

СТАБИЛЬНОСТЬ КАЛИБРОВКИ РАСТРОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ МИКРОСКОПОВ

А. В. ЗАБЛОЦКИЙ*, В. В. АЛЬЗОБА, С. А. МОРОЗОВ*, П. А. ТОДУА****

**Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия,
e-mail: zalex@gmail.com*

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

С использованием меры МШПС-2.0К установлены среднесрочные стабильности хранения и воспроизводимости определяемого при калибровке масштабного коэффициента растровых электронных микроскопов. Сделаны выводы, что зависимость масштабного коэффициента от рабочего расстояния может приводить к разбросу результатов измерений, и для повышения точности измерений требуется прямое сравнение размеров измеряемого и эталонного объектов, полученных при одних и тех же параметрах микроскопа.

Ключевые слова: *растровый электронный микроскоп, калибровка.*

The medium-term scanning electron microscopes scale factor stability was ascertained with use of the measure MShPS-2.0K during 5 days. It was also ascertained that the scale factor depends on working distance between the sample and objective lens. Thereby to provide more accurate measurements the direct comparison between the sample parameters and reference material parameters with the same scanning electron microscope settings is necessary.

Key words: *scanning electron microscope, calibration*

При применении растровых электронных микроскопов (РЭМ) как средств измерений линейных размеров для контроля параметров продукции наноиндустрии в субмикро- и нанометровом диапазонах преимущественно рассматривается проблема влияния конечного размера эффективного электронного зонда (области рассеяния электронного пучка в образце и выхода вторичных электронов), приводящая к размытию границ исследуемого объекта [1] (см. также работы по

использованию метода дефокусировки электронного зонда [2], моделированию РЭМ для измерений ключевых размеров [3, 4] и т. д.). Вопрос определения истинного масштабного коэффициента полученного изображения, как правило, полагают решенным в ходе калибровки прибора [5 – 7], а полученные параметры микроскопа неявно считают абсолютно стабильными в течение межкалибровочного интервала. При этом, если для РЭМ, применяемых в полупроводниковой индустрии, межкалибровочный интервал составляет 1 месяц [7] и менее, то для РЭМ в научно-исследовательских организациях зачастую установлен межкалибровочный интервал 1 г. Закономерно возникает вопрос об адекватности такого подхода к периодичности калибровки. Кроме того, предельное разрешение РЭМ и глубина фокуса на регистрируемом изображении обусловлены рабочим расстоянием микроскопа от объектной линзы до предметного столика. При малых рабочих расстояниях предельное разрешение увеличивается, а глубина фокуса уменьшается; при больших рабочих расстояниях, наоборот [8]. Этот эффект зачастую приводит к попыткам оператора РЭМ оптимизировать получаемое изображение при помощи изменения рабочего расстояния. Влияние подобных изменений конфигурации РЭМ на количественные результаты измерений, как правило, не учитывается.

Таким образом, данная работа посвящена исследованию среднесрочной (5 дней) стабильности калибровки (стабильности хранения и воспроизводимости масштабного коэффициента изображения – параметра, непосредственно влияющего на получаемый количественный результат) для некоторых типов РЭМ. Параллельно изучены вопросы воспроизводимости масштабного коэффициента и его зависимости от рабочего расстояния, так как этому параметру зачастую не уделяется должного внимания при разработке методик измерений с использованием РЭМ.

Описание эксперимента. Исследовали стабильность хранения и воспроизводимости масштабного коэффициента различных РЭМ: Hitachi S-4800 (холодный автоэмиссионный катод), Jeol JSM-7001F (термоавтоэмиссионный катод, катод Шотки), FEI Quanta 200 (термоэмиссионный катод) в режиме работы с высоким ускоряющим напряжением 25 кВ. Использовали достаточно высокое номинальное увеличение $40\ 000\times$ для РЭМ фирм Hitachi, Jeol и $60\ 000\times$ для FEI, позволяющее получить кадр шириной порядка 3 мкм, как характерное для измерений объектов нанотехнологий и современной микро-

электроники. В качестве исследуемых объектов применяли кремниевые рельефные структуры – меры МШПС-2.0К [9, 10]. Чтобы избежать влияния контаминации [11], предпринимали следующие действия.

