

ISSN 0368-1025



ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2009

ЯНВАРЬ №1



ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2009

№1 январь

Ежемесячный
научно-технический
журнал
основан в 1939 г.

Издается
с приложением
«Метрология»

УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологии
им. Д.И.Менделеева»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт оптико-физических
измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт физико-технических
и радиотехнических измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической
службы»

ФГУП «Уральский
научно-исследовательский
институт метрологии»

ФГУП «Российский
научно-технический центр
информации по стандартизации,
метрологии и оценке соответствия»

Метрологическая академия

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

- В. В. Денисенко.** Динамическая погрешность многоканальных средств измерений 3
Н. Н. Карабутов. Структурная идентификация статических объектов на основе обработки результатов измерений 6
А. С. Бондаревский, Ф. В. Крекотень. Аналитическое проектирование средств контроля на примере систем функционального контроля интегральных микросхем 12

НАНОМЕТРОЛОГИЯ

- Ч. П. Волк, Ю. А. Новиков, А. В. Раков, П. А. Тодуа.** Измерение линейных размеров рельефных элементов микро- и наноструктур на высоко- и низковольтных растровых электронных микроскопах 15

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Н. Г. Власов.** Оптико-цифровые корреляторы 18
С. Л. Березницкий, Д. Д. Богаченко, И. В. Гайдаенко, О. К. Егоров, В. В. Колесников, В. Ф. Туров. Модернизация микроскопа МАС-1 для использования при измерении спектров электронов внутренней конверсии 22

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

- В. Н. Федотов.** Оценка погрешностей безапробных средств измерений ГЛОНАСС 25
С. Г. Максименко. Аналитическое выражение погрешности линейной оценки расхождения шкал времени 28

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- О. С. Жаркова.** Оценка метрологической корректности стендовых испытаний роликового редуктора 32

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. Г. Иванова, С. Ф. Герасимов.** Зависимость температуры фазовых переходов эвтектического сплава Ga-Zn от его морфологии 34
А. М. Селиванова, С. Г. Бучнев. Распознавание образов и выбор метода контроля теплофизических свойств материалов в интеллектуальных информационно-измерительных системах 37

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. Р. Сергеев.** Проверка генераторных измерительных трансформаторов тока в действующих системах коммерческого учета электрической энергии 40
А. А. Казаков. Ортогональные проекторы и метод симметричных составляющих для многофазных электромагнитных систем 42
В. П. Короткий. Модель магнитомодуляционного преобразователя 47

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Э. Ф. Юрчук, И. Е. Арсаев.** Обеспечение единства измерений в микроволновой радиометрии 51
Н. Н. Грачев, Д. В. Лазарев. Измерение спектрально-энергетических характеристик контактных радиопомех типовых механических соединений и построения их эксплуатационных макромоделей 57

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- М. А. Карабегов.** О некоторых метрологических проблемах аналитических измерений 62
В. А. Бузановский. Структурные схемы измерительных систем физико-химического состава и свойств веществ с «простыми» измерительными каналами 67

П. М. Геруни

71

Главный редактор
В. Н. Крутиков

Редакционная коллегия:

В. С. Александров,
В. И. Белоцерковский,
Ю. А. Богомолов,
Ю. И. Брегадзе,
В. А. Вышлов, О. И. Гудков,
В. С. Иванов, Л. К. Исаев,
Г. И. Кавалеров, А. Д. Козлов,
С. А. Кононогов, А. Ф. Котюк,
А. Ю. Кузин,
В. М. Лахов
(зам. гл. редактора),
В. В. Леонов,
А. И. Механиков,
А. И. Рагулин, Ю. В. Тарбеев,
О. Е. Фомкина
(зам. гл. редактора),
Н. И. Ханов, В. Н. Храменков,
В. Я. Черепанов, И. А. Шайко

Журнал переводится
на английский язык
под названием
«MEASUREMENT TECHNIQUES»
издательством Springer
www.springer.com/11018

