



УДК 537.533

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ КАЛИБРОВКИ РАСТРОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ МИКРОСКОПОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕСТ-ОБЪЕКТА МШПС-2.0

К.П. Неежмаков, аспирант Харьковского национального университета радиоэлектроники



Приведены результаты исследования процедуры калибровки растровых электронных микроскопов на примере тест-объекта МШПС-2.0. Рассмотрены возможности и преимущества данной меры нанометрового диапазона.

There were presented the results of the calibration procedure of electron microscopes by means of test object MShPS-2.0 as an example. There were considered possibilities and advantages of this measure of nanometer range.

Введение

Для определения значения критических размеров в субмикронном диапазоне (от десятков до сотен нанометров) применяются различные виды высокоразрешающей микроскопии, такие, как просвечивающая электронная микроскопия, растровая электронная микроскопия, микроскопия на основе фокусированных ионных пучков и т.д. Однако для решения задач, требующих оперативного контроля, наиболее всего подходит только растровая электронная микроскопия. При этом, несмотря на то что диаметр электронного зонда современных растровых электронных микроскопов (РЭМ) может достигать единиц нанометров, размер области сбора вторичных электронов, формирующих информативный сигнал РЭМ, за счет процессов рассеяния, может достигать значений нескольких десятков нанометров. Это приводит к расхождению между “кажущимся” размером элемента, определённым по профилю видеосигнала РЭМ, и его реальным размером. Поэтому процедуре калибровки микроскопа уделяют немало внимания.

Для калибровки РЭМ применяются тест-объекты – меры малой длины, в качестве которых используются периодические, шаговые и одиночные рельефные структуры на поверхности твердого тела. Наилучшими свойствами обладают шаговые структуры трапециевидного профиля с большими углами наклона боковых стенок [1].

В качестве средств линейных измерений в нанометровом диапазоне могут использоваться любые современные РЭМ, работающие в режиме сбора вторичных медленных электронов.

Связь между установкой высшей точности, эталоном сравнения и средствами измерений осуществляется с использованием методов прямых измерений [1–3], которые позволяют калибровать микроскопы для измерения линейных размеров L рельефных структур в диапазоне 10 нм...100 мкм с неопределенностью ΔL в диапазоне 1...100 нм.

Описание используемого тест-объекта МШПС-2.0

Тест-объект состоит из нанорельефных шаговых структур, сформированных на поверхности кремния, и предназначен для калибровки (поверки) средств измерений линейных размеров – растровых электронных микроскопов, применяемых в микро-, наноэлектронике и нанотехнологиях.

Тест-объект позволяет определять все параметры микроскопов, является единой мерой для растровых электронных и атомно-силовых микроскопов с идеальной формой рельефа. Это – единственная в мире мера ширины линии в нанодиапазоне (от 5 до 700 нм).

Тест-объект МШПС-2.0К позволяет проводить полную калибровку РЭМ (включая измерения размера зонда микроскопа) для измерения на них линейных размеров элементов рельефа, лежащих в широком диапазоне 5 нм...100 мкм, включая ширину линии вплоть до 20 нм.

В настоящее время отсутствуют другие тест-объекты, с помощью которых можно измерять ширину линии менее 100 нм. Тест-объект МШПС-2.0К позволяет осуществлять калибровку растровых электронных микроскопов (так называемых CD SEM), работающих в линии производства микросхем с критическими размерами вплоть до 5 нм. Отметим, что данный тест-объект прошёл международные сличения.

Тест-объекты выполнены из монокремния и представляют собой шаговые рельефные структуры – выступы и канавки с трапециевидным профилем. Аттестованными (эталонными) параметрами тест-объектов являются шаг, размеры верхних и

нижних оснований выступов и канавок, высота (глубина) рельефа и проекции боковых наклонных стенок на плоскости основания структуры [4].

Описание процедуры калибровки РЭМ

Процедуру калибровки РЭМ проводят следующим образом [5].

Выбирают необходимую для калибровки РЭМ рельефную меру, сечение выступа которой приведено на рис. 1а.

