

УДК 537.533:537.533.8:537.533.35

СОВРЕМЕННАЯ РАСТРОВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ. 2. ТЕСТ-ОБЪЕКТЫ ДЛЯ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

© 2023 г. Ю. А. Новиков*

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

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

Поступила в редакцию 20.12.2022 г.

После доработки 24.02.2023 г.

Принята к публикации 24.02.2023 г.

Проведен обзор тест-объектов, предназначенных для калибровки растровых электронных микроскопов и проведения исследований вторичной электронной эмиссии рельефной поверхности твердого тела в растровом электронном микроскопе. Тест-объекты разделяются по двум параметрам — виду рельефа и профилю рельефа. По виду рельефа тест-объекты делятся на одиночные, шаговые и периодические структуры. По профилю рельефа тест-объекты делятся на объекты с прямоугольным профилем и объекты с трапециевидным профилем с большими и малыми углами наклона боковых стенок. Приведены примеры таких тест-объектов. Описаны их характеристики и методы аттестации параметров. Рассмотрены достоинства и недостатки тест-объектов. Показано, что наилучшими характеристиками обладают тест-объекты, представляющие собой шаговые структуры, состоящие из трапециевидных канавок с большими углами наклона боковых стенок. Тест-объекты создаются в монокремнии с ориентацией поверхности {100} методом жидкостного анизотропного травления кремния. Эти тест-объекты позволяют определять все характеристики растровых электронных микроскопов, влияющие на измерение линейных размеров рельефных структур, применяемых в микроэлектронике и нанотехнологии. С их помощью можно проводить корреляционные измерения, которые повышают точность калибровки растровых электронных микроскопов до десяти раз.

Ключевые слова: тест-объект, прямоугольная структура, трапециевидная структура, растровая электронная микроскопия, эффект стряхивания электронов.

DOI: 10.31857/S102809602312018X, **EDN:** ABROKCS

ВВЕДЕНИЕ

Растровую электронную микроскопию широко используют в науке, технике и технологиях [1–6]. Современная промышленность выпускает растровые электронные микроскопы (РЭМ) высокого качества, на которых реализовано большое количество разных методов исследования твердого тела [1–6]. Одним из таких методов является измерение линейных размеров рельефных структур [7–12]. Управление РЭМ с помощью компьютера и реализация цифровых изображений позволили осуществить автоматизацию измерений, обработки и анализа получаемой на РЭМ информации, что упростило и ускорило работу на РЭМ.

Однако в основе работы растрового электронного микроскопа в режиме формирования изображения исследуемого образца лежит эффект вторичной электронной эмиссии, закономерности которой были исследованы на безрельфных поверхностях [13–15]. Переносить эти закономерности на рельефные поверхности не корректно. Поэтому для корректного анализа получаемой в РЭМ информации потребовалось изучить

влияние рельефа поверхности твердого тела на вторичную электронную эмиссию. Необходимо отметить, что получаемая на РЭМ информация особенно важна для современных микро- и наноэлектроники, работающих с рельефными элементами с размерами, лежащими в микрометровом и нанометровом диапазонах [12, 16, 17].

В последние годы исследования вторичной электронной эмиссии на рельефных поверхностях были проведены. На их основе создан метод измерения линейных размеров с помощью РЭМ рельефных объектов размерами, лежащими в микрометровом и нанометровом диапазонах [16, 17], доведя его до практически полной автоматизации [12, 18, 19]. В связи с этим и с учетом большого объема имеющейся информации потребовалось написать серию обзоров о современном состоянии растровой электронной микроскопии, используемой в качестве метода измерения линейных размеров рельефных объектов, который широко применяют в производстве микро- и наноэлектроники.

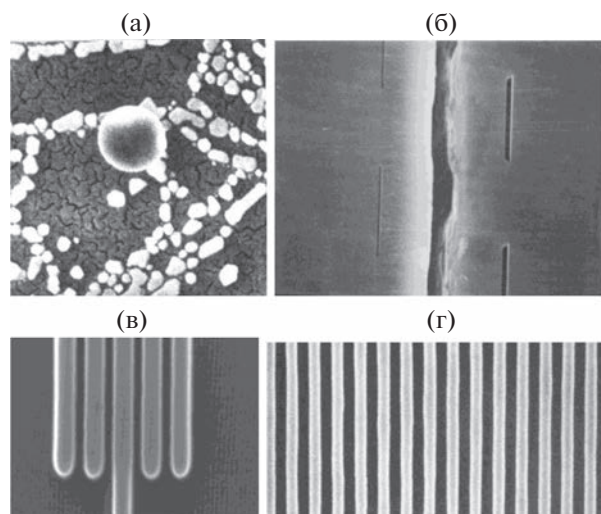


Рис. 1. Изображения сферического объекта (а), канавок РПС (Россия) (б), шаговой структуры BCR-97A/G-7 (Германия) (в) и периодической структуры HJ-1000 (Япония) (г), полученные на РЭМ в режиме сбора ВМЭ.

Первый обзор этой серии [15] был посвящен закономерностям вторичной электронной эмиссии. Знание этих закономерностей позволяет решить ряд проблем, возникающих при анализе РЭМ-изображений, даже без знания механизмов формирования изображения в РЭМ.

Настоящая работа является второй в серии работ, посвященных обзору состояния современной растровой электронной микроскопии в области измерения линейных размеров рельефных структур с помощью РЭМ в микрометровом и нанометровом диапазонах с привязкой этих измерений к Первичному эталону длины — метру. В работе приведен обзор тест-объектов, предна-

значенных для калибровки РЭМ и проведения исследований вторичной электронной эмиссии рельефной поверхности твердого тела на РЭМ.

ТЕСТ-ОБЪЕКТЫ

Для калибровки РЭМ и исследования вторичной электронной эмиссии рельефной поверхности твердого тела в растровом электронном микроскопе необходимо иметь тест-объекты рельефа и размера, пригодные для работы в РЭМ. Тест-объекты — это объекты, характеристики которых известны с высокой точностью из альтернативных измерений.

В принципе, в качестве тест-объектов для работы в РЭМ можно использовать любые рельефные структурированные образцы. Однако не для всех рельефов можно найти альтернативные методы измерений, и объекты не с любой структурой удобны для применения в РЭМ. Так, например, сферические объекты [20] (рис. 1а) обладают альтернативными методами измерений их диаметра, но они не удобны для измерений на РЭМ — невозможно точно сканировать по диаметру сферы. Поэтому такие тест-объекты в настоящей статье не рассмотрены. В табл. 1 приведены характеристики наиболее распространенных тест-объектов, используемых в настоящее время для работы в РЭМ [21–23].

Для понимания свойств тест-объектов, применения их для калибровки РЭМ и исследования вторичной электронной эмиссии рельефной поверхности твердого тела, приведем классификацию тест-объектов [24]. Тест-объекты разделяют по двум параметрам — виду и профилю рельефа.

Таблица 1. Наиболее распространенные тест-объекты для калибровки РЭМ

Тест-объект, Страна	Аттестуемый параметр	Метод аттестации	Номинальный размер, нм	Калибровка РЭМ
BCR-97A/G-7, Германия	Шаг	Интерференция	400	Увеличение
HJ-1000, Япония	Период	Дифракция	240	Увеличение
РПС, Россия	Ширина канавки	Эллипсометрия	90–500	Увеличение, диаметр зонда
МШПС-2.0К, Россия	Шаг	Интерференция	2000	Увеличение, диаметр зонда и другие параметры
Микрон, Россия	Ширина линии	РЭМ	1000, 1200	Увеличение

Виды рельефа тест-объектов

По виду рельефа тест-объекты делятся на одиночные, шаговые и периодические. В принципе, возможны и комбинированные тест-объекты, у которых есть 2 или более вида рельефа одновременно. Однако в реальных измерениях каждый вид рельефа используют отдельно. Поэтому комбинированные тест-объекты будем рассматривать как объекты, имеющие один вид рельефа — тот, который используют в данное время.

Одиночные тест-объекты. Одиночные тест-объекты имеют структуру, состоящую из одиночных рельефных элементов с одним аттестованным размером — шириной линии. Расстояние до ближайшего соседнего элемента или изменения рельефа должно превышать размер области многократного рассеяния электронов зонда с выбранной энергией. При энергии электронов 30 кэВ (в настоящее время это максимальная энергия электронов зонда на современных РЭМ) минимальное расстояние между одиночными элементами должно составлять не менее 5 мкм для тест-объектов из кремния.

Классическим примером одиночного тест-объекта являются объекты с рельефной прямоугольной структурой (РПС) [25–27] (рис. 16), представляющей собой канавки в кремнии с прямоугольным профилем. Количество канавок в РПС более 1000. Аттестованным значением является ширина канавки РПС. Аттестацию осуществляют методом эллипсометрии [28, 29]. Канавки расположены вдоль одной прямой линии на расстоянии ~5 мкм от боковой поверхности кремния. Длина канавок 5 мкм. Расстояние между канавками 5 мкм. На рис. 16 показаны канавки РПС с ширинами 150.7 и 434.7 нм, собранные в одном держателе.

Шаговые тест-объекты. Шаговые тест-объекты обладают рельефом, состоящим из нескольких элементов — шагов, включающих выступы и канавки. Количество элементов шаговой структуры небольшое — такое, чтобы можно было любое количество раз гарантировано попасть на любой выбранный шаг структуры. Обычно количество элементов (шагов) структуры не превышает 10. Аттестованным значением шаговой структуры является величина шага. Шаг структуры измеряется с высокой точностью с помощью лазерной интерферометрии.

Классическим примером такого шагового тест-объекта является BCR-97A/G-7 (Германия) [30], показанный на рис. 1в и представляющий собой выступы в кремнии. Этот тест-объект обладает комбинированной структурой, так как у него есть шаговая часть и одиночная. Однако аттестованным значением является именно величина шага (табл. 1). Поэтому будем относить этот тест-объект к шаговым.

Другим классическим шаговым тест-объектом является тест-объект МШПС-2.0К (Россия) [31]. Более подробно этот тест-объект рассмотрен ниже.

Периодические тест-объекты. Периодические тест-объекты обладают той же шаговой структурой, но количество шагов таково, что невозможно гарантировано попасть неограниченное количество раз на один и тот же выбранный элемент тест-объекта. Аттестованным значением периодической структуры является величина периода — среднего значения шага, определенного по большому количеству шагов. Аттестацию осуществляют методом дифракции лазерного излучения. Точность такой аттестации может быть очень высокой

Классическим примером периодических тест-объектов является НЈ-1000 (Япония) [32] (рис. 1г).

