

РОССИЙСКИЙ ПРОТОТИП МЕЖДУНАРОДНОГО ТЕСТ-ОБЪЕКТА НАНОРЕЛЬЕФА ДЛЯ РЭМ И АСМ

Ярким представителем nanoиндустрии является современная микроэлектроника [1,2], перешедшая к производству микросхем с минимальными размерами 45 нм. Для обеспечения технологии производства таких микросхем необходимы методы измерения линейных размеров в нанодиапазоне (1–1000 нм). Измерения проводятся на растровых электронных (РЭМ) и атомно-силовых (АСМ) микроскопах, калибровка которых осуществляется с помощью специальных эталонов сравнения – тест-объектов – рельефных мер нанометрового диапазона [3].

Сравнение характеристик тест-объектов, используемых в разных странах, приведено в работе [3]. Наилучшими свойствами обладают тест-объекты, имеющие трапециевидный профиль рельефа с большими углами наклона боковых стенок. В качестве таких мер используются тест-объекты МШПС-2.0К [3,4], удовлетворяющие ГОСТ [5] и прошедшие многолетние исследования и испытания. Они могут быть сделаны с шириной выступов (размерами верхних оснований), лежащей в диапазоне 5–500 нм [6,7], однако в каждом тест-объекте присутствуют элементы (выступы) только с одним размером и расположенные в одном направлении.

Консультации с иностранными специалистами и международными организациями привели к созданию тест-объекта, обладающего всеми свойствами тест-объекта МШПС-2.0К, но с тремя аттестуемыми размерами ширины линии в каждом

тест-объекте и элементами рельефа, расположенными в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Этот тест-объект был представлен на двух международных конференциях:

- International Conference "Instrumentation, Metrology, and Standards for Nanomanufacturing" (USA, 2008);
- NanoScale 2008. 8th Seminar on Quantitative Microscopy and 4th Seminar on Nanoscale Calibration Standards and Methods Italy (2008).

Он вызвал оживленную дискуссию по поводу его применения в качестве прототипа международного тест-объекта для калибровки растровых электронных и атомно-силовых микроскопов. В дискуссии приняли участие представители Национального института стандартов и технологий США (National Institute of Standards and Technology – NIST), Физико-технического института Германии (Physikalisch-Technische Bundesanstalt – PTB), Национального научного центра "Институт метрологии" (ИМ). С российской стороны в ней участвовали сотрудники Научно-исследовательского центра по изучению свойств поверхности и вакуума (НИЦПВ) Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии и Института общей физики (ИОФ) им. А.М.Прохорова РАН.



Рис. 1 Основные участники дискуссии около российского стенда на конференции NanoScale 2008: Ю.А.Новиков (ИОФ РАН, РФ), Т.Dziomba (PTB, Германия), G.Orji (NIST, США), H.Bosse (PTB, Германия), П.А.Тодуа (НИЦПВ, РФ), В.С.Купко (ИМ, Украина), В.П.Гавриленко (НИЦПВ, РФ)

ПРОТОТИП МЕЖДУНАРОДНОГО ТЕСТ-ОБЪЕКТА

Тест-объект представляет собой рельефную структуру, сформированную на поверхности кремниевой пластины, плоскость

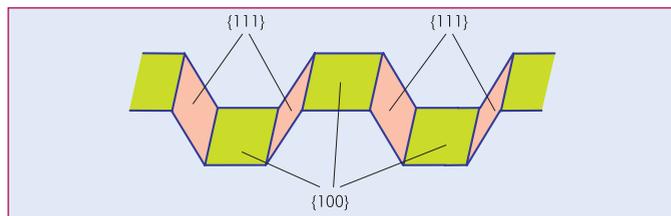


Рис.2 Расположение кристаллографических плоскостей кремния в структуре, полученной анизотропным травлением пластины с ориентацией поверхности {100} сквозь окна в маске

которой совпадает с кристаллографической плоскостью кремния {100}. Рельеф структуры сформирован путем анизотропного травления пластины кремния. Профиль каждого элемента рельефа имеет форму трапеции. Боковые стенки элементов параллельны кристаллографическим плоскостям {111} (рис.2).

Глубина рельефа определяется временем травления и может быть задана в диапазоне 50–1500 нм.

В центре тест-объекта на площади $0,5 \times 0,5 \text{ мм}^2$ расположены три модуля – L1, L2, L3, (рис.3а). Каждый модуль (рис.3б) состоит из единичных (рис.4а) и групповых (рис.4б) элементов (выступов), причем групповые элементы из семи выступов образуют шаговую структуру с номинальным значением шага 2 мкм. Как групповые, так и единичные элементы расположены в двух взаимно-перпендикулярных направлениях (см.

