

П.Тодуа, д.ф.-м.н., Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума (НИЦПВ), Московский физико-технический институт (МФТИ), Москва, [www.nicpv.ru](http://www.nicpv.ru), [fgupnicpv@mail.ru](mailto:fgupnicpv@mail.ru)

# МЕТРОЛОГИЯ

## И СТАНДАРТИЗАЦИЯ В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ

**И**стория развития науки и техники неразрывно связана с развитием систем, методов и средств измерений. Нанотехнологии поставили ряд новых специфических задач, обусловленных малыми размерами элементов и структур, с которыми приходится иметь дело в данной области. Здесь, как нигде, актуален тезис: «Если нельзя правильно измерить, то невозможно создать».

Все страны, вступившие в нанотехнологический прорыв, прекрасно представляют необходимость опережающего развития метрологии в этой бурно развивающейся области знания. Ведь именно уровень точности и достоверности измерений способен либо стимулировать развитие соответствующих отраслей экономики, либо служить сдерживающим фактором. Особо это подчеркивает то обстоятельство, что в нанотехнологиях приборно-аналитическая и технологическая составляющие работают на пределе своих возможностей, что увеличивает вероятность ошибки, тем более связанной с человеческим фактором.

Одна из первоочередных задач стандартизации в нанотехнологиях – стандартизация параметров и свойств материалов, объектов, элементов и структур нанотехнологий, подлежащих измерениям. При межотраслевом и междисциплинарном характере нанотехнологий, различной терминологии и разных исследовательских и измерительных приемах и методах – это непростая, последовательно решаемая задача, несущая в себе объединяющее начало. К ней вплотную примыкает другая задача – необходимость стандартизации терминов и определений в нанотехнологиях, направленная на решение проблем общения и взаимопонимания различных групп исследователей не только внутри одной отдельно взятой страны, но и в рамках междисциплинарного обмена информацией между странами. Отсюда закономерное следствие – необходимость аттестованных и стандартизованных методик выполнения измерений, методик калибровки и поверки средств измерений, применяемых в нанотехнологиях, и многое другое, что определяется потребностями развития инфраструктуры nanoиндустрии.

Особый аспект стандартизации – решение задач обеспечения здоровья и безопасности операторов технологических процессов и лиц, взаимодействующих с продукцией нанотехнологий на всех этапах ее производства, испытаний, исследований и применений, а также экологической безопасности окружающей среды.

Логически следует, что «наибольший статистический вес» приходится на метрологию, поскольку именно она является количественным базисом стандартизации и сертификации. Специфика нанотехнологий привела к развитию нового направления в метрологии – нанометрологии, с которой связаны все теоретические и практические аспекты метрологического обеспечения единства измерений в нанотехнологиях. Из самого определения нанотехнологии, оперирующей с объектами нанометровой протяженности, естественным образом