Профили рельефов тест-объектов

По профилю рельефа тест-объекты можно разделить на объекты с прямоугольным и с трапециевидным профилем с малыми или большими углами наклона боковых стенок [24].

Классификация тест-объектов по профилю их элементов [24, 33] основана на физических механизмах [34–37] формирования сигнала РЭМ, работающего в режиме регистрации вторичных медленных электронов (ВМЭ), при взаимодействии зонда РЭМ с рельефом поверхности.

Электронный зонд РЭМ имеет сложную форму как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Форма зонда в горизонтальной плоскости исследована достаточно подробно (например, [38–40]). Вертикальный профиль зонда в первом приближении можно представить схемой [24, 33], показанной на рис. 2. На схеме обозначены основные параметры вертикального сечения зонда: φ_d — угол сходимости–расходимости зонда, d_f — диаметр зонда в фокусе, h_f — глубина фокусировки, d — диаметр зонда на уровне исследуемой структуры, который может меняться в процессе эксперимента с помощью фокусировки зонда или перемещением исследуемого объекта по вертикали. В настоящее время параметры зондов современных серийных РЭМ составляют [24, 33]:

$$\varphi_d \sim 0.08^\circ, \quad h_f \sim 5\text{--}20 \text{ мкм}, \quad d_f \sim 10\text{--}30 \text{ нм}. \quad (1)$$

Тест-объекты с прямоугольным профилем рельефа. Профиль рельефа можно считать прямоугольным, если угол φ наклона боковых стенок относительно нормали к поверхности образца удовлетворяет условию [24, 33]:

$$\varphi < \varphi_d/2. \quad (2)$$

Неравенство (2) поясняется с помощью рис. 3, на котором сходящийся электронный зонд облучает

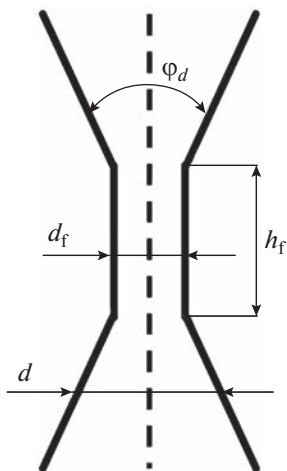


Рис. 2. Схема вертикального профиля электронного зонда РЭМ в области фокусировки.

поверхность канавки. Электронный пучок можно разделить на две составляющие, входящие в правую и левую части зонда.

На рис. 3а ось зонда проходит рядом со стенкой прямоугольной канавки, но вне канавки. Электроны правой части зонда облучают левую боковую стенку канавки, пересекая ее из вакуума в твердое тело, а электроны левой части зонда вообще не попадают на эту стенку. На рис. 3б ось зонда проходит рядом с левой стенкой канавки, но внутри канавки. Электроны левой части зонда пересекают левую стенку канавки из твердого тела в вакуум, а электроны правой части зонда вообще не попадают на эту стенку.

В работах [34–37] было показано, что существует механизм вторичной электронной эмиссии, названный эффектом “стряхивания” электронов из поверхностных электронных состояний. Этот механизм обладает асимметрией — при движении первичных электронов из вакуума в твердое тело эмиссия электронов из поверхностных электронных состояний происходит, в то время как при движении первичных электронов из твердого тела в вакуум такая эмиссия отсутствует. Поэтому в сигнал ВМЭ в области, соответствующей левой боковой стенке канавки, правая и левая части электронного зонда дают разный вклад. Аналогичная ситуация происходит и у правой стенки канавки (с учетом изменения частей зонда с левой на правую и наоборот). Согласно данным работ [34–37] вклад эффекта “стряхивания” в сигнал ВМЭ достигает [34–37] для тест-объектов из кремния 30–70% для горизонтальной поверхности и почти 100% для вертикальной. Это приводит к тому, что максимумы сигнала, соответствующие прохождению зонда около стенок канавок, оказываются очень узкими, так как их ширина соответствует только поло-

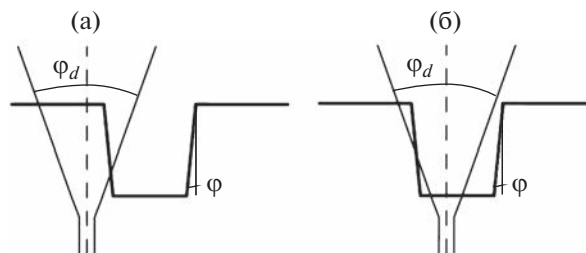


Рис. 3. Схемы облучения сходящимся пучком электронов структуры с прямоугольным профилем.

вине диаметра зонда [34–37]. Кроме того, положения максимумов сигналов зависит от того, как облучается структура [34–37]: сходящимся, расходящимся или сфокусированным электронным зондом.

Прямоугольные структуры удовлетворяют неравенству (2). Поэтому, учитывая величину угла φ_d сходимости–расходимости (1) зондов современных РЭМ, прямоугольными считаются структуры с углами наклона боковых стенок:

$$\varphi < 0.04^\circ, \quad (3)$$

а трапециевидными считают структуры с

$$\varphi > 0.04^\circ. \quad (4)$$

Таким образом, для РЭМ практически все структуры, созданные с помощью микро- и нанотехнологий и используемые в промышленности, являются трапециевидными структурами. Прямоугольные структуры создают по специальным технологиям [25–27] и используют только в качестве тест-объектов [25–27] или других специальных объектов.

Тест-объекты с трапециевидным профилем и малыми углами наклона боковых стенок. В растровой электронной микроскопии структурой с трапециевидным профилем рельефа и малыми углами наклона боковых стенок считается структура, удовлетворяющая условию [24, 33]:

$$\varphi_d/2 < \varphi = \arctg(s/h) < \arctg(d/h), \quad (5)$$

где s — проекция боковой наклонной стенки на ее основание, h — глубина канавки или высота выступа. Определение понятия диаметра зонда и методов его измерения будет описано в одном из следующих обзоров.

На рис. 4 показана ситуация, аналогичная рис. 3, но в случае выполнения условия (5). Электроны правой и левой частей зонда пересекают поверхность левой боковой стенки канавки из вакуума в твердое тело. Поэтому вклады эффекта “стряхивания” в сигнал ВМЭ от правой и левой частей зонда будут одинаковыми. Это приводит к тому, что максимумы сигналов ВМЭ, соответствующие прохождению зонда около стенок канавок, ока-

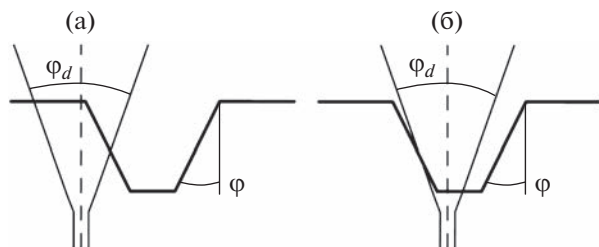


Рис. 4. Схемы облучения сходящимся пучком электронов структуры с трапециевидным профилем и малыми углами наклона боковых стенок.

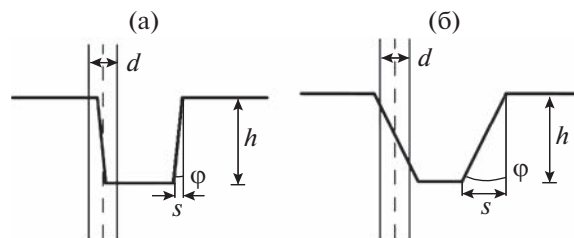


Рис. 5. Схемы облучения пучком электронов структуры с трапециевидным профилем и малыми (а) и большими (б) углами наклона боковых стенок.

зываются широкими, так как их ширина определяется сверткой ширины проекции боковой наклонной стенки и действующего диаметра зонда.

Более удобно неравенство (5) представить в виде

$$s = h \operatorname{tg} \varphi < d, \quad (6)$$

которое указывает, что диаметр d зонда столь велик или проекция s боковой наклонной стенки структуры столь мала, (но условие (2) не выполняется), что зонд может “засвечивать” сразу всю стенку (рис. 5а). Поэтому формирование сигнала за счет эффекта “стряхивания” будет осуществляться обеими половинами электронного зонда РЭМ.

Тест-объекты с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок. В растровой электронной микроскопии структурой с трапециевидным профилем рельефа и большими углами наклона боковых стенок считается структура, удовлетворяющая условию [24, 33]:

$$s = h \operatorname{tg} \varphi \geq d. \quad (7)$$

Учитывая диаметры зондов и глубины фокусировки (1) современных РЭМ, для высоты (глубины) рельефа объекта ~ 100 нм и более, получим

$$\varphi \geq \varphi_s \sim 6^\circ. \quad (8)$$

Такие углы наклона боковых стенок значительно больше углов расходимости современных зондов (1). Поэтому для анализа экспериментальных данных, полученных от трапециевидных структур с большими углами наклона боковых стенок, можно использовать формы зондов без учета их сходимости-расходимости (при условии, что глубина фокусировки больше глубины (высоты) рельефа).

На рис. 5б показана схема облучения зондом левой стенки канавки. В этом случае правая и левая части зонда пересекают левую стенку канавки одинаково (из вакуума в твердое тело) и эффект “стряхивания” дает одинаковый вклад в сигнал ВМЭ для правой и левой частей зонда. При выполнении условия (7) диаметр d зонда столь мал (или проекция s боковой наклонной стенки

структуры столь велика), что электронный зонд не может полностью покрыть боковую наклонную стенку (рис. 5б).

ПРИМЕРЫ ТЕСТ-ОБЪЕКТОВ

В настоящее время создано большое количество тест-объектов для растровой электронной микроскопии. Рассмотрим здесь только самые широко распространенные и широко используемые тест-объекты, представленные в табл. 1. На рис. 6 приведены схемы профилей прямоугольной канавки (рис. 6а) с параметрами канавки и положением зонда в канавке и профиля трапециевидных выступов и канавки (рис. 6б) с параметрами структуры. Для работы в РЭМ эти параметры должны быть аттестованы альтернативными способами.

Рельефные прямоугольные структуры

РПС [25–27] представляют собой одиночные канавки в кремнии с прямоугольным профилем рельефа (рис. 16). Конструкция РПС описана в работах [25–27], технология изготовления — в [25, 27], а аттестация ширины канавок методом эллипсометрии представлена в [25, 28, 29].