Таблица 1. Результаты калибровки РЭМ S-4800 FE

Размер пикселя, нм/рпх		Диаметр зонда, нм
Номинальный	Калибровка	
2,83	$2,82 \pm 0,01$	17 ± 1
1,417	$1,37 \pm 0,01$	14 ± 1
0,551	$0,53 \pm 0,01$	13 ± 1
0,331	$0,318 \pm 0,002$	12 ± 1

рис.3б). Модули отличаются друг от друга только номинальными значениями ширины выступа, верхнее основание c_p которого может лежать в диапазоне 10–500 нм.

Фрагмент изображения центра тест-объекта представлен на рис.3а. Групповые элементы (см. рис.4б) сосредоточены в первом и третьем рядах, а единичные (см. рис.4а) – во втором и четвертом рядах каждого модуля (см. рис.3б). Первые два ряда содержат элементы с вертикальной ориентацией. Третий и четвертый ряды имеют горизонтальное расположение элементов. В каждом ряду находятся 12 одинаковых одиночных или шаговых структур, номера которых указаны над первым рядом каждого модуля.

В рельефном элементе LX-Y-Z X обозначает номер модуля, Y – ряд в модуле, а Z – номер столбца. Например, структура L1-2-4 соответствует рельефному элементу в модуле L1, находящемуся во 2-м ряду и 4-м столбце. Фрагменты единичного

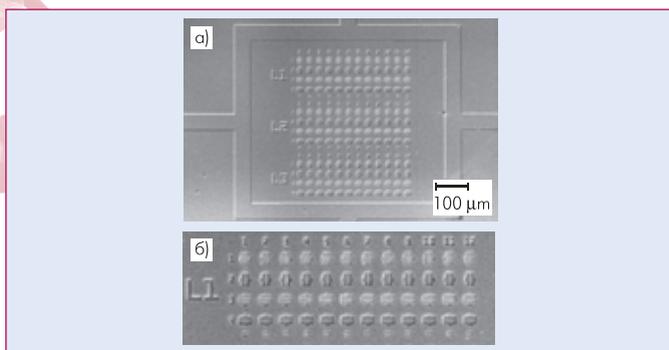


Рис.3 Изображения в РЭМ фрагментов тестовой структуры: а) общий вид, б) один из модулей

(L1-1-3) и группового (L1-2-5) элементов приведены на рис.4а и 4б соответственно.

Примеры изображений отдельных выступов из разных модулей приведены на рис.5, на рис.6 – соответствующие им сигналы. Формы сигналов полностью соответствуют модели на рис.7, на котором приведена связь формы трапецевидного выступа с большими углами наклона боковых стенок с формой сигнала высоковольтного РЭМ, работающего в режиме сбора вторичных медленных электронов. Размеры приведены в табл.1.

Исследования элементов тест-объекта проводились на РЭМ S-4800 FE. Калибровка микроскопа (определение размера пикселя m и эффективного диаметра электронного зонда) при энергии электронов зонда $E = 20$ кэВ осуществлялась с использованием тест-объекта МШПС-2.0К, имеющего аттестованное на электронно-оптической метрологической системе (EOMS, Германия) [8] значение шага 1997 ± 1 нм. Результаты калибровки РЭМ S-4800 FE и номинальные значения размера пикселя, указываемые фирмой-изготовителем РЭМ, представлены в табл. 1. (Фирма не дает значения величин неопределенности измерения номинального размера пикселя и не приводит размеры диаметров электронного зонда РЭМ).

Полученные размеры эффективного диаметра электронного зонда РЭМ S-4800 FE (см. табл. 1) указывают на высокое качество данного РЭМ. При этом необходимо отметить, что действующий размер электронного зонда определяется фокусировкой микроскопа, поэтому на разных изображениях он может быть разным. Это подтверждается данными табл. 1.