1. Получали изображения всех шаговых структур в зоне I – I (рис. 1) за один сеанс измерений при одинаковых условиях для сравнения их размеров между собой.

2. Выбирали исходный выступ шаговой структуры в зоне I – I. Смещали область сканирования выше (ниже) относительно горизонтальной направляющей структуры меры примерно на размер кадра.

3. Получали три изображения выбранного участка при наименьшем рабочем расстоянии $x_{\min} = 5$ мм при медленной развертке, позволяющей получить изображения наивысшего качества.

4. Перемещали область в выбранном ранее направлении еще раз на размер кадра, изменяли рабочее расстояние и вновь получали три изображения выступа шаговой структуры при тех же условиях, что и в п. 3.

5. Повторяли п. 3, 4 для выбранных рабочих расстояний $x = 5; 7,5; 10; 12,5; 15$ мм.

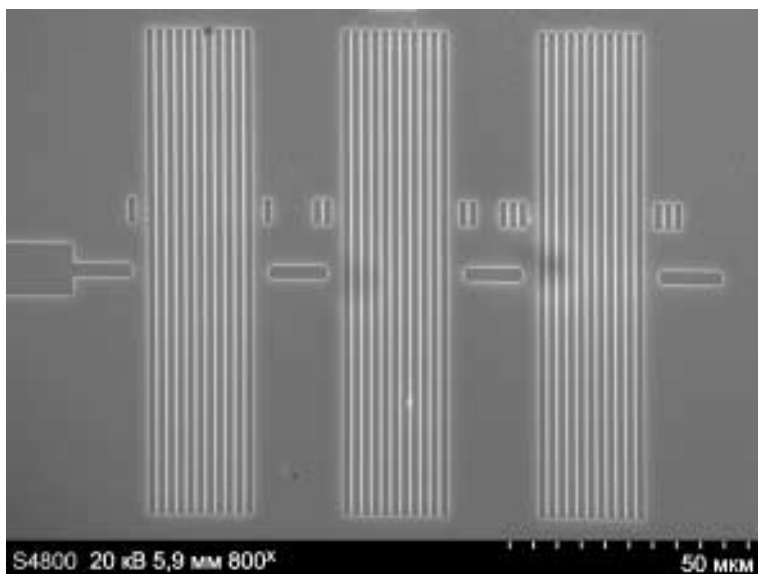


Рис. 1. Используемая мера МШПС-2.0К

Измерения повторяли утром (10:00 – 11:00) и вечером (17:00 – 18:00) в течение рабочей недели (5 дней). После трех сеансов измерений меняли выступ шаговой структуры во избежание влияния контаминации. Результаты измерений корректировали путем сравнения ширины проекции боковой стенки для уже использованного и нового выступов. Для этого применяли полученные ранее изображения в районе горизонтальной направляющей структуры (см. п.1).

Полученные результаты. Масштабный коэффициент в нанометрах, деленных на пиксел, вычисляли согласно [5]:

$$m = 2a / (A_L + A_R), \quad (1)$$

где a – значение проекции боковой стенки выступа (данный параметр аттестован для одного из выступов, размер остальных выступов сравнивали с аттестованным, см. п.1 описания эксперимента; A_L, A_R – разности значений абсцисс соответственно второй и первой, четвертой и третьей контрольных точек профиля видеоизображения в пикселах.

Погрешность аттестации параметра a для используемых экземпляров меры МШПС-2.0К составляла 0,2 %. Погрешность проводимых измерений масштабного коэффициента по единичному изображению, определяемая пикселной точностью изображений и точностью локализации характерных точек видеопрофиля, не превышала 0,6 %. Краткосрочный разброс результатов измерений масштабного коэффициента, найденный по трем изображениям, сделанным подряд при фиксированном рабочем расстоянии, не превышал 0,2 %.

Итоговые зависимости масштабного коэффициента при ширине кадра 3 мкм от рабочего расстояния и времени проведения эксперимента приведены на рис. 2 для РЭМ Hitachi S-4800, Jeol JSM-7001F и FEI Quanta 200. Характерные значения разброса масштабного коэффициента для этих РЭМ даны в таблице. Также были выполнены аналогичные измерения при ширине кадра 6 мкм (номинальное увеличение $20\ 000\times$ для РЭМ Hitachi и Jeol, $30\ 000\times$ для РЭМ FEI) и получены сходные результаты.