Объекты с аналогичной структурой и по аналогичной технологии были изготовлены в США [41]. Аттестацию таких структур осуществляли так же способом эллипсометрии [42]. Необходимо отметить, что российские [25, 27] и американские [41] РПС были созданы независимо друг от друга. Погрешность аттестации американского тест-объекта превышала 2 нм, а российской была 0.3–0.8 нм (табл. 2) [25, 27]. Несмотря на более низкое качество американских тест-объектов относительно российских, тест-объекты из США могли быть использованы для экспериментов, проводимых с российскими РПС не только для калибровки РЭМ, но и для исследования вторичной электронной эмиссии рельефной поверхности твердого тела [25, 34–37, 43]. Однако описания экспериментов с американскими тест-объектами в научной литературе нет. По-видимому, это

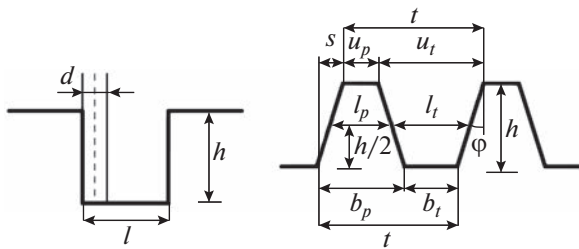


Рис. 6. Схемы профиля прямоугольной канавки (а) с параметрами канавки и положением зонда в канавке и профиля трапецевидных выступов и канавки (б) с параметрами структуры.

связано с тем, что такие канавки очень быстро зарастают из-за контаминации. В российских работах зарастание устраняли за счет использования РЭМ с высоким вакуумом и быстрого проведения эксперимента. Специальные исследования [43] показали, что скорость зарастания канавок РПС в российских экспериментах составляла 0.05 нм за один проход электронного зонда во время рабочего сканирования исследуемого объекта.

В России было изготовлено два вида РПС [25–27] – на электронном (n -РПС) и дырочном (p -РПС) кремнии. В качестве n -типа использовали кремний КЭФ-4 (кремний электронный, легированный фосфором, удельное сопротивление 4 Ом · см), а в качестве p -типа – КДБ-10 (кремний дырочный, легированный бором, удельное сопротивление 10 Ом · см) [27, 43]. Необходимо отметить, что только одна стенка канавки была выполнена из электронного или дырочного кремния, а другая – из аморфного нелегированного кремния [25–27]. Такая конструкция позволила обнаружить и исследовать новый механизм вторичной электронной эмиссии – эффект “стряхивания” электронов из поверхностных электронных состояний [34–37], который дает большой вклад (в ряде случаев более 50%) во вторичную электронную эмиссию.

Каждая РПС состоит из 4 объектов, имеющих канавки и отличающихся их шириной, собранными в одном держателе. В табл. 2 приведены аттестованные значения ширины канавок этих РПС. Изготавливали канавки фиксированной глубины

Таблица 2. Ширины канавок n - и p -РПС и погрешности их аттестации

№	Ширина, нм	
	n -РПС	p -РПС
1	92.8 ± 0.4	98.8 ± 0.4
2	128.5 ± 0.3	150.7 ± 0.3
3	344.4 ± 0.8	369.7 ± 0.8
4	486.2 ± 0.8	434.7 ± 0.8

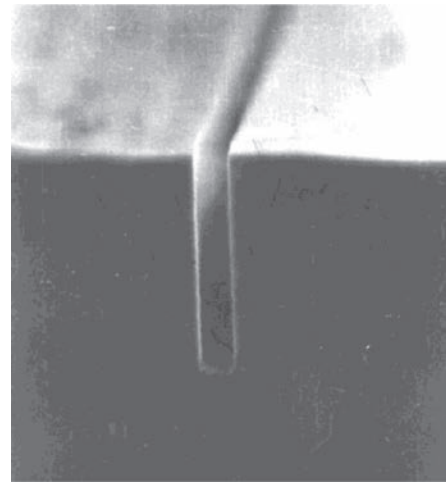


Рис. 7. Изображение скола канавки p -РПС с шириной 150.7 нм и глубиной 850 нм.

в диапазоне от 100 нм до 10 мкм. Отклонение от параллельности стенок [25] не превышало 1 нм по всей глубине. Однако в большинстве экспериментов использовали канавки глубиной 850 нм.

На рис. 7 приведено изображение в РЭМ, работающем в режиме сбора ВМЭ, скола канавки p -РПС шириной 150.7 нм и глубиной 850 нм, а на рис. 8 – изображение этой канавки, полученное на РЭМ, работающем в низковольтном (НВ) режиме (рис. 8а), и высоковольтных (ВВ) режимах при сборе вторичных медленных электронов (рис. 8б) и обратно рассеянных электронов (ОРЭ) (рис. 8в). Формы сигналов, из которых состоят эти изображения, приведены на рис. 9.

Тест-объекты РПС использовали для создания нескольких методов калибровки РЭМ [25, 26, 43], работающем в режиме сбора ВМЭ, включая первое в мире измерение диаметра зонда РЭМ в процессе эксперимента. Кроме того, с их помощью впервые был разработан метод амплитудного анализа ВМЭ сигналов РЭМ [25, 44] и на этой основе были проведены исследования эмиссии электронов из рельефных поверхностей. Этот анализ позволил обнаружить и исследовать свойства неизвестного ранее механизма генерации ВМЭ [34–37], названного эффектом “стряхивания” электронов из поверхностных электронных состояний налетающим на эту поверхность электроном,двигающимся из вакуума в твердое тело. Тест-объекты РПС внесли свой вклад в создание модели формирования РЭМ-изображения в режиме сбора ОРЭ [45, 46]. Наивысшим достижением работ с тест-объектами РПС является измерение с их помощью на РЭМ толщины естественного окисла кремния [25, 27, 47], которая оказалась равной

$$l_0(\text{SiO}_2) = 2.39 \pm 0.12 \text{ нм.}$$

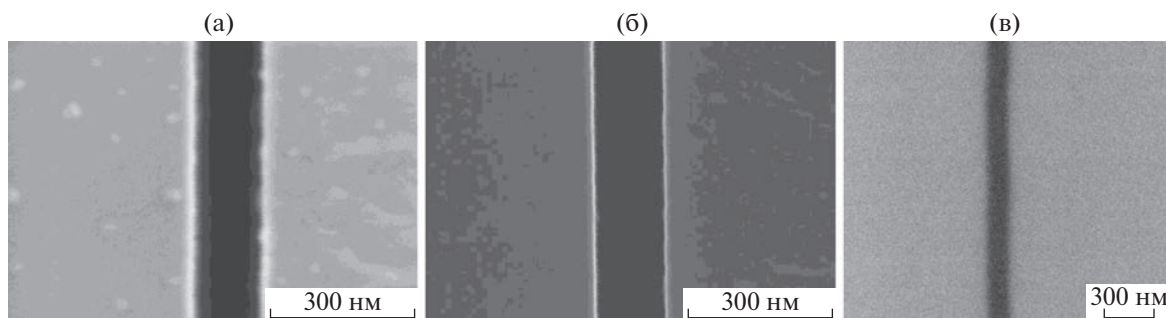


Рис. 8. Изображения, полученные при сканировании канавки *p*-РПС шириной 150.7 нм и глубиной 850 нм в режимах НВ (а), ВМЭ (б) и ОРЭ (в). Энергии электронов зонда 1 кэВ (НВ режим) и 20 кэВ (ВВ режим при сборе ВМЭ и ОРЭ).

Шаговая структура BCR-97A/G-7

Объекты BCR-97A/G-7 представляет собой комбинированную структуру на поверхности кремния: шаговую структуру из 5 выступов и одиночный выступ (рис. 1в), соответствующий среднему выступу шаговой структуры. На рис. 10 приведены сигналы ВМЭ, из которых состоит изображение тест-объекта на рис. 1в, полученные на РЭМ с большим диаметром зонда (рис. 10а), и сигнал шаговой части тест-объекта (рис. 10б), полученный на РЭМ с малым диаметром зонда, с приближением сигнала ломаными линиями. Аттестованным значением является величина шага (табл. 1), которая была измерена на электронно-оптической метрологической системе Физико-технического института Германии [48].

Основным недостатком структуры BCR-97A/G-7 является сложная форма профиля рельефа — трапеция с неровными краями и негладкими боковыми стенками. Все это затрудняет использование ее для калибровки РЭМ и исследования вторичной электронной эмиссии рельефной поверхности. На момент изготовления рельеф пред-

ставлял собой выступы с малыми углами наклона боковых стенок. Сигналы для этого случая приведены на рис. 10а. Однако для современных РЭМ, параметры которых (1) значительно выше, чем те, которые были на момент изготовления тест-объекта BCR-97A/G-7, он является структурой с большими углами наклона боковых стенок (рис. 10б). Используя разработанные методы измерения размеров структур с большими углами наклоны боковых стенок, удалось измерить параметры выступов и канавок. Для центрального выступа и боковых канавок этого выступа шаговой структуры эти параметры представлены в табл. 3.

Тест-объект BCR-97A/G-7 был предназначен для калибровки увеличения РЭМ и исследования сходства и различий формирования изображений в РЭМ одиночных и групповых структур. Однако в научной литературе результаты таких исследований не найдены. Были попытки изготовить структуры типа BCR-97A/G-7 в виде канавок по технологии анизотропного травления монокремния с ориентацией поверхности (110) [49]. Профиль структуры должен был быть прямоугольным, как у тест-объекта HJ-1000. Однако информация о создании структуры с таким профилем в литературе отсутствует. По-видимому, это связа-

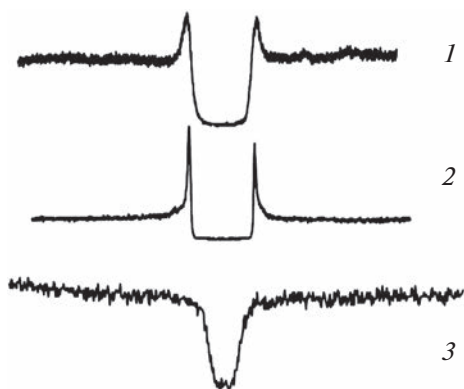


Рис. 9. Сигналы НВ, ВМЭ и ОРЭ (1, 2 и 3 соответственно), из которых состоят изображения канавки *p*-РПС с шириной 150.7 нм и глубиной 850 нм. Энергии электронов зонда 1 кэВ (НВ режим) и 20 кэВ (ВВ режим при сборе ВМЭ и ОРЭ).