Наличие в тест-объекте элементов рельефа с вертикальным и горизонтальным расположениями позволило сравнить

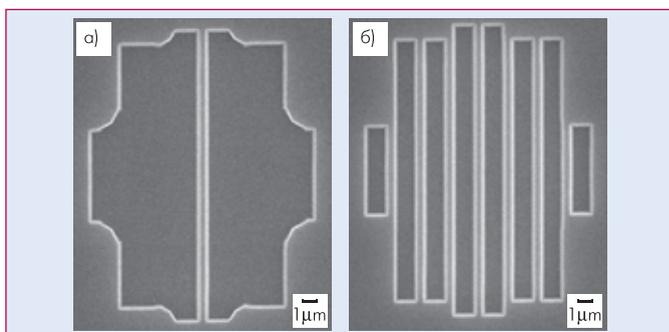


Рис.4 Изображения в РЭМ фрагментов тестовой структуры одиночного (а) и группового (б) элементов

Таблица 2. Величины S_L+S_R сигналов для разных элементов тестовой структуры

Блок	№ элемента	(S_L+S_R) , pix
	1	$114,6 \pm 0,4$
L1-2	5	$114,8 \pm 0,4$
	11	$114,9 \pm 0,4$
L2-2	1	$114,5 \pm 0,7$
	5	$114,4 \pm 0,7$
	11	$114,1 \pm 0,7$
L3-2	1	$115,1 \pm 0,5$
	5	$114,8 \pm 0,5$
	11	$114,1 \pm 0,5$

размеры пикселя по X- и Y-осям. Для РЭМ S-4800 FE отношение размеров пикселей по разным направлениям оказалось равным $m_y/m_x = 1,039 \pm 0,001$.

АТТЕСТАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕСТ-ОБЪЕКТА

В работе [3] отмечалось, что для калибровки измерительных РЭМ удобно использовать аттестованное значение проекции боковой наклонной стенки выступа меры МШПС-2.0К, которое зависит только от глубины травления рельефа и для всей площади меры является постоянной величиной. Для исследуемого тест-объекта были измерены величины S_L+S_R , которые характеризуют сумму проекций боковых стенок левой и правой ступенек и пропорциональны глубине рельефа в различных участках модулей L1, L2, L3 исследуемого тест-объекта (табл. 2).

Видно, что величина S_L+S_R исследуемого образца тест-объекта на всей его площади является постоянной, и ее среднее значение равно $114,6 \pm 0,2$ pix. Таким образом, величина проекции наклонной стенки постоянна для всех областей тест-объекта и (с учетом данных калибровки размера пикселя) ее среднее значение равно $s = (s_L + s_R)/2 = 161,6 \pm 0,3$ нм.

Измерение размеров выступов во всех модулях осуществлялось прямым измерением расстояний U_p , V_p , S_L и S_R между контрольными точками, расположенными на сигналах РЭМ, соответствующих контрольным точкам на модельном сигнале (см. рис.7). Используя формулы: $b_p = mV_p$, $u_p = mU_p$, $s_L = mS_L$, $s_R = mS_R$, связывающие параметры выступа и сигнала и параметры калибровки РЭМ (см. табл. 1), опреде-

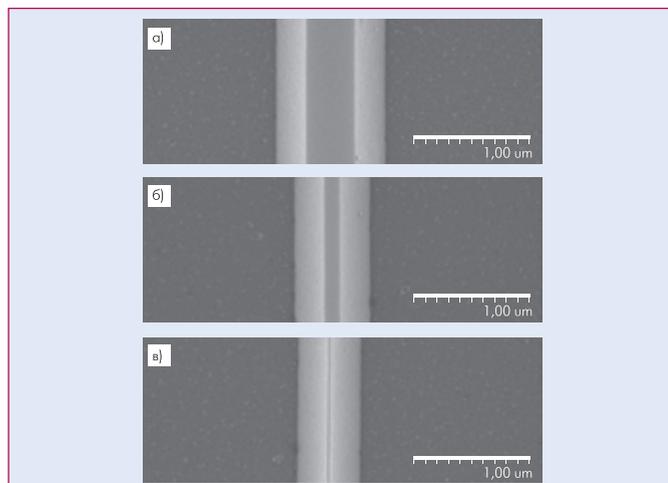


Рис.5 Изображения в РЭМ одиночных выступов с разными размерами верхних оснований (размеры приведены в табл. 1)

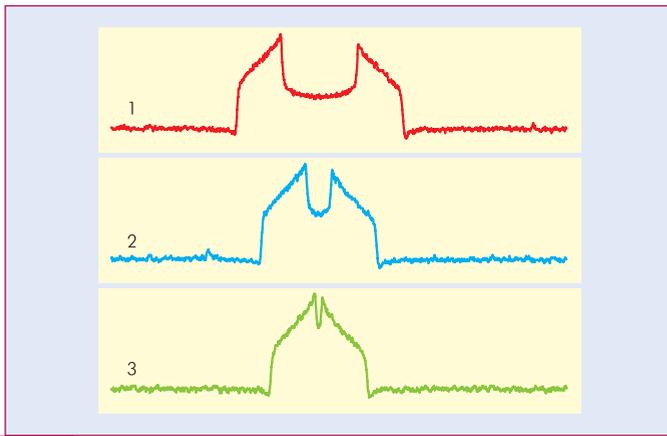


Рис.6 Сигналы РЭМ изображений одиночных выступов с разными размерами верхних оснований (размеры приведены в табл.1)

