

РОССИЙСКИЕ СТАНДАРТЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ

Метрология – не только наука о методах и средствах измерений, но и обеспечение единства измерений, включающее стандартизацию единиц физических величин, их воспроизведение с наивысшей точностью с помощью Первичных эталонов, а также передача размеров таких единиц иерархическим образом всем средствам измерений. В обеспечение единства линейных измерений в нанометровом диапазоне в России разработаны и введены в действие в 2008 г. семь национальных стандартов: три – регламентируют процедуры изготовления и аттестации линейных мер с шириной линии в нанометровом диапазоне; четыре – процедуры поверки и калибровки атомно-силовых (АСМ) и растровых электронных (РЭМ) микроскопов, предназначенных для измерений линейных размеров рельефных наноструктур.

Переход к нанотехнологии привел к появлению и развитию нового направления – нанометрологии, с которым связаны теоретические и практические аспекты обеспечения единства измерений в наномасштабе.

В первую очередь – это эталоны физических величин и эталонные установки, стандартные образцы состава, структуры и свойств для обеспечения передачи размера в нанодиапазон.

Во-вторых – аттестованные или стандартизованные методы измерений физико-химических параметров и свойств объектов нанотехнологии, методы калибровки (поверки) применяемых средств измерений.

В-третьих – метрологическое сопровождение процессов производства продукции нанотехнологии.

НАНОМЕТРОЛОГИЯ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Из определения нанотехнологии [1] следует первоочередная задача измерений геометрических параметров объекта, что обуславливает необходимость обеспечения единства линейных измерений в диапазоне 1÷1000 нм.

Линейные измерения в этой области производятся с помощью зондовых микроскопов (оптических ближнего поля, растровых электронных, сканирующих туннельных и атомно-силовых). Чтобы превратить такие находящиеся у потребителя приборы из наблюдательных в средства измерений, необходима их калибровка с абсолютной привязкой к Первичному эталону единицы длины – метру.

Переход к измерениям длин в нанометровом диапазоне потребовал кардинального пересмотра традиционных подходов – исследованы механизмы формирования изображения объекта на рабочем средстве измерений; разработаны новые алгоритмы измерений и соответствующее программное обеспечение (ПО), позволившее учитывать влияние взаимодействия зонда с измеряемым объектом; создана новая мера малой длины в виде рельефной шаговой структуры с заданной формой профиля элемента со свойствами, аналогичными свойствам вторичного эталона длины и измеряемого объекта.

В результате создана схема передачи размера единицы длины в нанодиапазон (рис.1).

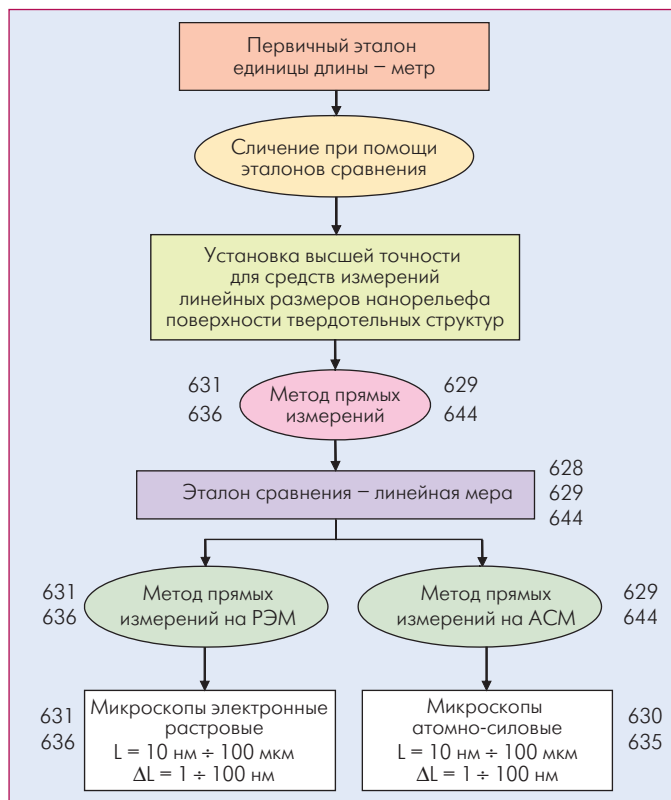


Рис. 1 Схема передачи размера единицы длины в нанодиапазон и номера стандартов, регламентирующих работу соответствующих объектов