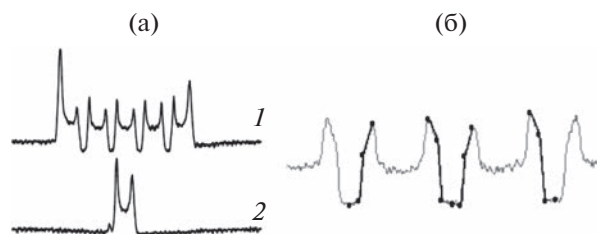


Рис. 10. Формы сигналов, из которых состоит изображение тест-объекта BCR-97A/G-7. На (а) сигнал 1 соответствует шаговой части тест-объекта, а сигнал 2 одиночной, полученные на РЭМ с большим диаметром зонда, и сигнал шаговой части тест-объекта (б), полученный на РЭМ с малым диаметром зонда, с приближением сигнала ломаными линиями.

Таблица 3. Параметры центрального элемента (выступа и канавки) шаговой структуры BCR-97A/G-7

Параметры	Верх, нм	Низ, нм
Выступ	211.7 ± 1.8	300.3 ± 2.3
Канавка	194.0 ± 1.5	96.4 ± 0.8

но с трудностями реализации технологии [49] анизотропного травления монокремния с ориентацией поверхности (110).

Периодическая структура HJ-1000

Периодическая структура HJ-1000 выполнена по технологии анизотропного травления монокремния с ориентацией поверхности (110) [49]. В результате получается рельеф с прямоугольным профилем, боковые стенки которого совпадают с кристаллографическими плоскостями кремния {111}, а дно канавок и верх выступов — с кристаллографическими плоскостями {110} (рис. 11а). Аттестацию периода рельефа HJ-1000 осуществляли дифракцией лазерного излучения. Аттестованное значение периода приведено в табл. 1. На рис. 1г показано изображение в РЭМ тест-объекта HJ-1000, а на рис. 11б изображение скола такого тест-объекта. Форма сигналов ВМЭ изображения этого тест-объекта приведена на рис. 12.

Тест-объект HJ-1000 выпускали серийно, он был предназначен для определения увеличения РЭМ [32]. Недостатки такого использования тест-объекта HJ-1000 рассмотрены ниже.

Тест-объект МШПС-2.0К

Для разработки методов калибровки РЭМ, включая одновременное определение диаметра зонда, и изучения влияния наклонных поверхностей на вторичную электронную эмиссию были созданы шаговые тест-объекты с трапецевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок [31, 33, 50–54]. Наибольшее распространение получил тест-объект, названный МШПС-2.0К [31, 33, 50–52] (Мера Ширины и

Периода, Специальная, номинальный размер шага структуры 2.0 мкм, Кремниевая).

Тест-объект МШПС-2.0К представляет собой кремниевый чип размером 1×1 см (рис. 13а). В центре чипа расположены 5 групп по 3 шаговые структуры (рис. 13б). Шаговые структуры в каждой группе помечены римскими цифрами I–III (рис. 13в). Это позволяет проследить историю каждой шаговой структуры и даже каждого элемента такой структуры. Шаговые структуры состоят из 11 канавок (10 выступов), профиль которых имеет вид трапеции с большими углами наклона боковых стенок (рис. 13г). Все группы структур соединены канавками шириной 10 мкм (рис. 13б), с помощью которых легко находить каждую группу. Около шаговой структуры ширина канавки уменьшается до 2 мкм (рис. 13в и 13г). Это позволяет выделить область тест-объекта, к которой можно обращаться неограниченное количество раз. Длина шаговых структур составляет 100 мкм.

В процессе изготовления тест-объекты МШПС-2.0К могли быть сделаны при одном значении номинальной величины шага 2 мкм. Однако размеры выступов и канавок у разных тест-объектов могут быть разными. Размеры верхних оснований выступов могут быть сделаны в диапазоне 10–700 нм, высоты рельефа 100–1200 нм, проекции боковых наклонных стенок в диапазоне 100–900 нм. На рис. 14 приведены изображения сколов элементов тест-объекта МШПС-2.0К с разными размерами выступов и канавок, а на рис. 15 изображения в атомно-силовом микроскопе (АСМ) этих объектов. Параметры структур на рис. 14 и 15 приведены в табл. 4.

Аттестация тест-объекта МШПС-2.0К была осуществлена на электронно-оптической метрологической системе [48] в Физико-техническом институте Германии. Аттестованное значение шага (5 и 6 выступы второй шаговой структуры центрального модуля на уровне направляющих линий) составило:

$$t = 2001 \pm 1 \text{ нм.} \quad (9)$$

На рис. 16 показаны изображения 5 и 6 выступов и канавки между ними второй шаговой структуры центрального модуля тест-объекта МШПС-2.0К на уровне направляющих линий, полученные на РЭМ с использованием ВМЭ (рис. 16а) и ОРЭ (рис. 16б) при энергии электронов зонда

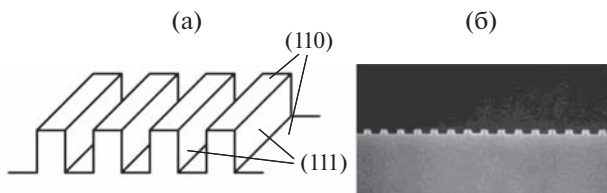


Рис. 11. Схема (а) соответствия кристаллографических плоскостей кремния сторонам структуры тест-объекта HJ-1000 и изображение скола (б) этой структуры.



Рис. 12. Форма сигнала ВМЭ, из которых состоит изображение тест-объекта HJ-1000.

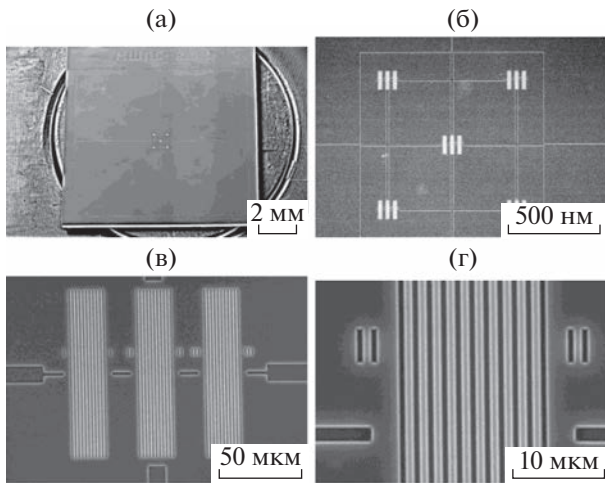


Рис. 13. Изображения элементов тест-объекта МШПС-2.0К при разных увеличениях.

20 кэВ. На рис. 17 приведены сигналы ВМЭ и ОРЭ (сигналы 1 и 2 соответственно), из которых состоят изображения, показанные на рис. 16. Сигналы имеют явно выраженную структуру — их можно описать ломаными линиями. Рис. 18 демонстрирует формы ВМЭ, ОРЭ и НВ сигналов (1, 2 и 3 соответственно) от выступа тест-объекта (ВМЭ и ОРЭ получены при $E = 20$ кэВ, а НВ при 1 кэВ).

Технология изготовления тест-объекта МШПС-2.0К основана на анизотропном жидкостном травлении монокремния с ориентацией поверхности (100) [49] сквозь окна в маске. В результате получают структуры с трапецевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок. Верх выступов и дно канавок совпадают с кристаллографическими плоскостями кремния {100}, а боковые стенки — с плоскостями {111}. На вставке на рис. 19 приведено изображение боковой наклонной стенки в просвечивающем электронном микроскопе [50]. Видно, что гладкость боковых стенок находится на атомарном уровне. Угол наклона φ боковых стенок выступов и канавок относительно перпендикуляра к

поверхности основания структуры является природной константой:

$$\operatorname{ctg} \varphi = \sqrt{2}, \quad (10)$$

а величина угла составляет

$$\varphi \approx 35.26^\circ. \quad (11)$$

Необходимо отметить, что не только средняя часть элементов шаговой структуры может быть использована для калибровки РЭМ, но и концевые участки тоже. На рис. 20а приведена схема концевой участка канавок тест-объекта МШПС-2.0К. Все боковые стенки канавок, включая стенку конца канавок, совпадают с кристаллографическими плоскостями кремния {111}. Это означает, что проекции боковых стенок на оси x и y равны друг другу $s_x = s_y$.

Такое свойство позволяет калибровать РЭМ по двум координатам [55, 56] используя только одно аттестованное значение. На рис. 20б приведено ВМЭ-изображение концевой участка канавок такого тест-объекта.

Тест-объекты МШПС-2.0К были проверены на качество их изготовления [50, 51]. Для этого на РЭМ при энергии электронов зонда 20 кэВ и сборе ВМЭ были зарегистрированы изображения всех элементов (два выступа и канавка между ними аналогично рис. 16а) второй шаговой структуры центрального модуля на уровне направляющих линий. На изображениях были измерены размеры T всех шагов. На рис. 21а приведены эти результаты [51]. Видно, что в пределах ошибок все размеры шагов совпадают. Среднее значение величины шага по всем изображениям составило $t = 2000.0 \pm 1.2$ нм, что в пределах ошибок совпадает с аттестованным значением шага (9) между 5 и 6 выступами. Зависимость величин проекций боковых наклонных стенок S , определяемых по ВМЭ-сигналам, от номера изображения и номера выступа на изображении представлены на рис. 21б [51]. Хорошо видно, что средние проекции S первых выступов на всех изображениях в пределах ошибок совпадают. Аналогичный результат получен и для вторых выступов. Однако среднее значение проекций первого выступа S_1

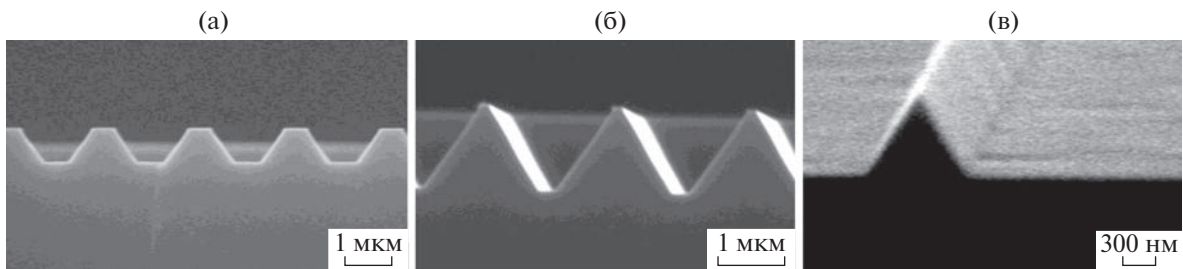


Рис. 14. Изображения сколов элементов тест-объекта МШПС-2.0К с разными размерами выступов и канавок.

