтного РЭМ согласно работам [41, 42] можно описать выражением

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

где $F(x, y, t)$ – плотность распределения электронов в зонде РЭМ. Необходимо отметить, что плотность распределения электронов в зонде низковольтного РЭМ $F(x, y, t)$ совпадает с плотностью $F_1(x, y, t)$ и описывается [43] одним гауссом в фокусе или несколькими гауссами, сдвинутыми относительно друг друга, при дефокусировке. При моделировании будем считать, что зонд сфокусирован.

Таким образом, все основные механизмы формирования изображения в РЭМ в режиме сбора вторичных медленных электронов в настоящее время достаточно хорошо изучены экспериментально и описаны теоретическими моделями.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АППАРАТУРА И ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ

На рис. 3 приведена схема канавки с трапециевидным профилем и обозначены параметры, определяющие ее форму. Малыми углами φ наклона боковых стенок являются углы, удовлетворяющие условию [9, 44, 45]:

$$\varphi_d/2 < \varphi \leq \arctg(d/h), \quad (8)$$

где d – диаметр электронного зонда РЭМ [39, 40], h – глубина канавки, φ_d – угол сходимости-расходимости электронного зонда РЭМ [9, 32, 36, 46]. Схема профиля электронного зонда в области фокусировки с его параметрами приведена на рис. 4.

Более удобно верхнюю границу угла φ в выражении (8) представить в виде следующего выражения:

$$s = h \text{tg } \varphi \leq d, \quad (9)$$

которое указывает на то, что для трапециевидной структуры с малыми углами наклона боковых стенок электронный зонд может полностью накрыть боковую стенку структуры. Таким образом, ма-

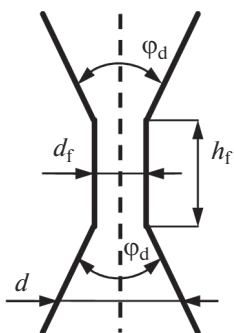


Рис. 4. Схема вертикального профиля электронного зонда РЭМ в области фокусировки с углом сходимости-расходимости φ_d , глубиной фокусировки h_f , диаметром зонда в фокусе d_f (минимальный диаметр зонда) и действующим диаметром зонда d (диаметр зонда на уровне плоскости исследуемого образца).

лость угла наклона является характеристикой не только самой структуры, но и характеристикой РЭМ (определяется диаметром электронного зонда).

В качестве структур с малыми углами наклона в данной работе используются канавки, сделанные в электронном кремнии [21, 33, 35], с номинальной шириной 1 мкм и глубиной 300 нм. На рис. 5 приведены изображения канавки в режиме сбора ОРЭ (рис. 5а) и ВМЭ (рис. 5б) при энергии электронов зонда 25 кэВ. Формы сигналов, из которых состоят изображения на рис. 5, показаны на рис. 6 в режиме регистрации ОРЭ (сигнал 1) и ВМЭ (сигнал 2).

Профиль канавок был измерен в специальных экспериментах [21] на РЭМ в режиме сбора ВМЭ. При этом были получены размер верхнего основания $u = 1017 \pm 7$ нм, размер нижнего основания $b = 903 \pm 5$ нм, проекция боковой наклонной стенки $s = 57$ нм, углы наклона боковых стенок $\varphi = 10.8^\circ$. На рис. 7 показан измеренный профиль канавок. Видно, что номинальное значение ширины канавки соответствует верхнему основанию трапециевидной формы канавки. Такой профиль характерен для технологии микроэлектроники, с помощью которой были сделаны исследуемые структуры.

Эксперименты проводились на РЭМ CamScan CS-44 при энергии электронов зонда 25 кэВ. Более подробно с экспериментами можно ознакомиться в работе [21]. Калибровка РЭМ (определение размера пикселя m и диаметра зонда d) осуществлялась с помощью рельефных прямоугольных структур в кремнии [9, 47, 48] по методу, изложенному в работах [14, 48]. Результаты калибровки составили:

$$m = 6.38 \pm 0.10 \text{ нм/пикс}, \quad d = 130 \pm 6 \text{ нм}.$$

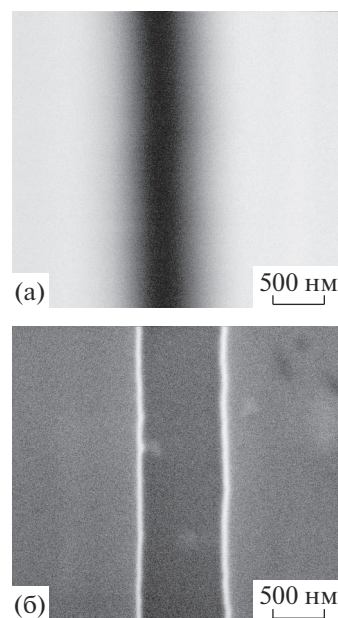


Рис. 5. РЭМ-изображения трапециевидной канавки с номинальной шириной 1 мкм и глубиной 300 нм в режимах сбора ОРЭ (а) и ВМЭ (б).

Сравнивая величину проекции боковой наклонной стенки канавки, приведенную выше, с диаметром электронного зонда, видим, что условие (9) – малость угла наклона боковых стенок трапециевидной канавки, хорошо выполняется.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

РЭМ-изображения трапециевидной канавки с номинальной шириной 1 мкм в режимах сбора ОРЭ и ВМЭ приведены на рис. 5а и 5б соответственно. Сигналы, из которых состоят эти изображения, показаны на рис. 6. Хорошо видно, что

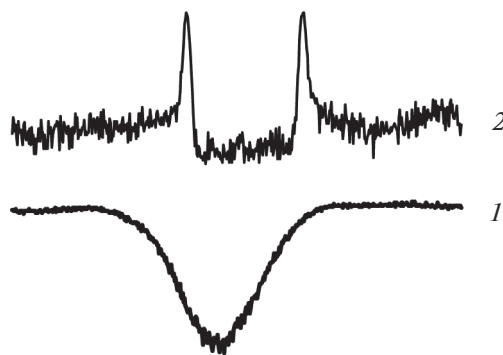


Рис. 6. Формы сигналов, полученных при сканировании трапециевидной канавки с номинальной шириной 1 мкм и глубиной 300 нм в режиме регистрации ОРЭ (сигнал 1) и ВМЭ (сигнал 2).

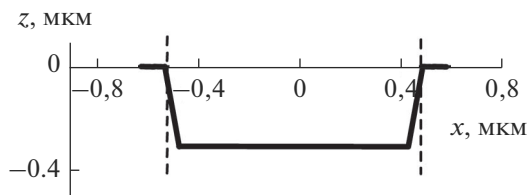


Рис. 7. Форма профиля трапецевидной канавки с номинальной шириной 1 мкм и глубиной 0.3 мкм. Штриховые вертикальные линии соответствуют номинальным границам рельефной структуры.

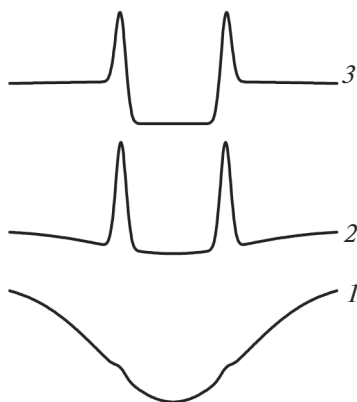


Рис. 8. Модельные ВМЭ-сигналы, полученные для канавки с номинальной шириной 1 мкм глубиной 300 нм при разных параметрах моделирования.

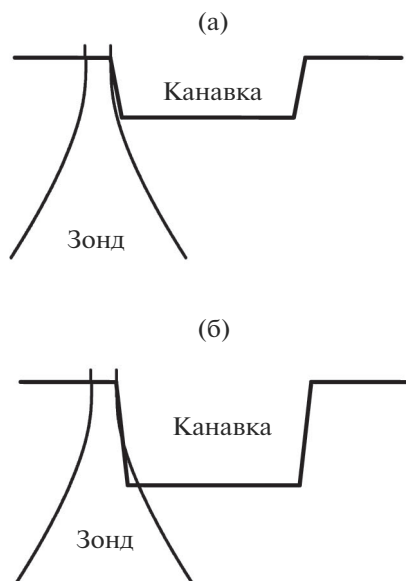


Рис. 9. Схемы взаимодействия зонда многократно рассеянных первичных электронов с трапецевидными канавками с малыми углами наклона боковых стенок с номинальной шириной 1 мкм и глубинами 300 нм (а) и 500 нм (б).