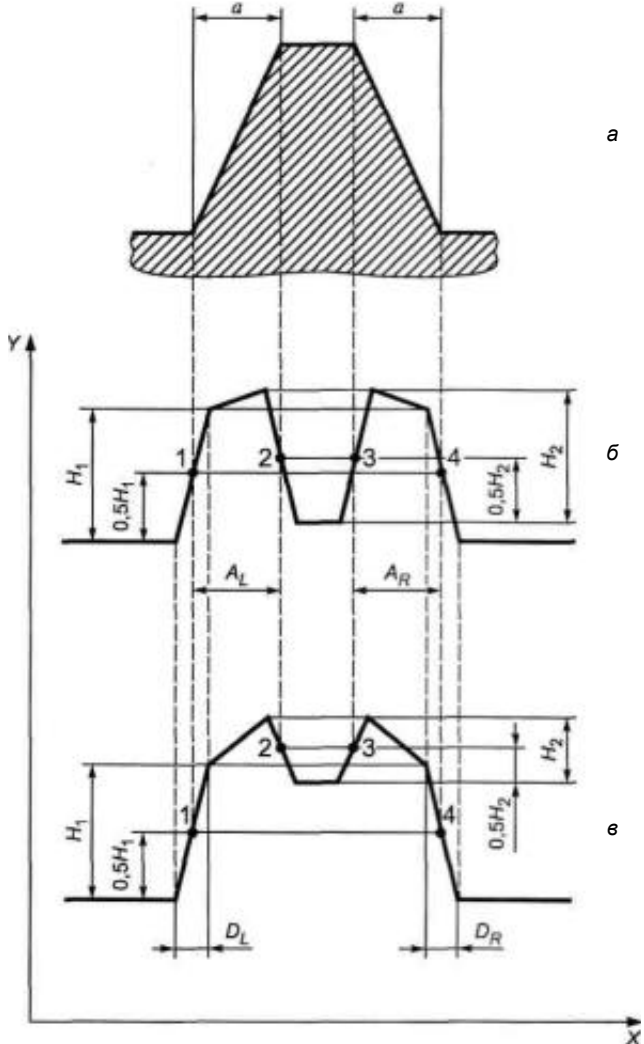


Рис. 1. Сечение выступа рельефной меры и его видеопрофили, полученные с помощью РЭМ различных типов: а – сечение выступа рельефной сферы по ГОСТ Р 8.629; б – видеопрофиль выступа рельефной меры в низковольтном РЭМ; в – видеопрофиль выступа рельефной меры в высоковольтном РЭМ; X – ось значений координаты электронного зонда в направлении сканирования в пикселях; Y – ось значений информативного сигнала в пикселях

В зависимости от ожидаемого значения эффективного диаметра электронного зонда РЭМ *d* используют рельефную меру, для которой

$$\frac{a}{d} \geq 1,5.$$

Постепенно повышают электронно-оптическое увеличение РЭМ и при этом на каждом этапе проводят фокусировку электронного зонда в соответствии с инструкцией по эксплуатации РЭМ. Повышение электронно-оптического увеличения РЭМ прекращают при появлении на экране монитора микроскопа видеоизображения выступа, который указан в паспорте рельефной меры в качестве исследуемого элемента для калибровки РЭМ. Схематическое изображение наблюдаемого в режиме регистрации вторичных электронов видеопрофиля для выступа с трапециевидным профилем, сечение которого изображено на рис. 1а, приведено на рис. 1б – для низковольтного РЭМ и на рис. 1в – для высоковольтного РЭМ. На рис. 1 также приведены обозначения параметров, характеризующих геометрическую форму, и размеры выступа.

Значение электронно-оптического увеличения РЭМ должно обеспечивать получение изображений, которые позволяют определить значения параметров, приведенных на рис. 1б и в.

Настраивают видеоконтрольное устройство РЭМ таким образом, чтобы число пикселей в направлении сканирования было достаточным для того, чтобы можно было пренебречь значением неопределенности, обусловленным квантованием видеосигнала. Это достигается выбором соответствующих размеров изображения в пикселях и электронно-оптического увеличения микроскопа. Выбор увеличения осуществляют таким образом, чтобы видеопрофиль элемента, изображенного на рис. 1а, имел вид, приведенный на рис. 1б или в. При этом значения проекций наклонных стенок выступа *A_L*, *A_R*, измеренных по видеопрофилю, должны быть не менее 200 пикселей.

В соответствии с инструкцией по эксплуатации РЭМ, выполняют сканирование исследуемого элемента рельефной меры. Видеопрофиль выступа рельефной меры представлен на рисунке 1б и в.

Для калибровки РЭМ используют расстояние в направлении сканирования в пикселях между контрольными точками, которое не зависит от эффективного диаметра электронного зонда.

Расположение контрольных точек 1–4 на видеопрофиле информативного сигнала приведено на рис. 1б и в.