В ее основе – Первичный эталон единицы длины – метр, материальный носитель которого – длина волны излучения He-Ne/I₂ лазера, стабилизированного по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде с параметрами излучения $\nu = 473612214705$ кГц, $\lambda = 632,99139822$ нм.

Этот Первичный эталон обеспечивает воспроизведение единицы длины – метра с относительным среднеквадратичным отклонением $2 \cdot 10^{-11}$.

Передача размера единицы длины от эталона в нанометровый диапазон осуществляется установкой высшей точности для средств измерений линейных размеров нанорельефа поверхности твердотельных структур. Эталонная установка предназначена для измерения линейных перемещений по

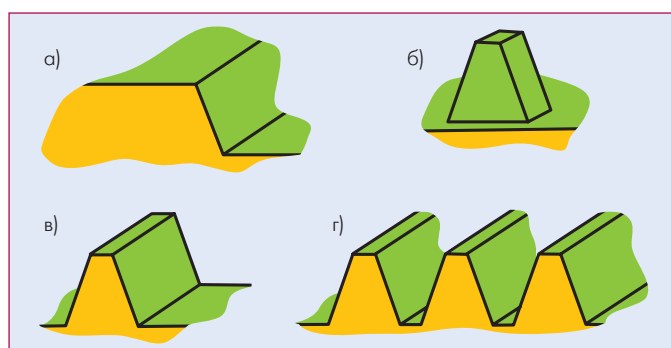


Рис. 2 Типовые элементы рельефа линейной меры. (а) – ступенька, (б) – одиночный выступ, (в) – выступ трапециевидальной формы, (г) – шаговая структура (фрагмент)

одной, двум и трем координатам и аттестации мер и стандартных образцов, используемых для калибровки измерительных систем потребителей.

Для этих целей могут быть использованы установки на базе РЭМ и АСМ, перемещения по X, Y и Z координатам которых контролируются лазерными интерферометрами. (В России в качестве эталонной применяется трехмерная лазерная интерферометрическая система измерений наноперемещений [2] на основе АСМ).

Для калибровки РЭМ и АСМ 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 [3].

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

Связь между установкой высшей точности, эталоном сравнения и средствами измерений, осуществляется с использованием методов прямых измерений [3–5], 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.

РОССИЙСКИЕ НАЦИОНАЛЬНЫЕ СТАНДАРТЫ В НАНОТЕХНОЛОГИИ

Российские национальные стандарты [6–12] для нормативного обеспечения передачи размера единицы длины в нанодиапазон регламентируют создание и применение эталонов сравнения – линейных мер – для калибровки РЭМ и АСМ. На рис.1 приведены номера стандартов, регламентирующих работу соответствующих материальных объектов и методы измерений.

Стандарт [6] устанавливает требования к характеристикам рельефной структуры линейной меры, которая должна использоваться для калибровки РЭМ и АСМ при измерении размеров в диапазоне 1 нм÷1 мкм. Рельеф поверхности линейной меры представляет собой совокупность одиночных элементов (рис.2). Структуру изготавливают из монокристаллического кремния методом анизотропного травления (рис.3).