Следует обратить особое внимание на резкое изменение масштабного коэффициента на $(8,0 \pm 0,6)$ % для Jeol JSM-7001F при переходе значения рабочего расстояния от 10 к 12,5 мм (наиболее часто используемый диапазон), при том что разброс значений масштабного коэффициента этого РЭМ для среднесрочного периода (5 дней) не превышает $(2,0 \pm 0,6)$ %.

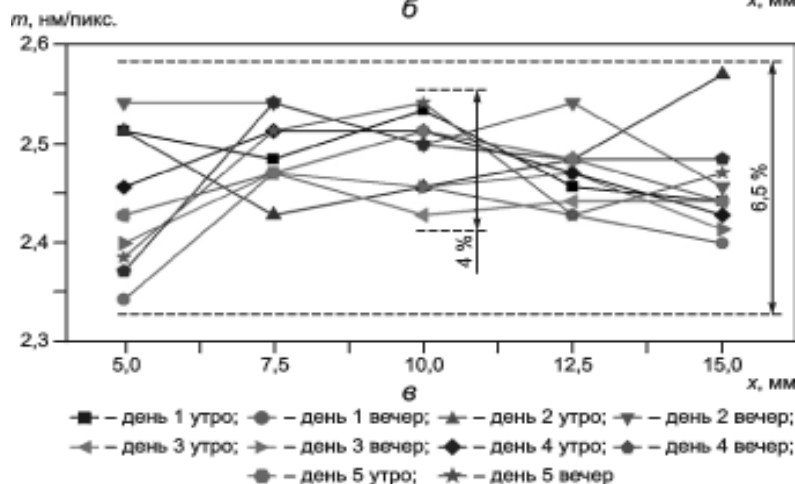
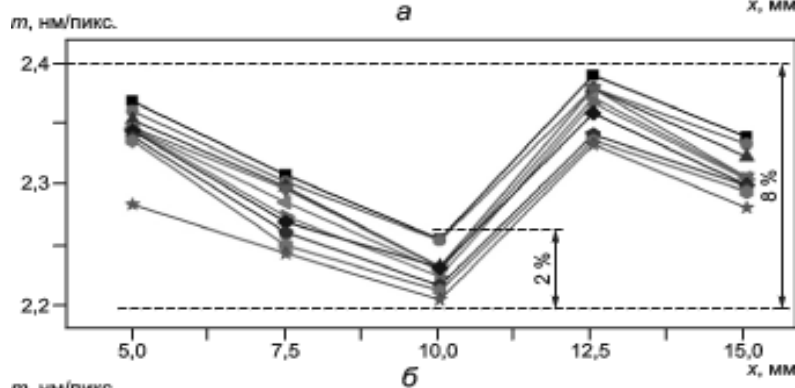
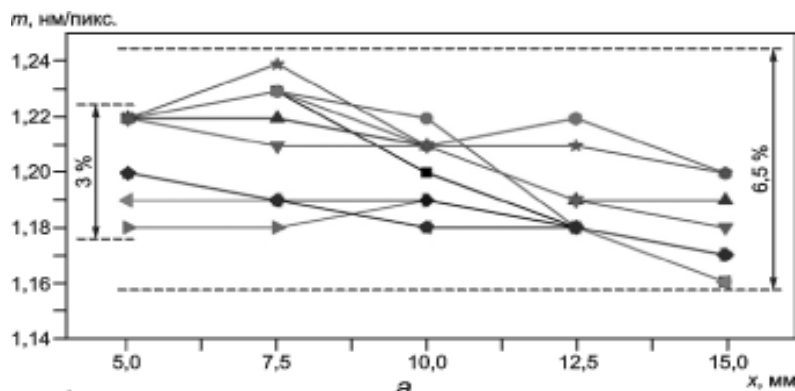


Рис. 2. Стабильности хранения масштабного коэффициента различных РЭМ:

a – Hitachi S-4800; *б* – Jeol JSM-7001F; *в* – FEI Quanta 200

Характерные значения разброса масштабного коэффициента

Параметры эксперимента	Характерный разброс масштабного коэффициента, %		
	Hitachi S-4800	Jeol JSM-7001F	FEI Quanta 200
Среднесрочные временные отклонения (5 дней)	$3,0 \pm 0,6$	$2,0 \pm 0,6$	$5,0 \pm 0,6$
Изменение рабочего расстояния	$6,5 \pm 0,6$	$8,0 \pm 0,6$	$6,5 \pm 0,6$