Технический редактор *Г. А. Тербинкина*
Корректор *В. Е. Нестерова*

Сдано в набор 03.12.2008. Подписано
в печать 19.01.2009. Формат 60×90^{1/8}. Бумага
офсетная. Печать офсетная. Усл. п. л. 9,0.
Уч.-изд. л. 10,35. Зак. 2714.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-21572
от 15.07.2005
Адрес редакции: 105062 Москва, Лялин пер., 6,
тел. 917-27-76;
Почтовый адрес: 123995 Москва, Гранатный пер., 4
ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»
e-mail: izmt@gostinfo.ru; www.gostinfo.ru

Калужская типография стандартов,
248021 Калуга, ул. Московская, 256

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT

- V. V. Denisenko. Dynamic error of multichannel measuring systems 3
N. N. Karabutov. Structural identification of static objects on the basis of processing of measurement results 6
A. S. Bondarevsky, F. V. Krekoten. Analytic design of inspection devices (by the example of integrated circuits functional testing systems) 12

NANOMETROLOGY

- Ch. P. Volk, Yu. A. Novikov, A. V. Rakov, P. A. Todua. Dimensional measurements of relief areas of micro- and nanostructures using high- and low-voltage scanning electron microscopes 15

OPTICOPHYSICAL MEASUREMENTS

- N. G. Vlasov. Optical-digital correlators 18
S. L. Berezniy, D. D. Bogachenko, I. V. Gaydaenko, O. K. Egorov, V. V. Kolesnikov, V. F. Turov. Modernization of microscope MAS-1 used for internal conversion electron spectra measurements 22

TIME AND FREQUENCY MEASUREMENTS

- V. N. Fedotov. Estimation of errors of GLONASS measuring instruments 25
S. G. Maksimenko. Analytical expression of linear assessment error of time scales differences 28

MECHANICAL MEASUREMENTS

- O. S. Zharkova. Estimation of metrological correctness of bench testing of a roller reducer 32

TERMOPHYSICAL MEASUREMENTS

- A. G. Ivanova, S. F. Gerasimov. Dependence of phase transition temperature of eutectic Ga-Zn alloy on its morphology 34
Z. M. Selivanova, S. G. Buchnev. Recognizing of images and choosing of a control method for thermophysical properties of materials in smart information and measuring systems 37

ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS

- S. R. Sergeev. Verification of measuring current transformers in the existing systems of commercial accounting of electric power 40
O. A. Kazakov. Orthogonal projectors and a method of symmetrical components for multiphase electromagnetic systems 42
V. P. Korotky. The model of a magnetic-modulation converter 47

RADIO MEASUREMENTS

- E. F. Yurchuk, I. E. Arsaev. Ensurance of measurement uniformity of microwave radiometers 51
N. N. Grachev, D. V. Lazarev. Measurement and construction of operational macromodels of spectrum-power characteristics of the contact radio interferences of typical mechanical connections 57

PHYSICOCHEMICAL MEASUREMENTS

- M. A. Karabegov. Analytical measurements and their metrological problems 62
V. A. Buzanovsky. Block diagrams of measuring systems of physical and chemical composition and properties of substances with 'simple' measuring channels 67

P. M. Herouni 71

Измерение линейных размеров рельефных элементов микро- и наноструктур на высоко- и низковольтных растровых электронных микроскопах

Ч. П. ВОЛК*, Ю. А. НОВИКОВ**, А. В. РАКОВ**, П. А. ТОДУА***

* ОАО «НИИМЭ и завод «Микрон», Москва, Россия

** Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия,
e-mail: nya@kapella.gpi.ru

*** Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума,
Москва, Россия, e-mail: fgupnicpv@mail.ru

Проведены измерения ширины линии одного и того же тест-объекта на высоко- и низковольтных растровых электронных микроскопах.

Ключевые слова: растровый электронный микроскоп, тест-объект, ширина линии, линейные размеры рельефных структур.