На рис.4 приведена схема профиля выступа рельефной меры, с помощью которой должны осуществляться поверки и калибровки [8–11]. Линейные размеры элементов рельефной структуры согласно [6] должны быть следующие:

- ширина линии (верхнего основания выступов) – $30 \div 500$ нм;

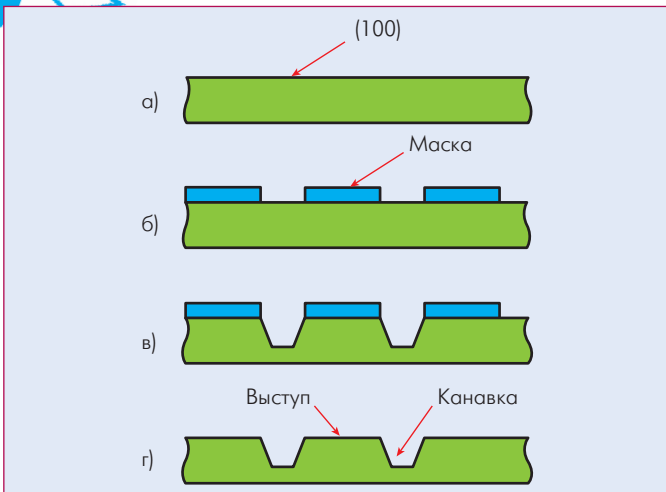


Рис.3 Схема процесса изготовления линейной (рельефной) меры. (а) – исходная пластина монокристаллического кремния с ориентацией поверхности (100); (б) – пластина с нанесенным технологическим слоем (маской); (в) – пластина после анизотропного травления; (г) – пластина с элементами рельефа после удаления технологического слоя

- высота элементов рельефа – 100÷800 нм;
- размер шага периодически повторяющихся структур – 1÷3 мкм.

Стандарт [7] устанавливает методику поверки, а [12] методику калибровки структур с трапециевидальным профилем элементов – рельефных мер нанометрового диапазона. Для определения метрологических характеристик этих мер используются АСМ и два лазерных двулучевых интерферометра, источник излучения которых – гелий-неоновые лазеры. На АСМ проводится сканирование выступа рельефной меры (рис.4) и получается видеоизображение (рис.5). (Интерферометры измеряют перемещения зонда в горизонтальном и вертикальном направлениях).

Основные метрологические характеристики трапециевидальных элементов рельефа меры – высота выступа, ширины верхнего и нижнего основания выступа, проекции боковой наклонной стенки на плоскость нижнего основания выступа. При этом ширина верхнего основания измеряется прямым методом с использованием первой производной сигнала АСМ (параметр B_p на рис.6).

Стандарты [8, 9] устанавливают методики поверки АСМ и

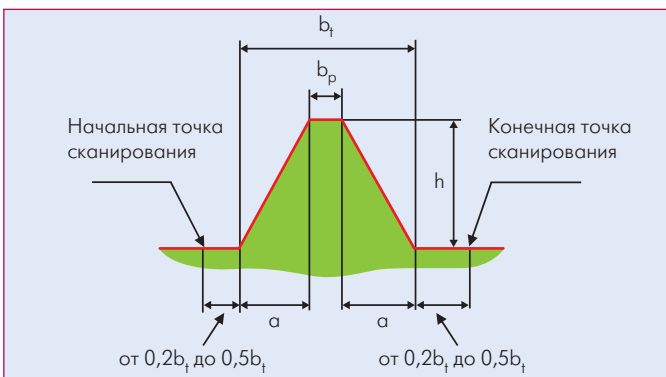


Рис.4 Профиль выступа рельефной меры и определяемые параметры меры

РЭМ, применяемых для измерений в диапазоне от 1 нм до 1 мкм, а [10, 11] – методики калибровки для АСМ и РЭМ. В качестве средства калибровки АСМ и РЭМ используется рельефная мера, изготовленная согласно [6], поверенная по [7] и откалиброванная по [12]. Для калибровки (АСМ или РЭМ) выполняется сканирование исследуемого элемента рельефной меры и записывается видеоизображение. Используя геометрические характеристики выступа рельефной меры (рис.4), а также геометрические параметры сигналов АСМ (рис.5, 6) и РЭМ (рис.7) при сканировании выступа, определяются основные характеристики микроскопов. При этом для поверки и калибровки используются методы прямого измерения параметров элементов рельефной меры.