Ординату контрольной точки 1 вычисляют как полусумму ординат точек первого и второго изломов в направлении сканирования $0,5H_1$, ординату контрольной точки 2 – как полусумму ординат точек третьего и четвертого изломов в направлении сканирования $0,5H_2$, ординату контрольной точки 3 – как полусумму ординат точек пятого и шестого изломов в направлении сканирования $0,5H_2$, ординату контрольной точки 4 – как полусумму ординат точек седьмого и восьмого изломов в направлении сканирования $0,5H_1$ (все ординаты вычисляют в пикселях).

По вычисленным значениям ординат определяют соответствующие им значения абсцисс контрольных точек 1–4.

Значения вспомогательных отрезков для низковольтных или высоковольтных РЭМ определяют по значениям абсцисс контрольных точек:

A_L, A_R – разность значений абсцисс второй и первой контрольных точек и четвертой и третьей контрольных точек соответственно в пикселях;

D_L, D_R – разность значений абсцисс второго и первого изломов и восьмого и седьмого изломов на видеопрофиле соответственно в пикселях.

Масштабный коэффициент видеоизображения m , нм/пиксель, вычисляют по формуле

$$m = \frac{2a}{A_L + A_R},$$

где a – значение проекции наклонной стенки выступа, приведенное в паспорте на рельефную меру, нм; A_L, A_R – расстояния между контрольными точками в пикселях.

Исследование процедуры калибровки РЭМ

За основу исследования была взята процедура калибровки РЭМ. В ходе исследования были проведены измерения периода меры при различных напряжениях на катоде, а также при различных расстояниях от электронной пушки до исследуемой меры. Значения напряжения на катоде были 10 и 20 кВ, расстояния до меры – 7, 10, 15 и 20 мм. Каждое измерение было проведено по 2 раза с промежутком в 1 день.

Сканирующий электронный микроскоп FEI Quanta 200, который использовался для проведения исследования, имеет все возможности, необходимые для быстрого неразрушающего просмотра поверхности больших образцов, и позволяет работать с разнообразными типами образцов. Реальное разрешение составляет 10 нм.

Последовательность измерений на нем следующая. Сначала делались снимки одного и того же участка меры при одинаковом увеличении (рис. 2). Затем по полученным снимкам строился видеопрофиль изображения и по нему вычислялась длина всех периодов, видимых на изображении. Потом вычислялось среднее значение для одного периода. Исходя из данного разрешения изображения, а также аттестованного значения одного периода, вычислялось значение одного пикселя в нанометрах. Затем полученное значение сравнивалось со значением, выдаваемым микроскопом. Полученные результаты описанных выше измерений и вычислений приведены в таблице, где WD – расстояние от электронной пушки до меры; $L_{\text{общ}}$ – общая длина периодов на снимке; $L_{\text{пер}}$ – средняя длина одного периода; m – значение длины меры, полученное с РЭМ; m^* – значение длины меры, полученное расчетным путем.

Для сравнения полученных значений был построен график, приведенный на рисунке 3.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что значение длины меры, выдаваемое на данном РЭМ, отличается от реаль-

Значения длин участков меры, полученные при измерениях и вычислениях

WD , мм	$L_{\text{общ}}$, пиксели	$L_{\text{пер}}$, пиксели	m^* , нм	m , нм	m/m^*
10 кВ, 1-е измерение					
7	1661,147	415,286	4,815947	4,85677	1,008476
10	1642,393	410,598	4,870939	4,85677	0,997090
15	1649,305	412,326	4,850525	4,85677	1,001287
20	1651,036	412,759	4,845439	4,85677	1,002338
10 кВ, 2-е измерение					
7	1550,618	387,654	5,159231	5,20368	1,008615
10	1542,755	385,688	5,185529	5,20368	1,003500
15	1539,185	384,796	5,197557	5,20368	1,001177
20	1545,912	386,478	5,174937	5,20368	1,005554
20 кВ, 1-е измерение					
7	1632,666	408,166	4,899962	4,85677	0,991185
10	1631,264	407,816	4,904171	4,85677	0,990334
15	1631,906	407,976	4,902241	4,85677	0,990724
20	1629,31	407,327	4,910054	4,85677	0,989147
20 кВ, 2-е измерение					
7	1529,472	382,368	5,230563	5,20368	0,994860
10	1639,097	409,774	4,880735	4,85677	0,995089
15	1630,887	407,721	4,905305	4,85677	0,990105
20	1639,884	409,970	4,878394	4,85677	0,995567