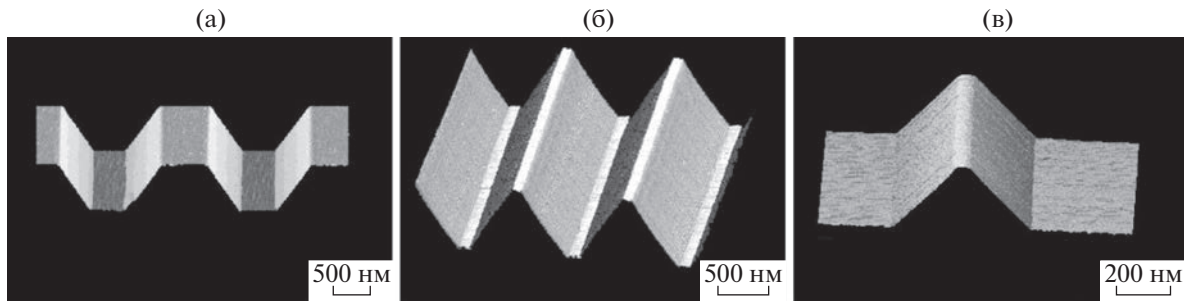


Рис. 15. Изображения в АСМ-элементов тест-объекта МШПС-2.0К с разными размерами выступов и канавок.

немного отличается от среднего значения проекций второго выступа S_2 на изображении

$$S_1 = 404.22 \pm 0.12 \text{ нм}, \quad S_2 = 402.79 \pm 0.11 \text{ нм}.$$

Отличие небольшое — менее 2 нм, но оно есть. В работе [51] это было объяснено наличием небольшой нелинейности сканирования, равной 7×10^{-4} , в РЭМ, на котором проводили измерения.

В связи с тем, что РЭМ применяют для измерения размеров объектов в диапазоне от 100 мкм до 10 нм [16, 17], были изготовлены тест-объекты МШПС-2.0К с малыми размерами верхних оснований выступов. В табл. 5 приведены размеры верхних оснований изготовленных тест-объектов МШПС-2.0К в диапазоне менее 100 нм [26].

Тест-объекты МШПС-2.0К оказались удачными не только для растровой электронной микроскопии, но и для атомно-силовой микроскопии [31, 33, 57, 58] (рис. 15). Поэтому атомно-силовая микроскопия использована как альтернативный источник информации об этом тест-объекте и для создания альтернативного метода измерения линейных размеров рельефа [16, 17, 31, 33, 57, 58]. Исследования проводили как на серийных АСМ (рис. 15), так и на метрологической установке LR AFM Физико-технического института Германии [59, 60]. На рис. 22а приведено трехмерное изображение шаговой структуры тест-объекта МШПС-2.0К, а на рис. 22б двумерное изображение. На рис. 23 показаны сигналы, из которых состоит двумерное изображение тест-объекта.

Тест-объекты МШПС-2.0К выпускали серийно. Для проверки качества их изготовления были разработаны специальные методы [50, 51], а так-

же методы их использования для калибровки РЭМ [58, 61–63]. Тест-объекты прошли международные сличения (Россия–Германия) [64]. Получили Сертификат об утверждении типа средств измерений. Для их конструкции и методов калибровки РЭМ и АСМ разработаны государственные стандарты России (ГОСТ Р) [65, 66].

Тест-объекты МШПС-2.0К использовали для разработки методов определения параметров РЭМ, оказывающих влияние на измерение линейных размеров рельефных объектов в микрометровом и нанометровом диапазонах, и исследования механизмов формирования изображения в РЭМ, работающих в НВ режиме [67] и в ВВ режиме при регистрации ВМЭ [67, 68] и ОРЭ [67, 69].

Тест-объект Микрон

Рассмотрим еще один тест-объект — Микрон, который использовали некоторое время как корпоративный тест-объект на российских предприятиях микроэлектроники. Он представляет собой комбинированный тест-объект, состоящий из одиночных выступов и канавок разной ширины и шаговых структур на поверхности электронного монокремния. На рис. 24 приведено ОРЭ-изображение тест-объекта Микрон в районе выступов и канавок с номинальными ширинами 1.0 и 1.2 мкм [70], а на рис. 25 показаны изображения канавок с номинальной шириной 1.0 мкм и глубиной 0.3 мкм, полученные с использованием ВМЭ (рис. 25а) и ОРЭ (рис. 25б). Рис. 26 демонстрирует сигналы ВМЭ и ОРЭ (сигналы 1 и 2 соответственно), из которых состоят изображения на рис. 25. В работе [71] на РЭМ были измерены параметры выступов и канавок с номинальными ширинами 1.0 и 1.2 мкм. Их значения представлены в табл. 6.

Тест-объект Микрон использовали для изучения влияния энергии электронов зонда на форму сигналов ВМЭ [71] и исследования механизмов формирования сигналов ВМЭ [72] и ОРЭ [70].

Таблица 4. Параметры структур, изображения которых приведены на рис. 14 и 15

Номера рисунков	Верх выступа, нм	Высота рельефа, нм
14а и 15а	520	650
14б и 15б	110	1150
14в и 15в	30	320

ВЫБОР НАИЛУЧШЕГО ТЕСТ-ОБЪЕКТА ДЛЯ РЭМ

Все рассмотренные выше тест-объекты обладают разными свойствами и могут быть использованы для определения некоторых характеристик РЭМ (табл. 1) и проведения исследований вторичной электронной эмиссии на рельефных объектах. Так, тест-объект BCR-97A/G-7 позволяет определять увеличение РЭМ. Для современных РЭМ (с малыми диаметрами зондов) он дает возможность определять и диаметр зонда. Это очень важный параметр для измерения линейных размеров с помощью РЭМ. В исследованиях вторичной электронной эмиссии на рельефной поверхности твердого тела тест-объект BCR-97A/G-7 не применяли.

Тест-объект HJ-1000 дает возможность определения только увеличения растрового электронного микроскопа. Однако здесь встречаются дополнительные трудности. Несмотря на очень высокое качество изготовления данного тест-объекта [32], он, как и все периодические тест-объекты, обладает одним существенным недостатком. Обычно в РЭМ наблюдают один или, в крайнем случае, несколько шагов рельефа. Считается, что расстояние между эквивалентными стенками соседних элементов равно периоду, измеренному посредством дифракции света. Однако в действительности это не так.

Идеальных технологий не бывает. Поэтому величины шагов в периодической структуре разные. На рис. 1г видно, что ширины выступов структуры в разных местах разные. Величины шагов распределены по некоторому закону. Обычно считается, что это распределение Гаусса, ширина которого определяется гауссовским параметром стандартного отклонения σ_r . Поэтому при измерении в РЭМ одного шага рельефа, невозможно получить точность локализации края элемента структуры лучше σ_r .

В работе [73] было проведено моделирование методом Монте-Карло дифракции света на решетке с переменным (распределенным по нормальному закону со стандартным отклонением σ_r) шагом. Было показано, что погрешность ΔT определения периода T такой структуры с N элементами (при дифракционных измерениях периода в дифракции участвуют N шагов) описывается формулой стандартного отклонения среднего [73, 74]

$$\Delta T = \sigma_r / \sqrt{N}, \quad (12)$$

при N измерениях случайной величины, в качестве которой использован шаг решетки T . То есть, при определении периода дифракционной решетки T , происходит статистическое (в данном случае по Гауссу) усреднение шага решетки. Модель усреднения необходимо знать для опреде-

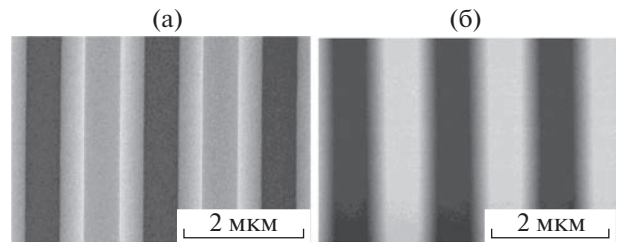


Рис. 16. ВМЭ (а) и ОРЭ (б) изображения 5 и 6 выступов и канавки между ними тест-объекта МШПС-2.0К.

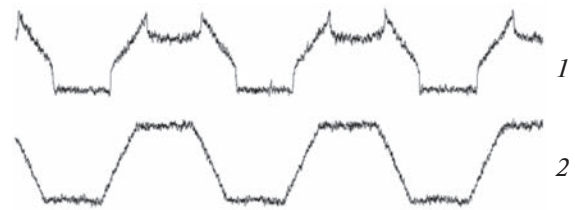


Рис. 17. Суммированные по 10 сигналы ВМЭ и ОРЭ (сигналы 1 и 2 соответственно), из которых состоят ВМЭ и ОРЭ изображения шага, включающего 5 и 6 выступы (5, 6 и 7 канавки) шаговой структуры тест-объекта МШПС-2.0К.

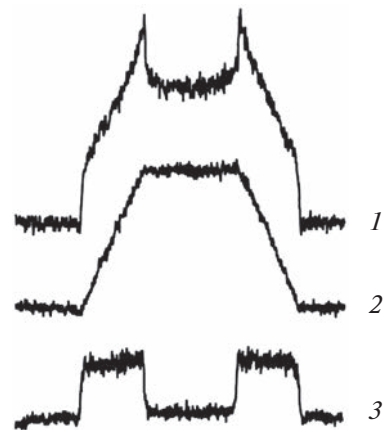


Рис. 18. Сигналы ВМЭ, ОРЭ и НВ (сигналы 1–3 соответственно), полученные при сканировании выступа тест-объекта МШПС-2.0К.