Выводы. Установлено, что нестабильность хранения масштабного коэффициента исследованных РЭМ в течение среднесрочного временного интервала может приводить к разбросу результатов измерений 1,4 – 5,6 %. Зависимость масштабного коэффициента от используемого рабочего расстояния может приводить к разбросу результатов измерений в диапазоне 5,9 – 8,6 % (при этом зависимость может иметь большой градиент). Следовательно, для этих РЭМ повышение точности измерений требует осуществления прямого сравнения размеров измеряемого и эталонного объектов при одних и тех же параметрах микроскопа в ходе единого эксперимента. Полученные данные в целом соответствуют результатам проведенных ранее исследований по определению долговременной стабильности метрологических характеристик Hitachi CD-SEM S-8820 для измерения ключевых размеров [11].

Таким образом, обеспечение высокой точности результатов измерений произвольно выбранного РЭМ требует исследований по установлению стабильности его метрологических характеристик и их зависимости от рабочего расстояния при измерениях. Однако характеристика разных типов микроскопов (Hitachi S-4800, Jeol JSM-7001F, FEI Quanta 200) позволяет предположить, что полученная граница стабильности хранения и воспроизводимости масштабного коэффициента 1,4 – 8,6 % при различных рабочих конфигурациях является достаточно общей для коммерчески доступных приборов данного класса.

Работа выполнена с применением устройств Центра коллективного пользования уникальным научным оборудованием в области нанотехнологий МФТИ при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 16.552.11.7070).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Postek M.T., Vldar A.E.** Critical dimension metrology and the scanning electron microscope // Handbook of Silicon Semiconductor Metrology / Ed. A.C.Diebold. N. Y. – Basel: Marcel Dekker, Inc., 2001. P. 295–333.
2. **Валиев К.А. и др.** Измерение линейных размеров кремниевых элементов нанорельефа с профилем, близким к прямоугольному, методом дефокусировки электронного зонда РЭМ // Микроэлектроника. 2010. Т. 39. № 6. С. 420–425.
3. **Babin S. e.a.** Calibration of CD-SEM: moving from relative to absolute measurements // Proc. SPIE. 2008. V. 6922. P. 69222 M.
4. **Li Y.G., Zhang P., Ding Z. J.** Monte Carlo Simulation of CD-SEM images for linewidth and critical dimension metrology //Scanning. 2013. V. 35. P. 127–139
5. **ГОСТ Р 8.636–2007.** ГСИ. Микроскопы электронные растровые. Методика калибровки.
6. **Marchman H.** Scanning electron microscope matching and calibration for critical dimensional metrology // J. Vacuum Sci. Technol. B: Microelectronics and Nanometer Structures. 1997. V. 15. N 6. P. 2155–2161.
7. **Gavrilenko V.P. e.a.** Calibration of a scanning electron microscope in the wide range of magnifications for the microscope operation in the integrated circuit production line // Proc. SPIE. 2009. V. 7272. P. 72720Z.
8. **Scanning** Microscopy for Nanotechnology Techniques and Applications / Ed. W. Zhou, Z.L. Wang. N.Y.: Springer Science+Business Media LLC, 2006. P. 1–40.
9. **Новиков Ю.А. и др.** Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазонов для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии // Труды ИОФАН. 2006. Т. 62. С. 36 – 76.
10. **ГОСТ 8.592–2009.** ГСИ. Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния. Требования к геометрическим формам, линейным размерам и выбору материала для изготовления.
11. **Гавриленко В.П. и др.** Влияние контаминации в РЭМ на профиль рельефных элементов нанометрового дипазона // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 2. С. 2–6.

12. **Mizuno F. e. a.** Evaluation of the long-term stability of critical-dimension measurement scanning electron microscopes using a calibration standard // Vacuum Sci. Technol. B: Microelectronics and Nanometer Structures. 1997. V. 15. Is. 6. P. 2155 – 2161.

Дата принятия 19.11.2012 г.