Linewidth measurements of the same test-object using high- and low-voltage scanning electron microscopes are carried out.

Key words: scanning electron microscopes, test-object, linewidth, linear dimensions of relief structures.

Развитие микроэлектроники и нанотехнологии неразрывно связано с измерением линейных размеров рельефных элементов на поверхности твердого тела [1]. В настоящее время такие измерения выполняют на растровых электронных микроскопах (РЭМ). В мировой практике применения РЭМ для этих целей наметились два подхода: один из них связан с использованием низковольтных (менее 3 кВ) микроскопов [2, 3], другой опирается на применение высоковольтных (более 15 кВ) микроскопов [4, 5]. В [4, 6] были приведены результаты сравнения измерений линейных размеров одних и тех же структур на высоко- и низковольтных РЭМ с помощью известных на то время алгоритмов измерений. Это сравнение показало, что два подхода дают разные результаты. Однако в последующие годы произошли существенные изменения в понимании формирования изображения в РЭМ, возникли новые методы измерения линейных размеров элементов микроструктур. Они прошли широкую проверку на высоковольтных микроскопах и показали хорошие результаты. В связи с этим встала задача повторить сравнение результатов измерения на высоко- и низковольтных РЭМ с учетом этих новых знаний. Настоящая работа посвящена именно такому сравнению.

Методика измерений. Задачу сравнения процедуры измерений на разных типах РЭМ можно разбить на три составляющие. Во-первых, необходимо правильно выбрать объект измерения и исследовать его на обоих типах микроскопов. Во-вторых, надо иметь методы калибровки этих микроскопов (определения основных параметров, таких как увеличение и диаметр зонда). В-третьих, необходимо иметь методы измерения линейных размеров на этих типах РЭМ, которые в принципе могут быть различными.

В качестве объекта измерения лучше всего подходит рельефная структура тест-объекта МШПС-2.0К, подробное описание которого приведено в [7]. Тест-объект представ-

ляет собой набор рельефных шаговых структур, выполненных на поверхности кремния с помощью анизотропного травления. Верхние плоскости выступов и нижние плоскости канавок определяются кристаллографическими плоскостями {100}, а боковые стороны рельефных элементов — плоскостями {111}. Конструкция объекта измерений позволяет не только легко находить любой элемент любой шаговой структуры, но и выделять на выбранном рельефном элементе один и тот же фрагмент, что дает возможность исключить ошибки, связанные с неодинаковостью разных элементов, обусловленные технологией изготовления самого объекта.

На рис. 1 приведены изображения шаговых структур тест-объекта МШПС-2.0К в высоко- (рис. 1, а) и низковольтном (рис. 1, б) РЭМ, а на рис. 2 показаны сигналы, полученные на этих микроскопах при сканировании одного шага (два выступа и канавка между ними) рельефной структуры этого тест-объекта.

Схемы шаговой структуры, имеющей трапециевидный профиль элементов, и сигналов высоко- и низковольтного РЭМ, с помощью которых описываются параметры их ре-

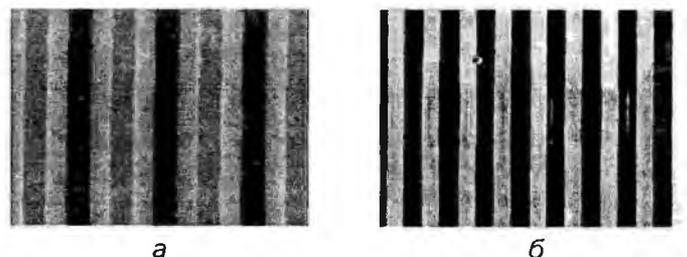


Рис. 1. Изображения шаговой структуры тест-объекта МШПС-2.0К, полученные на растровых электронных микроскопах CamScan S-4 (а) и S-6200Н (б) при энергиях электронов зонда $E = 25$ и $0,85$ кэВ, соответственно