ния значения периода T и его погрешности ΔT при измерениях, в которых нет автоматического усреднения или когда используют усреднение по другому закону. Если же для калибровки исполь-

Таблица 5. Размеры верхних оснований выступов u_p разных образцов МШПС-2.0К в диапазоне менее 100 нм

u_p , нм							
5.4 ± 1.6	13 ± 2	16 ± 2	25 ± 2	30 ± 3	45 ± 3	63 ± 1	87 ± 4

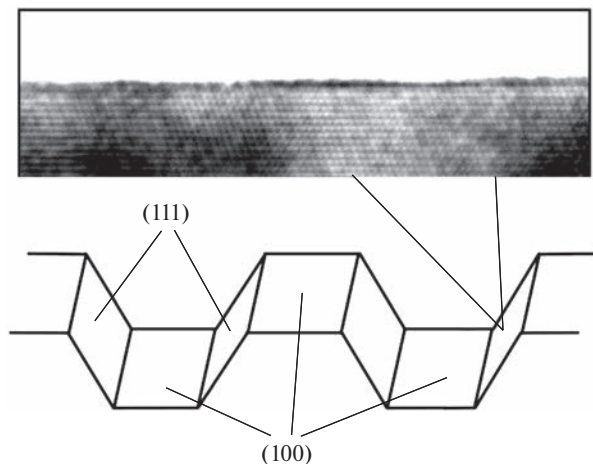


Рис. 19. Схема кристаллографических плоскостей кремния в структуре, полученной анизотропным травлением пластины с ориентацией поверхности {100}. На вставке изображение в просвечивающем электронном микроскопе боковой наклонной стенки канавки тест-объекта МШПС-2.0К.

зовать только один шаг периодической структуры, то в качестве погрешности периода надо использовать

$$\Delta T = \sigma_r. \quad (13)$$

В работе [32] приведены период тест-объект НЖ-1000 $T = 240$ нм и погрешность его дифракционной аттестации $\Delta T = 1$ нм. Величина стандартного отклонения σ_r не приведена. Но ее можно оценить с помощью формулы (12). Для этого оценим количество шагов рельефа N , участвующих в дифракции. Будем считать, что диаметр лазерного пятна на структуре $d_L = 5$ мм. Тогда количество шагов, участвующих в дифракции, составит $N = 20833$, а величина стандартного отклонения будет $\sigma_r = 144$ нм (для гауссовского распределения). В соответствии с формулой (13) получим, что, при использовании в РЭМ измерениях одного шага, величина шага структуры составляет

$$T = 240 \pm 144 \text{ нм}. \quad (14)$$

Достижение дифракционной точности шага решетки в измерениях на РЭМ возможно при искусственном усреднении измеряемого размера по различным элементам периодической структуры. Закон усреднения должен быть таким же, как и при дифракционных измерениях периода. Это возможно путем наблюдения сразу N шагов на экране РЭМ. Но тогда увеличение будет в N раз меньше. Другой способ состоит в проведении N измерений расстояний между эквивалентными стенками на разных элементах периодической структуры и статистическая обработка результатов. Для этого в процессе измерения необходимо сдвигать периодическую структуру в пределах

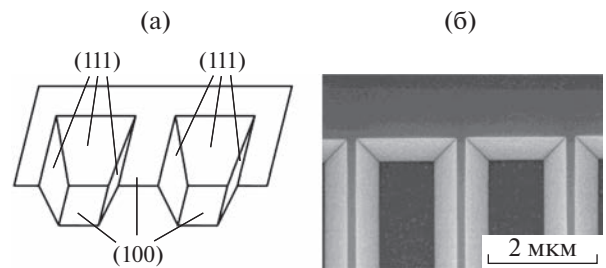


Рис. 20. Схема (а) концевой участка канавок тест-объекта с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок, выполненного по технологии анизотропного травления монокремния с ориентацией поверхности {100}, и ВМЭ изображение (б) концевой участка канавок такого тест-объекта.

расстояний, равных диаметру пятна электромагнитного излучения, с помощью которого определен период. Но эти данные обычно не известны. Кроме того, измерения на разных частях периодической структуры приводят к необходимости дополнительной фокусировки зонда РЭМ. Дополнительная фокусировка может привести к большой погрешности измерения расстояний [75], сводящей на нет высокую дифракционную точность периодической структуры.

Таким образом, тест-объект НЖ-1000 позволяет измерить увеличение РЭМ (как и тест-объект BCR-97A/G-7), но это занимает значительно больше времени и в процессе возникают большие ошибки измерения, которые трудно даже оценить. В исследованиях вторичной электронной эмиссии на рельефной поверхности твердого тела тест-объект НЖ-1000 использовать невозможно. Это обусловлено тем, что обе стенки структуры одинаковые. Поэтому использовать наклонное

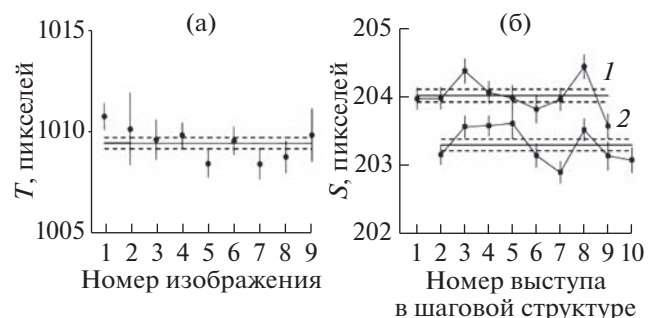


Рис. 21. Величины шагов, усредненных на разных изображениях (а), и величины средних значений проекций боковых наклонных стенок каждого выступа на разных изображениях (б), определенных на первом (зависимость 1) и втором (зависимость 2) выступах на изображении в зависимости от номера выступа в шаговой структуре. Сплошные линии соответствуют средним значениям, а штриховые линии ограничивают интервал ошибок.

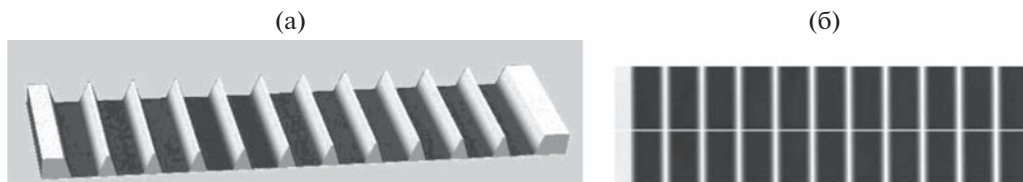


Рис. 22. Трехмерное изображение (а) в LR-AFM шаговой структуры тест-объекта МШПС-2.0К и двумерное изображение (б).

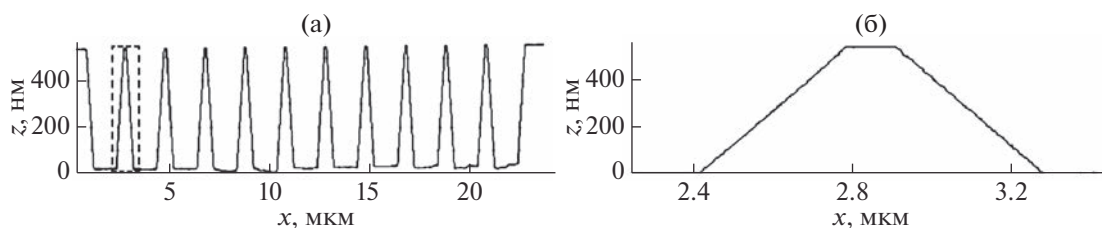


Рис. 23. Формы сигналов шаговой структуры (а) и выступа (б) тест-объекта МШПС-2.0К, полученные на метрологической системе LR-AFM.

положение канавок (как это выполнено с канавками РПС [34–37], у которых стенки канавки разные) не дает возможность разделить вклады разных механизмов генерации вторичных электронов.

На современном уровне при калибровке РЭМ недостаточно измерение только увеличения РЭМ. Тест-объекты РПС позволяют определять не только увеличение РЭМ [25, 26, 76], но и диаметр электронного зонда [25, 26, 76], и вертикальные параметра зонда [77]: ϕ_d – угол сходимости–расходимости зонда [77], d_f – диаметр зонда в фокусе, h_f – глубина фокусировки.

Однако и у РПС есть недостатки. К ним относится необходимость иметь как минимум две канавки РПС с двумя разными ширинами (лучше четыре канавки для подтверждения, что при смене канавок и, следовательно, перефокусировке, диаметр зонда не изменился [76, 78]). Кроме того, перефокусировка зонда зависит от опыта работы оператора РЭМ (фокусируется он сходящимся или расходящимся зондами). Причем (как показал опыт большого количества калибровок разных РЭМ с помощью РПС) [76, 78] операторы могут фокусироваться одинаково (облучать канавки только сходящимися или только расходящимися зондами за все время эксперимента) или при облучении канавок фокусировка осуществляется по-разному для каждой канавки. Эти особенности проведения экспериментов с канавками РПС будут подробно объяснены в следующих работах данной серии обзоров.

Тест-объекты РПС достаточно широко использовали для исследования вторичной электронной эмиссии на рельефной поверхности

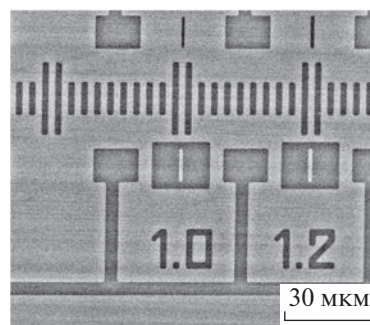


Рис. 24. ОРЭ изображение тест-объекта Микрон в районе выступов и канавок с номинальными ширинами 1.0 и 1.2 мкм при $E = 25$ кэВ.

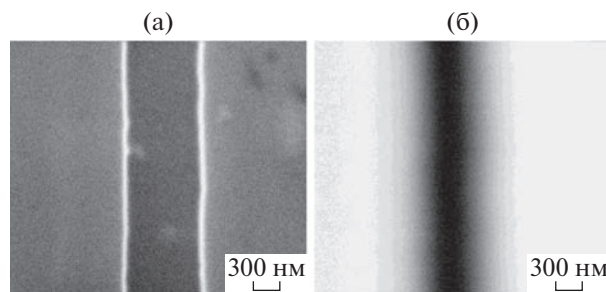


Рис. 25. ВМЭ (а) и ОРЭ (б) изображения канавки с номинальной шириной 1 мкм и глубиной 300 нм тест-объекта Микрон.

твердого тела [34–37]. С их помощью удалось обнаружить и выделить новый механизм генерации вторичных медленных электронов – эффект стряхивания электронов из поверхностных элек-

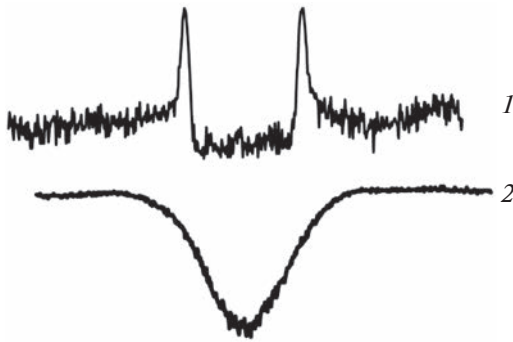


Рис. 26. Сигналы ВМЭ и ОПЭ (1 и 2 соответственно), полученные при сканировании канавки с номинальной шириной 1 мкм и глубиной 300 нм тест-объекта Микрон.