ОРЭ и ВМЭ-сигналы различаются принципиально. ОРЭ-сигнал имеет треугольную форму дна сигнала, которая определяется многократным рассеянием вторичных электронов – электронов проводимости [32, 33, 35]. В то же время ВМЭ-сигнал имеет плоское дно.

Моделирование ВМЭ-сигналов осуществлялось с помощью выражений (2), (6) и (7). Вклады соответствующих механизмов приведены в табл. 1. Результаты моделирования показаны на рис. 8. Сигнал 1 демонстрирует, что, если использовать предположение об одинаковом ОРЭ и НВ-вкладе в ВМЭ-сигнал, то получим, что модельный сигнал 1 имеет форму, которая полностью противоречит экспериментальному сигналу 2 на рис. 6. Если использовать предположение о 100-кратном превышении НВ-вклада над ОРЭ, то получим сигнал 2 на рис. 8, который достаточно сильно отличается от реального сигнала 2 на рис. 6 вне канавки.

Таким образом, становится ясно, что ОРЭ-сигнал, описываемый выражением (6), нельзя использовать для генерации ВМЭ-сигнала с помощью выражений (2), (6) и (7): невозможно превратить треугольную форму дна ОРЭ-сигнала в плоскую форму дна ВМЭ-сигнала.

Сделаем другое предположение: из четырех механизмов формирования изображения в режиме регистрации ОРЭ [33, 35] не все механизмы дают вклад в формирование ВМЭ-изображения.

Отсутствие вклада второго механизма формирования ОРЭ-сигнала в формировании ВМЭ (и ОРЭ)-изображения легко объяснимо [33, 35]. Зонд первичных многократно рассеянных электронов, ответственный за это формирование, не задевает канавку (рис. 9а) с глубиной 300 нм, которая используется в данном эксперименте. Если бы канавка была глубиной 500 нм, то вклад 2-го механизма был бы (рис. 9б). Более подробно об этом изложено в работах [33, 35].

Если из формулы (6) убрать третий механизм формирования ОРЭ-сигнала, то получим для ОРЭ-сигнала, входящего в формирование ВМЭ-изображения, описываемого формулой (2), следующее выражение:

$$V_{\text{BSE}}(t) = A_1 V_1(t) - A_4 V_4(t). \quad (10)$$

Сигнал 3 на рис. 8 демонстрирует именно этот случай – моделирование ВМЭ-сигнала было осуществлено с помощью выражений (2), (7) и (10). Параметры моделирования приведены в табл. 1. Для доказательства правильности использования выражения (10) отнормируем этот сигнал и наложим его на реальный ВМЭ-сигнал (рис. 10а). Хорошо видно полное совпадение модельного и реального ВМЭ-сигналов.

Однако, для ОРЭ-изображений требуется [33, 35] использовать выражение (6). На рис. 10б на ре-

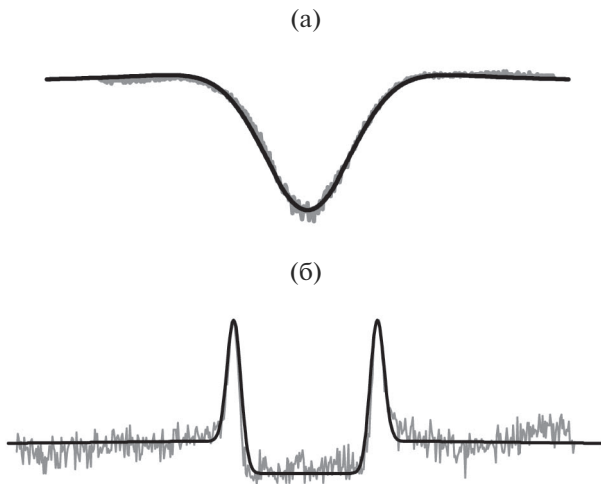


Рис. 10. Реальные ОРЭ (а) и ВМЭ (б) сигналы, полученные при сканировании канавки с номинальной шириной 1 мкм и глубиной 300 нм, и модельные сигналы, описывающие реальные сигналы, наложенные на реальные сигналы.