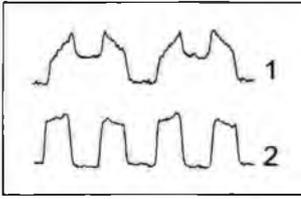


Рис. 2. Видеосигналы изображений, полученных на растровых электронных микроскопах CamScan S-4 (сигнал 1) и S-6200H (сигнал 2) при сканировании шага (два выступа и канавка между ними) измеряемого тест-объекта МШПС-2.0К

альных сигналов, а также определение параметров структуры и сигналов представлены на рис. 3, из которого следует, что форма сигналов обоих микроскопов (см. рис. 2) хорошо совпадает с формой модельных сигналов (см. рис. 3, б и в) для этих микроскопов.

Выбор в качестве объекта измерений шаговой структуры позволяет существенно упростить калибровку обоих типов РЭМ. Измерение увеличения M микроскопа осуществляется в этом случае при помощи

$$M = T/t. \quad (1)$$

аттестованного значения шага структуры t и определенного на изображении значения параметра T , который характеризует шаг на изображении (сигнале):

Такая калибровка увеличения легко осуществляется как на низковольтных, так и на высоковольтных РЭМ. Однако в настоящее время в связи с использованием цифровых изображений параметр увеличения теряет свой физический смысл [7]. Поэтому в качестве параметра РЭМ, характеризующего увеличение, используют

$$m = 1/M = t/T. \quad (2)$$

В [7] было предложено называть его размером пиксела.

Диаметр d электронного зонда РЭМ можно определить из выражения

$$d = mD = Dt/T. \quad (3)$$

Физический смысл и метод определения параметра D , входящего в (3), описан в [7, 8].

Калибровку РЭМ можно осуществить и с использованием проекции боковой наклонной стенки выступов и канавок шаговой структуры МШПС-2.0К:

$$m = s/S; \quad (4)$$

$$d = Ds/S. \quad (5)$$

Такая калибровка в ряде случаев даже более выгодна, чем при помощи выражений (1) и (3), так как в силу особенностей технологии изготовления тест-объекта МШПС-2.0К проекция боковой наклонной стенки имеет меньший разброс значений по всему тест-объекту, чем шаг структуры [7].

Отметим, что методы калибровки обоих типов РЭМ оказались одинаковыми. Это обусловлено выбором в качестве тест-объекта, с помощью которого осуществляется калибровка микроскопов, шаговых структур МШПС-2.0К, уникальные свойства которых подробно описаны в [7].

Методы измерения линейных размеров рельефных элементов полностью определяются физическими механизмами формирования изображений в РЭМ [9] и режимом сбора вторичных электронов [9–11].

Энергия вторичных электронов лежит в диапазоне $0—E$, где E — энергия первичных электронов зонда микроскопа. Для низковольтных РЭМ значение E составляет менее 3 кэВ. Современные детекторы вторичных электронов не позволяют различать электроны по энергиям в такой области. Поэтому низковольтный электронный микроскоп имеет только один режим сбора вторичных электронов.

Диапазон энергий, в котором лежат вторичные электроны высоковольтных РЭМ, составляет от нуля до десятков килоэлектрон-вольт. Современные детекторы вторичных электронов, применяемые в растровых электронных микроскопах, обычно раздельно регистрируют низко- (менее 50 эВ) и высоковольтные (более 2 кэВ) вторичные электроны. Поэтому высоковольтные РЭМ имеют два режима сбора вторичных электронов: сбор вторичных медленных и обратнорассеянных электронов.

Оба эти режима были исследованы для использования в методах измерений линейных размеров рельефных элементов микроструктур [10, 11]. Было установлено, что режим сбора обратнорассеянных электронов является нелинейным, т. е. он вносит нелинейные геометрические искажения в форму изображения рельефных элементов и поэтому не может применяться для измерения линейных размеров.