тронных состояний [35–37], и создать модель формирования изображений в РЭМ [37, 45, 46].

Тест-объект Микрон использовался для разработки методов измерения размеров реальных структур, создаваемых по технологии микроэлектроники [71]. Кроме того, тест-объект внес большой вклад в исследования формирования изображений в РЭМ, работающих в режимах обратно рассеянных электронов [70] и вторичных медленных электронов [72].

Наилучшими свойствами обладают тест-объекты МШПС-2.0К [31, 33, 50–52] или аналогичные шаговые структуры с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок [53], выполненные по технологии анизотропного травления кремния с ориентацией поверхности (100) [49]. Во-первых, при их использовании калибровка РЭМ может быть осуществлена по одному изображению тест-объекта (даже по одному сигналу) [61, 62], что значительно (в десятки раз) уменьшает время калибровки РЭМ. Во-вторых, точность калибровки сильно (в несколько раз) возрастает из-за проведения корреляционных измерений [62]. В-третьих, тест-объект МШПС-2.0К долговечен относительно загрязнений, которые возникают из-за эффекта контаминации [79]. С помощью тест-объекта МШПС-2.0К возможно [79] проводить калибровку РЭМ по одной области тест-объекта до 7 раз (и до 1000 раз, если использовать все элементы тест-объекта). В-четвертых, тест-объект

Таблица 6. Параметры канавок тест-объекта Микрон

Номинальный размер, нм	Канавка		Выступ	
	верх, нм	низ, нм	верх, нм	низ, нм
1000	1017 ± 7	903 ± 5	968 ± 5	1100 ± 6
1200	1319 ± 7	1206 ± 6	1175 ± 6	1332 ± 7

МШПС-2.0К позволяет проводить корреляционные измерения [51].

Количественно корреляция характеризуется коэффициентом корреляции

$$K = \frac{(\overline{x_i x_j}) - \bar{x}_i \bar{x}_j}{\sigma_i \sigma_j}. \quad (15)$$

Здесь x_i и x_j ($i \neq j$) – характеристики объектов (в нашем случае координаты контрольных точек на ВМЭ сигналах РЭМ [51]), 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

$$-1 \leq K \leq +1. \quad (16)$$

В случае осуществления корреляции величина коэффициента корреляции должна быть близка к единице. Однако наличие шумов на сигналах уменьшает величину коэффициента корреляции [51]. В табл. 7 [51] приведены коэффициенты корреляции координат пар контрольных точек на сигналах РЭМ для всех выступов исследованного тест-объекта. Все коэффициенты корреляции лежат в диапазоне 0.8–0.9, что указывает на высокое качество тест-объекта. Отклонение коэффициента корреляции от единицы объясняется шумами на сигнале. Именно коэффициент корреляции количественно характеризует качество изготовления тест-объекта МШПС-2.0К [51].

Однако знание коэффициента корреляции не только характеризует качество изготовления тест-объекта МШПС-2.0К, но и позволяет проводить корреляционные измерения [51]. 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 [74]:

$$\sigma_{12}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2K\sigma_1\sigma_2. \quad (17)$$

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

$$\sigma_{12} (K = 1) = |\sigma_1 - \sigma_2|, \quad (18)$$

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

$$\sigma_{12} (K = 0) = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}. \quad (19)$$

Таблица 7. Коэффициенты корреляции координат пар контрольных точек на сигналах РЭМ для первого и второго выступов на каждом изображении шаговой структуры, состоящей из двух выступов и канавки между ними

№ 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

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

$$\sigma_{12}(K = -1) = \sigma_1 + \sigma_2. \quad (20)$$

Выражение (20) указывает, что, хотя координаты точек имеют случайный разброс величин, неопределенность расстояния между этими точками ведет себя как систематическая неопределенность и ее величина значительно больше, чем величины, представленные выражениями (18) и (19).

В работе [51] 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 составила

$$T = 1009.96 \pm 0.11 \text{ пикселей}, \quad (21)$$

а обычное измерение показало

$$T = 1010.6 \pm 0.7 \text{ пикселей}. \quad (22)$$

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.

Необходимо отметить, что на самом деле результаты (21) и (22) были получены с использованием одних и тех же исходных данных. Просто эти данные были обработаны с помощью корреляционных и некорреляционных методов обработки данных. Поэтому в процессе измерений надо всегда анализировать результаты измерений на возможность корреляционных измерений.

Тест-объект МШПС-2.0К позволяет осуществить измерение и других (не менее важных для

измерения размеров рельефных структур на растровых электронных микроскопах) параметров РЭМ. В настоящее время удастся измерять не только размер пикселя на изображении (аналог увеличения изображения) [31, 61, 62] в том числе и по двум координатам [55, 56], но и калибровать РЭМ в широком диапазоне увеличений [80], 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 [75], плотность распределения электронов в зонде РЭМ [40], ортогональность зонда [56] относительно плоскости образца и линейность сканирования [81] в микроскопе. Все эти параметры оказывает сильное влияние на результаты измерения линейных размеров рельефных структур особенно в нанодиапазоне. Кроме создания методов измерения параметров растровых электронных микроскопов тест-объект МШПС-2.0К использовали для исследования механизмов формирования изображений в РЭМ во всех режимах его работы [46, 67–69] – низковольтном и высоковольтных режимах при регистрации вторичных медленных электронов и обратно рассеянных электронов.

Сравним возможности калибровки (увеличения или размера пикселя на изображении) РЭМ с помощью периодического тест-объекта НЖ-1000 и шагового тест-объекта МШПС-2.0К, созданных по одинаковым технологиям [49] и имеющих одинаковую точность аттестации. Аттестованным значением шага тест-объекта МШПС-2.0К является величина $t = 2001$ нм при погрешности аттестации $\Delta t = 1$ нм. В то же время на интервале 2001 нм укладывается 8.3 шагов тест-объекта НЖ-1000. Таким образом, согласно выражению (12) с помощью тест-объекта НЖ-1000 можно аттестовать интервал 2001 нм с погрешностью $\Delta t = 50$ нм.

Хорошо видно, что, хотя погрешности аттестации элементов тест-объектов НЖ-1000 и МШПС-2.0К одинаковые, тест-объект МШПС-2.0К позволяет в 50 раз точнее калибровать увеличение РЭМ, чем тест-объект НЖ-1000. Кроме того, тест-объект МШПС-2.0К позволяет проводить корреляционные измерения [51], которые повышают точность калибровки РЭМ еще в несколько раз.

Таким образом, из всех рассмотренных тест-объектов для калибровки РЭМ наилучшими характеристиками обладает тест-объект МШПС-2.0К. Он точнее других позволяет осуществить калибровку увеличения РЭМ (размера пикселя), занимает меньшее время для калибровки, позволяет определять большое количество параметров РЭМ, которые до сих пор не удавалось измерять, и имеет альтернативные методы измерения характеристик тест-объекта на АСМ, что позволяет объективно контролировать параметры тест-объекта.

Кроме того, тест-объект МШПС-2.0К широко использовали для изучения влияния рельефа поверхности твердого тела на вторичную электронную эмиссию [46, 67–69, 82]. Это позволило создать виртуальный растровый электронный микроскоп [82, 83] — компьютерную программу, которая, используя входные данные, воспроизводящие размеры и форму объекта, исследуемого на реальном РЭМ, генерирует изображение, аналогичное изображению, полученному на реальном РЭМ, за время, сравнимое с временем получения изображения на реальном РЭМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Среди тест-объектов, предназначенных для калибровки растровых электронных микроскопов и исследования вторичной электронной эмиссии рельефной поверхности твердого тела, наилучшими характеристиками обладают тест-объекты МШПС-2.0К, являющиеся шаговыми структурами, состоящими из выступов и канавок в монокремнии с трапецевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок, полученных анизотропным травлением монокремния с ориентацией поверхности {100}. Тест-объекты позволяют определять все характеристики РЭМ, влияющие на измерение линейных размеров рельефных структур, применяемых в микро- и нанoeлектронике. Кроме того, тест-объекты МШПС-2.0К широко использовали в исследованиях вторичной электронной эмиссии рельефной поверхности в РЭМ. Однако и другие тест-объекты (РПС и Микрон) внесли большой вклад в исследование вторичной электронной эмиссии рельефной поверхности твердого тела. Эти результаты будут рассмотрены в следующих обзорах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reimer L. Scanning electron microscopy: physics of image formation and microanalysis / Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, 1998.
2. Практическая растровая электронная микроскопия / Под ред. Дж. Гоулдстейна и Х. Яковица. Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 656 с.
3. Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Э. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 303 с.
4. Микроанализ и растровая электронная микроскопия / Под ред. Ф. Мориса и др. Пер. с фр. М.: Металлургия, 1985. 392 с.
5. Криштал М.М., Ясников И.С., Полунин В.И., Филатов А.М., Ульянчиков А.Г. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения. М.: Техносфера, 2009. 208 с.
6. 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.
7. Hatzuzawa T., Toyoda K., Tanimura Y. // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. № 3. P. 975.
8. Новиков Ю.А., Раков А.В. // Измерительная техника. 1999. № 1. С. 14.
9. 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. New York—Basel, 2001. P. 295.
10. Postek M.T. // Proc. SPIE. 2002. V. 4608. P. 84.
11. Постек М. // Вестник технического регулирования. 2007. № 7. С. 8.
12. Тодуа П.А., Быков В.А., Волк Ч.П., Горнев Е.С., Желкобаев Ж., Зыкин Л.М., Ишанов А.Б., Календин В.В., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., Прохоров А.М., Раков А.В., Саунин С.А., Черняков В.Н. // Микросистемная техника. 2004. № 3. С. 25.
13. Бронштейн И.М., Фрайман Б.С. Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 407 с.
14. Шульман А.З., Фридрихов С.А. Вторично-эмиссионные методы исследования твердого тела. М.: Наука, 1977. 551 с.
15. Новиков Ю.А. // Поверхность. Рентген., синхротрон. нейтрон. исслед. 2023. № 5. С. 80.
16. Гавриленко В., Новиков Ю., Раков А., Тодуа П. // Наноиндустрия. 2009. № 4. С. 36.
17. Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. // Proc. SPIE. 2009. V. 7405. P. 740504. <https://www.doi.org/10.1117/12.826164>
18. Gavrilenko V.P., Kalnov V.A., Novikov Yu.A., Orlikovsky A.A., Rakov A.V., Todua P.A., Valiev K.A., Zhikharev E.N. // Proc. SPIE. 2009. V. 7272. P. 727227. <https://www.doi.org/10.1117/12.814062>
19. Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A., Volk Ch.P. // Proc. SPIE. 2009. V. 7272. P. 72720Z. <https://www.doi.org/10.1117/12.813514>
20. Дицман С.А., Злобин В.А., Невзорова Л.Н., Фаворская Л.П. // Известия АН СССР. Серия физическая. 1982. Т. 46. № 12. С. 2388.