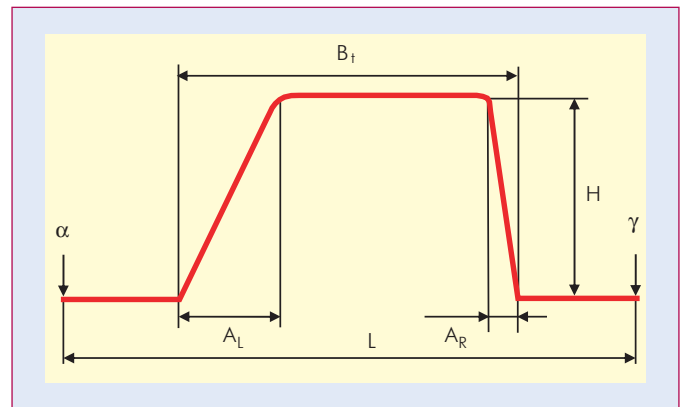


Рис.5 АСМ сигнал выступа рельефной меры и параметры сигнала при сканировании выступа. α и γ – начальная и конечная точки положения зонда при сканировании поверяемого (калибруемого) выступа

Для АСМ [8, 10] определяются: масштабный коэффициент видеоизображения

$$m_x = a/A_R,$$

при $A_L = A_R$, эффективный радиус острия кантилевера,

$$r = 0,966(m_x B_t - b_t),$$

цена деления вертикальной шкалы микроскопа

$$m_z = h/H,$$

относительное отклонение Z-сканера микроскопа от ортогональности,

$$Z_x = \frac{m_x (A_L - A_R)}{2Hm_z}$$

при $A_L \neq A_R$, где параметры выступа показаны на рис.4, а сигнала АСМ на рис.5.

Для РЭМ согласно [10, 12] определяются: масштабный коэффициент видеоизображения

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

эффективный диаметр электронного пучка

$$d = \frac{m(D_L + D_R)}{2}$$

где параметры выступа и сигналов низковольтного и высоковольтного РЭМ показаны на рис.7.

Таким образом, созданные стандарты нормативно бес-

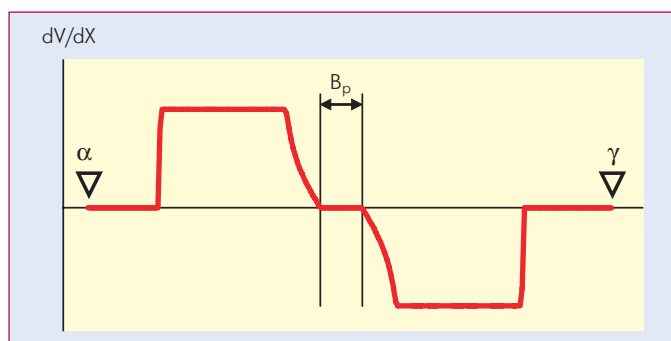


Рис.6 Форма первой производной сигнала (dV/dX) по координате сканирования. α и γ – начальная и конечная точки положения зонда при сканировании поверяемого (калибруемого) выступа