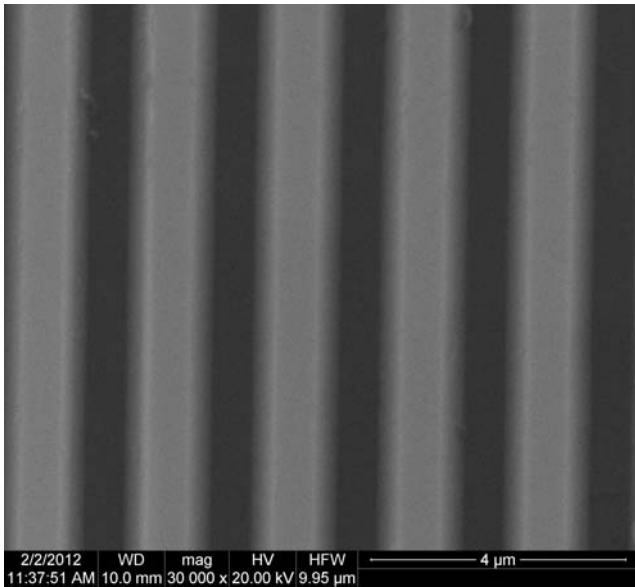


Рис. 2. Снимок меры МШПС-2.0, полученный на РЭМ Quanta 200

ного значения длины меры, полученного с помощью вычислений, менее, чем на 1 %. Расхождение при повторных измерениях также лежит в пределах 1 %, что, в свою очередь, является хорошим показателем для данного РЭМ. Соответственно, значения, получаемые с помощью этого микроскопа, близки к реальным, что даёт возможность использовать его в качестве средства измерения.

Список литературы

1. Линейная мера микронного, субмикронного и нанометрового диапазонов для измерений размеров элементов СБИС на растровых электронных и атомно-силовых микроскопах / Ч.П. Волк, Е.С. Горнев, Ю.А. Новиков [и др.] // Микроэлектроника. – 2002. – Т. 31, № 4. – С. 243–262.

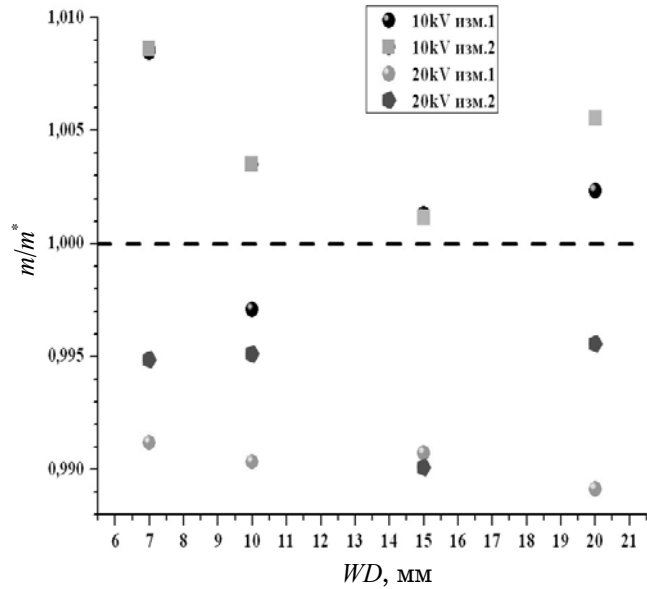


Рис. 3. Зависимость соотношения m/m^* от расстояния до меры

2. Novikov Yu.A. Linear Sizes Measurements of Relief Elements with the Width Less Than 100 nm on a SEM / Yu.A. Novikov, A.V. Rakov, P.A. Todua // Proc. of SPIE. – 2006. – Vol. 6260. – P. 626015-1–626015-6.
3. Novikov Yu.A. Direct measurement of the line-width of relief element on AFM in nanometer range / Yu.A. Novikov, M.N. Filippov, I.D. Lysov [et al.] // Proc. of SPIE, 2008. – Vol. 7025. – P. 702510-1–702510-10.
4. <http://pt21.ru/content/view/35/38/> (Тест-объект – мера специальная МШПС-2.0К).
5. Микроскопы электронные растровые. Методика калибровки: ГОСТ Р 8.636-2007. – [Дата введения 2008-08-01]. – М.: Стандартинформ, 2008. – 20 с. – (Национальный стандарт Российской Федерации).