21. Novikov Yu.A., Gavrilenko V.P., Ozerin Yu.V., Rakov A.V., Todua P.A. // Proc. SPIE. 2007. V. 6648. P. 66480R. <https://www.doi.org/10.1117/12.733134>
22. Novikov Yu.A., Ozerin Yu.V., Rakov A.V., Todua P.A. // Measurement Sci. Technol. 2007. V. 18. P. 367. <https://www.doi.org/10.1088/0957-0233/18/2/S07>
23. Гавриленко В.П., Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. С. 31.
24. Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. // Измерительная техника. 2009. № 2. С. 22.
25. Новиков Ю.А., Пешехонов С.В., Стрижков И.Б. // Труды ИОФАН. 1995. Т. 49. С. 20.
26. Novikov Yu.A., Gavrilenko V.P., Rakov A.V., Todua P.A. // Proc. SPIE. 2008. V. 7042. P. 704208. <https://www.doi.org/10.1117/12.794834>
27. Novikov Yu.A. // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2019. V. 13. № 6. P. 1284. <https://www.doi.org/10.1134/S1027451019060454>
28. Новиков Ю.А., Пешехонов С.В. // Труды ИОФ АН. 1995. Т. 49. С. 107.
29. Novikov Yu.A. // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2020. V. 14. № 1. P. 105. <https://www.doi.org/10.1134/S1027451020010127>
30. Bosse H., Mirande W., Frase C.G., Bruck H.-J., Lehnigk S. Comparison of linewidth measurements on COG mask // 17 Europ. Mask Conf. on Mask Technology for Integrated Circuits and Micro-Components (EMC-2000). Munich. 2000. P. 111.
31. 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.
32. Nakayama Y., Okazaki S., Sugimoto A. // J. Vacuum Sci. Technol. B. 1988. V. 6. P. 1930.
33. Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. // Proc. SPIE. 2010. V. 7718. P. 77180Y. <https://www.doi.org/10.1117/12.853892>
34. Новиков Ю.А., Раков А.В. // Труды ИОФ АН. 1998. Т. 55. С. 3.
35. Новиков Ю.А., Прохоров А.М., Раков А.В. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1993. № 3. С. 22.
36. Новиков Ю.А., Раков А.В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 1999. № 8. С. 24.
37. Novikov Yu.A. // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2022. V. 16. № 5. P. 806. <https://www.doi.org/10.1134/S1027451022050147>
38. Волк Ч.П., Горнев Е.С., Новиков Ю.А., Плотников Ю.И., Раков А.В., Тодуа П.А. // Труды ИОФ АН. 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://www.doi.org/10.1117/12.794891>
40. Новиков Ю.А. // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 5. С. 373. <https://www.doi.org/10.7868/S0544126914050068>
41. Postek M.T. // Scanning Microscopy. 1989. V. 3. № 4. P. 1087.
42. Geist J., Belzer B., Miller M.L., Roitman P. // J. Res. National Institute of Standards and Technology. 1992. V. 97. № 2. P. 267.
43. Новиков Ю.А., Пешехонов С.В., Раков А.В., Симонов А.Н., Стрижков И.Б., Цыбульский В.В. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1993. № 5. С. 49.
44. Novikov Yu.A. // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2022. V. 16. № 5. P. 797. <https://www.doi.org/10.1134/S1027451022050135>
45. Новиков Ю.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 5. С. 78. <https://www.doi.org/10.7868/S0207352815050091>
46. Новиков Ю.А. // Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. № 9. С. 12. <https://www.doi.org/10.7868/S0207352816090110>
47. Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. // Proc. SPIE. 2009. V. 7405. P. 740507. <https://www.doi.org/10.1117/12.826190>
48. Häföler-Grohne W., Bosse H. // Measurement Sci. Technol. 1998. V. 9. P. 1120.
49. Броудай И., Мереж Дж. Физические основы микро-технологии. Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 496 с.
50. Новиков Ю.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 11. С. 77. <https://www.doi.org/10.7868/S0207352817110105>
51. Новиков Ю.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2018. № 12. С. 86. <https://www.doi.org/10.1134/S0207352818120144>
52. Данилова М.А., Митюхляев В.Б., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Раков А.В., Тодуа П.А. // Измерительная техника. 2008. № 8. С. 20.
53. Данилова М.А., Митюхляев В.Б., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Раков А.В., Тодуа П.А. // Измерительная техника. 2008. № 9. С. 49.
54. Gavrilenko V.P., Filippov M.N., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. // Proc. SPIE. 2007. V. 6648. P. 66480T. <https://www.doi.org/10.1117/12.733566>
55. Волк Ч.П., Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. // Измерительная техника. 2008. № 6. С. 18.
56. Novikov Yu.A. // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2017. V. 11. № 4. P. 890. <https://www.doi.org/10.1134/S1027451017040255>
57. Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. // Микроэлектроника. 2008. Т. 37. № 6. С. 448.
58. Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., Раков А.В., Тодуа П.А. // Труды ИОФ АН. 2006. Т. 62. С. 36.
59. Dai G., Pohlenz F., Danzebrink H.-U., Xu M., Hasche K., Wilkening G. // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. № 4. P. 962. <https://www.doi.org/10.1063/1.1651638>
60. Frase C.G., Häföler-Grohne W., Dai G., Bosse H., Novikov Yu.A., Rakov A.V. // Measurement Sci. Technol. 2007. V. 18. P. 439. <https://www.doi.org/10.1088/0957-0233/18/2/S16>
61. Новиков Ю.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2021. № 5. С. 102. <https://www.doi.org/10.31857/S1028096021040117>
62. Новиков Ю.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2021. № 9. С. 100. <https://www.doi.org/10.31857/S1028096021090132>
63. Новиков Ю.А. // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. № 4. С. 306. <https://www.doi.org/10.7868/S0544126915030072>
64. 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. Международные сличения результатов измерений периодических мер в микро- и нанометровом диапазонах на растровых электронных микроскопах // 12 Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии. Черноголовка.

- “Богородский печатник”. 2001. Тезисы докладов. С. 128.
65. Гавриленко В.П., Лесновский Е.Н., Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А., Филиппов М.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 4. С. 454.
 66. Gavrilenko V.P., Filippov M.N., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. // Proc. SPIE. 2009. V. 7378. P. 737812. <https://www.doi.org/10.1117/12.821760>
 67. Larionov Yu.V., Novikov Yu.A. // Proc. SPIE. 2012. V. 7800. P. 7800W. <https://www.doi.org/10.1117/12.2016850>
 68. Новиков Ю.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2019. № 8. С. 64. <https://www.doi.org/10.1134/S0207352819080122>
 69. Новиков Ю.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. № 2. С. 66. <https://www.doi.org/10.7868/S0207352816020086>
 70. Новиков Ю.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 10. С. 59. <https://www.doi.org/10.7868/S0207352815100170>
 71. Новиков Ю.А., Раков А.В., Филиппов М.Н. // Известия РАН. Сер. физ. 1998. Т. 62. № 3. С. 543.
 72. Новиков Ю.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2019. № 10. С. 94. <https://www.doi.org/10.1134/S0207352819090105>
 73. Новиков Ю.А., Раков А.В., Стеколин И.Ю. // Известия РАН. Сер. физ. 1993. Т. 57. № 8. С. 79.
 74. 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.
 75. Новиков Ю.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2020. № 6. С. 68. <https://www.doi.org/10.31857/S1028096020050106>
 76. Novikov Yu.A. // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2020. V. 14. № 5. P. 965. <https://www.doi.org/10.1134/S1027451020050134>
 77. Новиков Ю.А., Раков А.В., Стеколин И.Ю. // Измерительная техника. 1996. № 12. С. 26.
 78. Новиков Ю.А., Стеколин И.Ю. // Труды ИОФ АН. 1995. Т. 49. С. 41.
 79. Novikov Yu.A. // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2020. V. 14. № 6. P. 1387. <https://www.doi.org/10.1134/S1027451020060397>
 80. 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.
 81. Новиков Ю.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013. № 11. С. 70. <https://www.doi.org/10.7868/S0207352813110140>
 82. Новиков Ю.А. // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 4. С. 263. <https://www.doi.org/10.7868/S0544126914040073>
 83. Новиков Ю.А. // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 6. С. 456. <https://www.doi.org/10.7868/S0544126914060076>

Modern Scanning Electron Microscopy. 2. Test objects for Scanning Electron Microscopy

Yu. A. Novikov*

Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow, 119991 Russia

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

The review of the test objects intended for calibration of scanning electron microscopes and researches to secondary electronic emission of a relief surface of a solid state in scanning electron microscope is carried out. The test objects are divided on two parameters – kind of a relief and structure of a relief. By the form of relief the test objects are divided on single, pitch and periodic. On a structure of a relief of the test objects are divided into objects with a rectangular structure and objects with a trapezoid structure with the large and small corners of an inclination of lateral walls. The examples of such the test objects are given. Their characteristics and methods of certification of parameters are described. The advantages and lacks of the test objects are considered. It is shown, that the best characteristics have the tests objects representing pitch structures consisting of trapezoid trenches with the large corners of an inclination of lateral walls. The test objects are created in monosilicon with of a surface orientation by {100} by method liquid anisotropic etching of silicon. These test objects allow defining all characteristics scanning electron microscopes, influencing on measurement of the linear sizes of relief structures used in microelectronics and nanotechnology. With their help it is possible to carry out correlation measurements, which raise accuracy of calibration scanning electron microscopes up to ten times.

Keywords: test object, rectangular structure, trapezoid structure, scanning electron microscopy, shake off effect of electrons.