лены параметры выступов (размеры верхних u_p и нижних b_p оснований выступов), которые представлены в табл. 3. Там же приведены средний размер s проекции наклонной стенки выступа и высота рельефа $h = s\sqrt{2}$.

Видно, что точность измерений s и h очень высока (неопределенность измерений меньше расстояния между атомами в монокристалле кремния). Это определяется большим объемом статистики, так как проекции наклонных стенок измерялись на всех выступах. Размеры верхних и нижних оснований выступов измерялись на каждом выступе отдельно, поэтому неопределенности их измерений больше (см. табл. 3). Однако, даже этой большой неопределенности достаточно для использования тест-объекта в микроэлектронике для калибровки РЭМ. Большую точность можно получить, проводя аттестацию тест-объекта на электронно-оптических метрологических системах, аналогичных EOMS [8].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕСТ-ОБЪЕКТА

Структуры тест-объекта выполнены по технологии анизотропного травления, поэтому их боковые стороны и основания

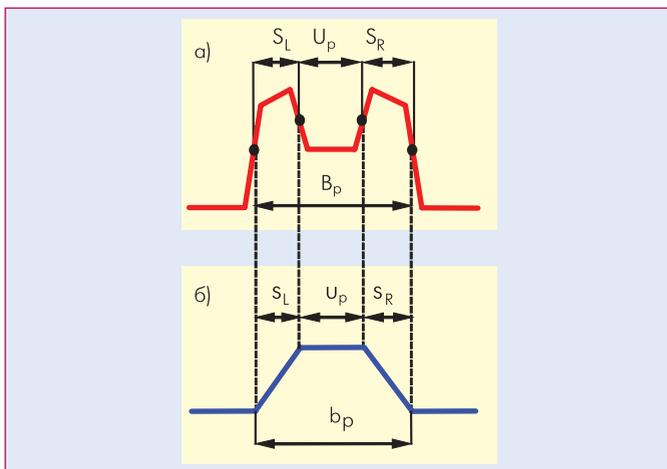


Рис.7 Схемы сигнала высоковольтного РЭМ (а), получаемого при сканировании выступа (б) с трапециевидным профилем и большим наклоном боковых стенок, и обозначения параметров элементов выступа и сигнала

Таблица 3. Размеры выступов тест-объекта, представленных на рис.5

Модуль	u_p , нм	b_p , нм	s , нм	h , нм
L1	395 ± 3	718 ± 4		
L2	120 ± 3	443 ± 4	$161,6 \pm 0,3$	$228,5 \pm 0,4$
L3	14 ± 1	337 ± 2		

(верхнее и нижнее) выступов и канавок должны совпадать с кристаллографическими плоскостями {111} и {100}, соответственно (см. рис.2). Если это так, то должна наблюдаться корреляция между координатами некоторых точек на структуре, поясняемая с помощью рис.8, на котором сплошной линией изображен профиль трапецевидной структуры.

При изменении ширины маски, с помощью которой получена данная структура, новый профиль изображен штриховой линией. Линии 3-4 и 3'-4' характеризуются кристаллографическими плоскостями {111}, расстояния 3-3' и 4-4' равны. Это означает, что координаты точек 3 и 4 коррелируют друг с другом. Ана-

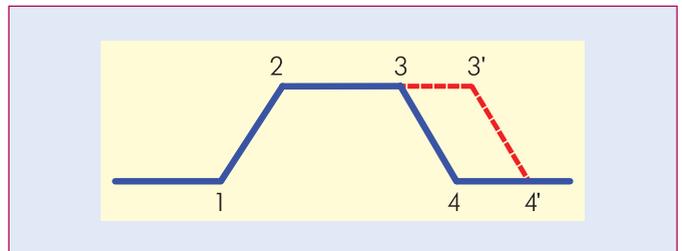


Рис.8 Схема трапецевидной структуры и ее изменение, поясняющее корреляцию контрольных точек на структуре

логичная корреляция существует для координат точек 1 и 2.