В силу высказанных соображений для высоковольтных микроскопов был выбран режим сбора вторичных медленных электронов. В этом режиме при условии, что размеры всех элементов шаговой структуры много больше диаметра d электронного зонда РЭМ:

$$s = h \operatorname{tg} \varphi \gg d; \quad u_{p,t} \gg d; \quad b_{p,t} \gg d. \quad (6)$$

формы сигналов высоко- и низковольтного РЭМ будут иметь вид, показанный на рис. 3, б и в, соответственно. Условия (6)

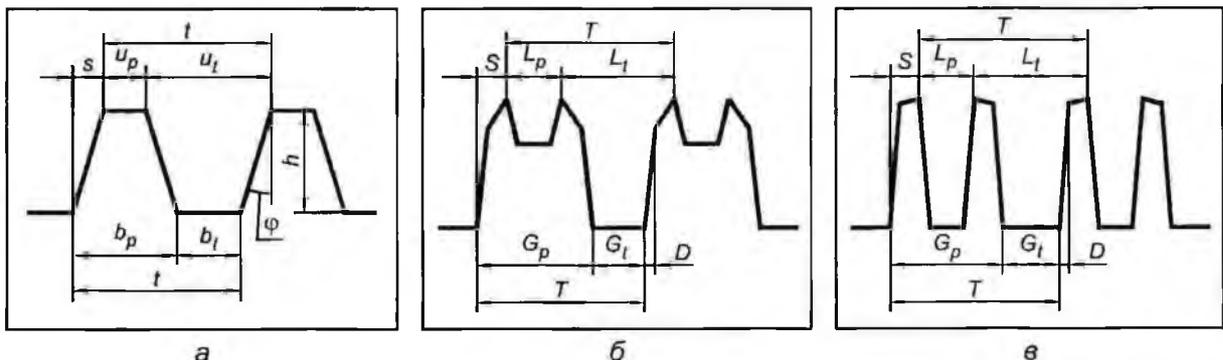


Рис. 3. Схемы шаговой структуры (а) и сигналов, получаемых при ее сканировании с большим наклоном боковых стенок в высоко- (б) и низковольтном (в) РЭМ, и определения их параметров

можно преобразовать в другие, более удобные для работы на РЭМ:

$$S \gg D; L_{p,t} \gg D; G_{p,t} \gg D, \quad (7)$$

которые позволяют анализировать изображения (сигналы) РЭМ даже без предварительной калибровки микроскопа (определения размера пиксела m и диаметра зонда d), так как в (7) входят только измеряемые параметры сигналов (см. рис. 3, б и в).

Знание увеличения микроскопа (размера пиксела) и диаметра зонда, определенных с помощью аттестованного значения шага t (выражения (1)—(3)) или проекции наклонной стенки s (выражения (4) и (5)), позволяет определить все параметры шаговой структуры:

размеры верхнего и нижнего оснований выступов

$$u_p = mL_p - d; \quad (8)$$

$$b_p = mG_p - d; \quad (9)$$

канавок

$$u_t = mL_t + d; \quad (10)$$

$$b_t = mG_t + d; \quad (11)$$

проекции боковой наклонной стенки

$$s = mS. \quad (12)$$

Так как в процессе одного измерения определяются все параметры РЭМ и структуры, то такое измерение не чувствительно к погрешностям фокусировки.

Отметим, что методы измерения линейных размеров рельефных структур (включая ширины линий — размеры верхних и нижних оснований выступов и канавок) на обоих типах РЭМ оказались одинаковыми. Это обусловлено выбором в качестве экспериментального объекта, на котором осуществляются измерения размеров, тест-объекта МШПС-2.0К.

Экспериментальные результаты. Эксперименты выполняли на двух растровых электронных микроскопах: высоковольтном CamScan S-4 при энергии электронов зонда 25 кэВ и низковольтном S-6200H при энергии 0,85 кэВ. В качестве экспериментального образца использовали тест-объект МШПС-2.0К [7] с аттестованным значением шага $t=1997 \pm 1$ нм. Аттестацию шага проводили на установке, описанной в [3].