альный ОРЭ-сигнал наложен отнормированный по амплитуде модельный сигнал, созданный с использованием выражения (6) и наиболее хорошо описывающий экспериментальный сигнал (параметры моделирования приведены в табл. 1). Более подробно об этом можно прочитать в работах [33, 35]. Видно очень хорошее совпадение модельного и экспериментального ОРЭ-сигналов.

Отсутствие вклада третьего механизма формирования ОРЭ-сигнала, за который отвечают вторичные электроны [33, 35], в формирование ВМЭ-сигнала непонятно. Необходимо отметить, что вклад третьего механизма формирования ОРЭ-сигнала [33, 35] в создание ОРЭ-изображения в 80 раз превышает вклад первого механизма, а в формирование ВМЭ-сигнала третий механизм вклада не дает.

Таблица 1. Величины модельных параметров ОРЭ и ВМЭ-сигналов

Параметры модели	ОРЭ сигнал	ВМЭ-сигналы (рис. 8)		
		сигнал 1	сигнал 2	сигнал 3
d_1 , нм	130	130	130	130
A_1	1	1	1	1
d_3 , нм	1500	1500	1500	—
A_3	80	80	80	—
d_4 , нм	5000	5000	5000	5000
A_4	20	20	20	1
A_{BSE}	—	1	1	1
A_{LE}	—	1	100	1

Подчеркнем особенность формирования ВМЭ-сигнала трапециевидных структур с малыми углами наклона боковых стенок, выполненных из электронного кремния. В формировании ОРЭ-изображения дают вклад 3 механизма (выражение (6)) формирования ОРЭ-сигнала. В то же время в формировании ВМЭ-изображения дают вклад только 2 механизма (выражение (10)) формирования ОРЭ-сигнала и сигнал (7) низковольтного РЭМ. Причем вклад четвертого механизма формирования ОРЭ-сигнала при формировании ВМЭ-сигнала резко (в 20 раз) уменьшился.

Все это указывает на то, что выражение (2) в чистом виде не работает: не все механизмы формирования ОРЭ изображения дают вклад в формирование ВМЭ-изображения. Для объяснения наблюдаемых явлений необходимы дополнительные исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследования формирования изображений канавок в кремнии, имеющих трапециевидный профиль и малые углы наклона боковых стенок, в РЭМ, работающем в режимах сбора вторичных медленных и обратно рассеянных электронов. Показано, что из четырех механизмов формирования ОРЭ-изображений, известных в настоящее время, вклад в формирование ВМЭ-изображений дают только два механизма — первый и четвертый.

Таким образом, формирование ВМЭ-сигналов имеет особенности как для трапециевидных структур с большими углами наклона боковых стенок [36], так и для структур с малыми углами наклона боковых стенок. Это указывает на недостаточную изученность взаимодействия электронов с рельефной поверхностью.