Точки границ боковых стенок 1-2 и 3-4 (см. рис.8) соответствуют точкам 2-5 и 8-11 сигнала РЭМ (рис.9). Однако на сигналах РЭМ более удобно определять координаты точек изломов (1, 4, 9 и 12), которые сдвинуты относительно точек 2, 5, 8 и 11 на половину диаметра, поэтому для них тоже должна существовать корреляция.

С целью определения качества технологии изготовления элементов рельефа тест-объекта были определены коэффициенты корреляции пар контрольных точек 1-4 и 9-12 на сигналах РЭМ:

$$K = \frac{(\bar{x}_1 \bar{x}_2) - \bar{x}_1 \bar{x}_2}{\sigma_1 \sigma_2},$$

где x_1 – координата контрольной точки 1 для левой стороны сигнала и точки 9 для правой стороны, x_2 – координата контрольной точки 4 для левой стороны сигнала и точки 12 для правой стороны (см. рис.9), величины σ_1 и σ_2 – стандартные неопределенности средних значений координат указанных точек. В случае высокого качества структур величина коэффициента корреляции должна быть близка к единице.

Коэффициенты корреляции K координат указанных контрольных точек имеют значения больше 0,8 практически для всех элементов. С уменьшением шумов изображения увеличивается коэффициент корреляции до 0,9 и более. Все это говорит о высоком качестве технологии изготовления тест-объекта.

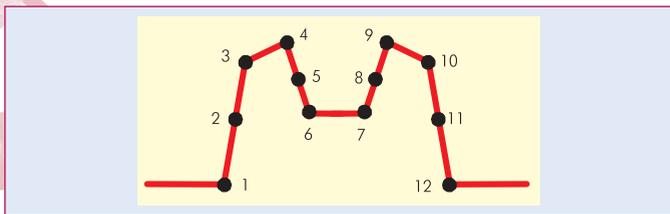


Рис.9 Схема сигнала и положения контрольных точек на сигнале, поясняющие корреляцию между контрольными точками сигнала

Представленный тест-объект обладает высоким качеством изготовления и удовлетворяет требованиям, накладываемым стандартом [5]. Он соответствует стандартам [9,10], используемым при поверке и калибровке РЭМ, и предложен в качестве прототипа международного тест-объекта нанорельефа и линейных размеров (включая ширину линии), лежащих в нанодиапазоне, для применения в микроэлектронике и нанотехнологиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. International Technology Roadmap for Semiconductors. Metrology Roadmap. 2007 / public.itrs.net.
2. **Postek M.T.** Nanometer-scale Metrology. – Proc. of SPIE. 2002, v. 4608, p. 84–96. (Русский перевод: Постек М). Метрология в нанометровом диапазоне. – Вестник технического регулирования, 2007, № 7, с. 8–17.
3. **Волк Ч.П., Горнев Е.С., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., Прохоров А.М., Раков А.В.** Линейная мера мик-

ронного, субмикронного и нанометрового диапазонов для измерений размеров элементов СБИС на растровых электронных и атомно-силовых микроскопах. – Микроэлектроника, 2002, т. 31, № 4, с. 243–262.

4. **Гавриленко В.П., Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А.** Тест-объекты с прямоугольным и трапециевидным профилями рельефа для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии. – Наноиндустрия, 2008, № 4, с. 24–30.
5. Меры рельефные нанометрового диапазона. Требования к геометрическим формам, линейным размерам и выбору материала для изготовления / ГОСТ Р 8.628-2007. – М.: Стандартинформ, 2007. – 12 с.
6. **Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A.** Linear sizes measurements of relief elements with the width less than 100 nm on a SEM. – Proc. of SPIE., 2006, v. 6260, p. 626015-1 – 626015-6.
7. **Данилова М.А., Митюхляев В.Б., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Раков А.В., Тодуа П.А.** Тест-объект с шириной линии менее 10 нм для растровой электронной микроскопии. – Измерительная техника, 2008, № 8, с. 20–23.
8. **Haessler-Grohne W., Bosse H.** An electron optical metrology system for pattern placement measurements. – Meas. Sci. Technol., 1998, v. 9, p. 1120–1128.
9. Микроскопы электронные растровые измерительные. Методика поверки / ГОСТ Р 8.631–2007. – М.: Стандартинформ, 2007. – 12 с.
10. Микроскопы электронные растровые. Методика калибровки / ГОСТ Р 8.636–2007. – М.: Стандартинформ, 2008. – 12 с.