В процессе экспериментов сканировались 2-й и 3-й выступы 2-й шаговой структуры центрального модуля на уровне направляющих линий тест-объекта МШПС-2.0К [7] (см. рис. 1, 2).

Калибровка обоих РЭМ (определение размера пиксела (1), (2) и диаметра зонда (3)) осуществлялась по получен-

Параметры структуры, измеренные на разных растровых электронных микроскопах

Микроскоп	Параметры структуры, нм						s, нм
	2-й выступ		канавка		3-й выступ		
	u_p	b_p	u_t	b_t	u_p	b_p	
CamScan S-4	521 ± 2	1439 ± 3	1478 ± 3	559 ± 2	523 ± 2	1455 ± 4	462 ± 2
S-6200H	523 ± 6	1436 ± 6	1469 ± 4	562 ± 7	533 ± 4	1443 ± 8	455 ± 3

ным изображениям с применением аттестованного значения шага. Значения этих параметров для используемых в работе микроскопов приведены в табл. 1.

Размеры верхних и нижних оснований трапециевидных выступов и канавок, а также проекции боковой наклонной стенки определены с помощью выражений (8)—(12). Результаты этих измерений приведены в табл. 2, из которой следует, что в пределах одной суммарной погрешности измерений (не превышающей 2 %) соответствующие параметры профиля одинаковы при измерениях на разных типах РЭМ.

Данные результаты противоречат результатам, полученным в [6], однако это можно объяснить тем, что алгоритмы вычисления ширины линии, используемые ранее в [6], не учитывали влияние диаметра электронного зонда микроскопа на формирование его сигнала. Совпадение измеренной ширины линий на высоко- и низковольтных РЭМ указывает на то, что современные алгоритмы измерения учитывают влияние параметров микроскопов на формирование их сигналов.

Таким образом, современные модели формирования сигналов растровых электронных микроскопов правильно учитывают влияние параметров РЭМ на форму сигналов во вторичных медленных электронах, а методы измерения линейных размеров (ширины линий) пригодны для проведения таких измерений на высоко- и низковольтных РЭМ.

Литература

1. International Technology Roadmap for Semiconductors. Metrology Roadmap 2007 / public.itrs.net.
2. Postek M. T. // Scanning Microscopy. — 1989. — V. 3. — № 4. — P. 1087.
3. Haessler-Grohne W., Bosse H. // Measurement Science and Technology. — 1998. — V. 9. — P. 1120.
4. Новиков Ю. А., Раков А. В., Филиппов М. Н. // Изв. РАН, сер. физ. — 1998. — Т. 62. — № 3. — С. 543.
5. Новиков Ю. А., Раков А. В. // Микроэлектроника. — 1996. — Т. 25. — № 6. — С. 426.
6. Postek M. T., Keery W. J., Larrabee R. D. // Scanning Microscopy. — 1988. — V. 10. — № 1. — P. 10.
7. Волк Ч. П. и др. // Микроэлектроника. — 2002. — Т. 31. — № 4. — С. 243.
8. Волк Ч. П. и др. // Тр. ИОФАН. — 2006. — Т. 62. — С. 77.
9. Новиков Ю. А., Раков А. В. // Тр. ИОФАН. — 1998. — Т. 55. — С. 3.
10. Новиков Ю. А., Раков А. В., Филиппов М. Н. // Изв. высш. учеб. заведений. Электроника. — 1998. — № 1. — С. 91.
11. Новиков Ю. А., Раков А. В., Филиппов М. Н. // Тр. ИОФАН. — 1998. — Т. 55. — С. 100.

Дата принятия 28.08.2008 г.

Таблица 1

Параметры растровых электронных микроскопов, использованных в эксперименте

Микроскоп	E, кэВ	m, нм/пиксел	d, нм
CamScan S-4	25	9,66 ± 0,01	83 ± 2
S-6200H	0,85	9,26 ± 0,01	55 ± 3