В следующей работе этого цикла будут рассмотрены особенности формирования ВМЭ-изображений структур с прямоугольным профилем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю благодарность А.В. Ракову и М.Н. Филиппову за участие в экспериментах 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. 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., Vladoar A.E.* Handbook of Silicon Semiconductor Metrology / Ed. Diebold A.C. N.Y.—Basel: Marcel Dekker Inc., 2001. P. 295.
6. *Кристал М.М., Ясников И.С., Полушин В.И., Филатов А.М., Ульянников А.Г.* Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения. М.: Техносфера, 2009. 208 с.
7. 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.
8. *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.
9. *Novikov Yu.A., Gavrilenko V.P., Rakov A.V., Todua P.A.* // Proc. SPIE. 2008. V. 7042. P. 704208. <https://doi.org/10.1117/12.794834>
10. *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>
11. *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>
12. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротрон и нейтрон. исслед. 2017. Т. 46. № 11. С. 77. <https://doi.org/10.7868/S0207352817110105>
13. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротрон и нейтрон. исслед. 2018. № 12. С. 86. <https://doi.org/10.1134/S0207352818120144>
14. *Новиков Ю.А., Стеколин И.Ю.* // Труды ИОФАН. 1995. Т. 49. С. 41.
15. *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.
16. *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>
17. *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.
18. *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>
19. *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>
20. *Данилова М.А., Митюхляев В.Б., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Раков А.В., Тодуа П.А.* // Измерительная техника. 2008. № 8. С. 20.
21. *Новиков Ю.А., Раков А.В., Филиппов М.Н.* // Известия РАН. Серия Физическая. 1998. Т. 62. № 3. С. 543.
22. *Filippov M.N., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A.* // Proc. SPIE. 2010. V. 7521. P. 752116. <https://doi.org/10.1117/12.854696>
23. *Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A.* // Proc. SPIE. 2006. V. 6260. P. 626015. <https://doi.org/10.1117/12.683401>
24. *Гавриленко В., Новиков Ю., Раков А., Тодуа П.* // Наноиндустрия. 2009. № 4. С. 36.
25. *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>
26. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротрон и нейтрон. исслед. 2013. № 5. С. 105. <https://doi.org/10.7868/S0207352813050107>
27. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротрон и нейтрон. исслед. 2013. № 8. С. 105. <https://doi.org/10.7868/S0207352813080131>
28. *Новиков Ю.А., Раков А.В., Филиппов М.Н.* // Труды ИОФАН. 1998. Т. 55. С. 100.
29. *Новиков Ю.А., Раков А.В., Филиппов М.Н.* // Известия вузов. Электроника. 1998. № 1. С. 91.
30. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротрон и нейтрон. исслед. 2011. № 10. С. 5.
31. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротрон и нейтрон. исслед. 2014. № 8. С. 46. <https://doi.org/10.7868/S0207352814080101>
32. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротрон и нейтрон. исслед. 2015. № 5. С. 78. <https://doi.org/10.7868/S0207352815050091>
33. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротрон и нейтрон. исслед. 2015. № 10. С. 59. <https://doi.org/10.7868/S0207352815100170>
34. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротрон и нейтрон. исслед. 2016. № 2. С. 66. <https://doi.org/10.7868/S0207352816020086>
35. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротрон и нейтрон. исслед. 2016. № 9. С. 12. <https://doi.org/10.7868/S0207352816090110>
36. *Новиков Ю.А.* // Поверхность. Рентген., синхротрон и нейтрон. исслед. 2019. № 8. (Р. 64).
37. *Новиков Ю.А., Раков А.В.* // Труды ИОФАН. 1998. Т. 55. С. 3.
38. *Новиков Ю.А., Раков А.В.* // Поверхность. Рентген., синхротрон и нейтрон. исслед. 1999. № 8. С. 24.
39. *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.
40. *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>
41. *Новиков Ю.А.* // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 4. С. 263. <https://doi.org/10.7868/S0544126914040073>
42. *Новиков Ю.А.* // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 6. С. 456. <https://doi.org/10.7868/S0544126914060076>
43. *Новиков Ю.А.* // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 5. С. 373. <https://doi.org/10.7868/S0544126914050068>
44. *Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А.* // Измерительная техника. 2009. № 2. С. 22.

45. *Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A.* // Proc. SPIE. 2010. V. 7718. P. 77180Y.
<https://doi.org/10.1117/12.853892>
46. *Новиков Ю.А., Раков А.В., Стеколин И.Ю.* // Измерительная техника. 1996. № 12. С. 26.
47. *Новиков Ю.А., Пешехонов С.В., Стрижков И.Б.* // Труды ИОФАН. 1995. Т. 49. С. 20.
48. *Новиков Ю.А., Пешехонов С.В., Раков А.В., Седов С.В., Симонов А.Н., Стеколин И.Ю., Стрижков И.Б.* // Известия РАН. Серия Физическая. 1993. Т. 57. № 8. С. 84.

Features of Formation of SEM Images in a Mode of Secondary Slow Electrons. 2. Structures with a Trapezoid Profile and Small Side Wall Inclinations

Yu. A. Novikov

The research of the image formation of silicon microstructures in a scanning electron microscope in secondary slow electrons and backscattered electrons collection mode is carried out. Trenches in electron silicon with a trapezoid profile of a structure with small inclination angles of side walls and nominal width 1 μm and depth 300 nm were used. It is shown, that from four mechanisms of the BSE formation of images known now, the contribution to the SSE formation of images is given only by two mechanisms. They take into account formation of the image by probe primary electrons both repeatedly multiple scattering primary and secondary electrons, leaving from a surface of a solid. Multiple scattering secondary electrons, moving on the direction of probe electrons, giving the basic contribution to formation of the BSE image, the contribution to formation of the SSE image do not give.

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