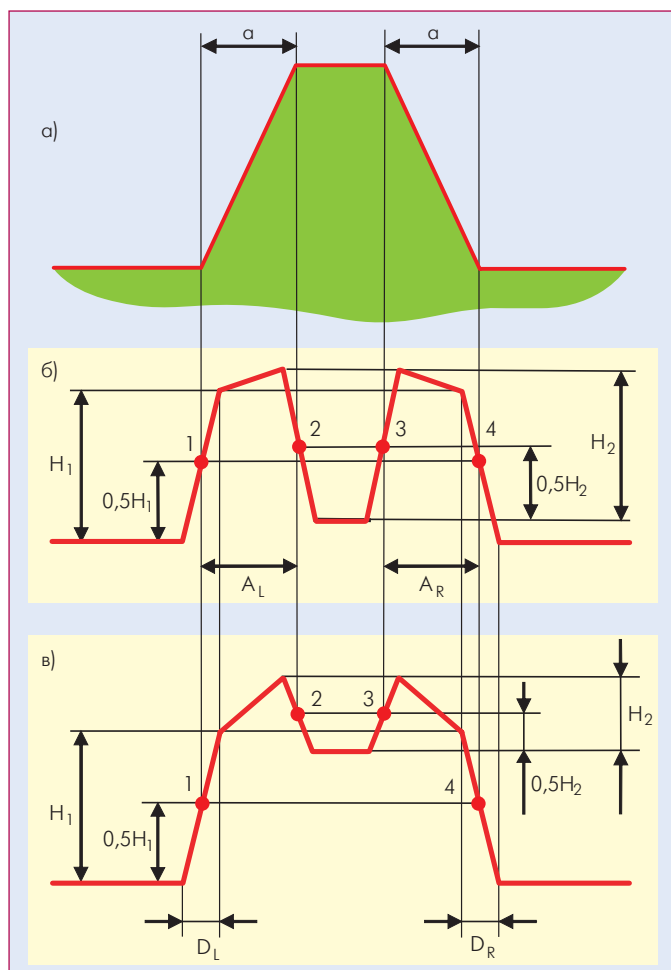


Рис.7 Профиль выступа рельефной меры (а) и сигналы, полученные при сканировании выступа на низковольтном (б) и высоковольтном (в) РЭМ с измеряемыми параметрами

печивают единство измерений в нанометровом диапазоне с прослеживаемостью передачи размера Первичного эталона метра потребителю для измерения линейных размеров рельефных структур на РЭМ и АСМ, работающих в нанометровом диапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. National Technology Initiative. The Initiative and its Implementation Plan. Subcommittee on Nanoscience, Engineering and Technology. 2000. (<http://www.nano.gov>).
 2. Kalendin V.V., Chernyakov V.N., Todua P.A., Zhelko-

vaev Zh. Etalon interferometric comparator for 3D measurements of surface topography, based on the scanning tunnel and atomic force microscopes. // Proc. of the 9-th International Precision Engineering Seminar. Germany. 1997. P. 138–139.

3. Волк Ч.П., Горнев Е.С., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., Прохоров А.М., Раков А.В. Линейная мера микронного, 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. 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.

5. Novikov Yu.A., Filippov M.N., Lysov I.D., Rakov A.V., Sharonov V.A., Todua P.A. Direct measurement of the linewidth of relief element on AFM in nanometer range. // Proc. of SPIE. 2008. V. 7025. P. 702510-1 -702510-10.

6. ГОСТ Р 8.628-2007. Меры рельефные нанометрового диапазона. Требования к геометрическим формам, линейным размерам и выбору материала для изготовления. Москва. Стандартиформ. 2007. 11 с.

7. ГОСТ Р 8.629-2007. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецидальным профилем элементов. Методика поверки. Москва. Стандартиформ. 2007. 16 с.

8. ГОСТ Р 8.630-2007. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые измерительные. Методика поверки. Москва. Стандартиформ. 2007. 12 с.

9. ГОСТ Р 8.631-2007. Микроскопы электронные растровые измерительные. Методика поверки. Москва. Стандартиформ. 2007. 12 с.

10. ГОСТ Р 8.635-2007. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые. Методика калибровки. Москва. Стандартиформ. 2008. 12 с.

11. ГОСТ Р 8.636-2007. Микроскопы электронные растровые. Методика калибровки. Москва. Стандартиформ. 2008. 12 с.

12. ГОСТ Р 8.644-2008. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецидальным профилем элементов. Методика калибровки. Москва. Стандартиформ. 2008. 16 с.