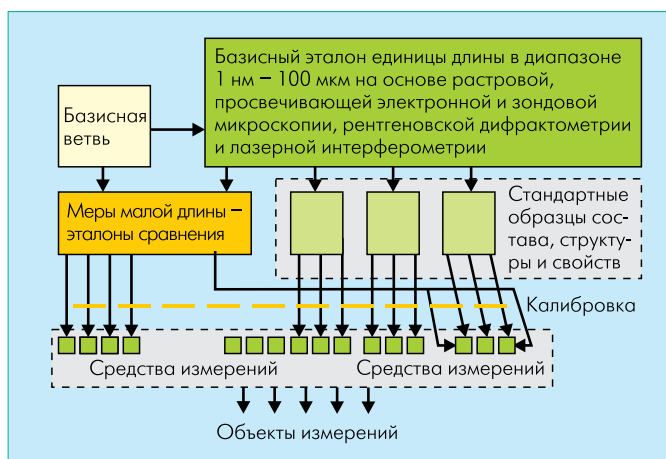


Рис.1 Схема метрологического и стандартизационного обеспечения нанотехнологий

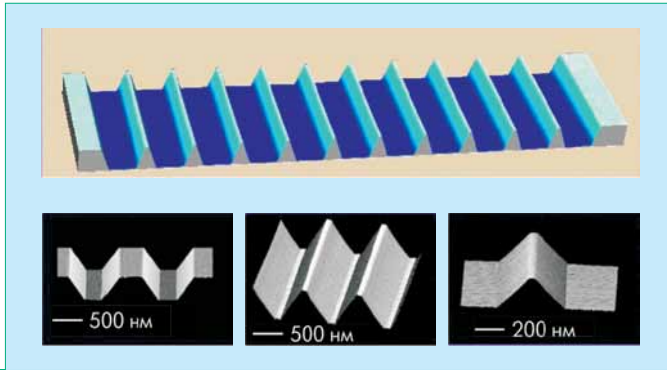
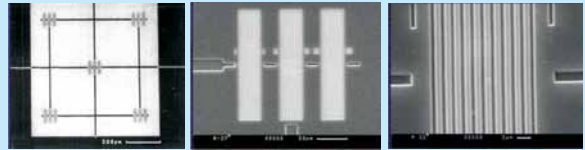


Рис.2 Изображение эталона сравнения в атомно-силовом микроскопе

следует первоочередная задача измерений геометрических параметров объекта, что, в свою очередь, обуславливает необходимость обеспечения единства линейных измерений в нанометровом диапазоне. Но этим обстоятельством роль нанометрологии линейных измерений не исчерпывается. Она присутствует в неявном виде в подавляющем большинстве методов и средств обеспечения единства измерений физико-химических параметров и свойств объектов нанотехнологий, таких как механические, оптические, электрические, магнитные, акустические и т. д. Часто необходимо осуществ-

влять прецизионное пространственное позиционирование зонда измерительного устройства в место требуемого съема измерительной информации. При этом диапазон линейного сканирования по каждой координате может простирается от единиц нанометра до сотен и более микрон, а требуемая точность выставления координаты составлять десятые доли нанометра.

Метод аттестации – интерферометрический  
Носитель размера – длина волны стабилизированного He-Ne лазера



Общий вид меры в РЭМ при разных увеличениях

Номинальные размеры		Погрешность аттестации
Шаг	2000 нм	$\pm 1$ нм
Ширина линии	10 – 1500 нм	$\pm 1$ нм
Высота (глубина)	100 – 1500 нм	$\pm 1$ %

Рис.3 Эталон сравнения – линейная мера

Почему в нанометрологии столь большое внимание уделяют проблеме реализации линейной шкалы в нанометровом и прилегающем к нему диапазонах? Во-первых, потому что решение первоочередной задачи метрологии в нанотехнологиях – обеспечение единства измерений геометрических параметров нанообъекта – опирается на метрологию линейных измерений. Во-вторых, как указано выше, измерения механических, электрических, магнитных, оптических и многих других параметров и свойств объектов нанотехнологии связано с необходимостью позиционирования зонда измерительного устройства в заданное место с наивысшей точностью [1, 2].

Обеспечение единства измерений физико-химических параметров и свойств объекта измерения требует привязки соответствующего средства измерений к эталону, воспроизводящему единицу данной физической величины (например, проводимости – к эталонному сопротивлению), а в нанотехнологиях в большинстве случаев – еще и обязательной привязки к

базисному эталону единицы длины (рис.1) для «точности попадания в цель». Этим дуализмом не ограничивается уникальность базисного эталона. Если обратить внимание на параметры, то видно, что диапазон измерений длины от единиц нанометров до сотен и более микрометров перекрывает более пяти порядков значений измеряемой величины при точности измерений в десятые – единицы нанометра во всем диапазоне.

Линейка объектов нанотехнологий и собственно наноиндустрии чрезвычайно широка, простирается от ультрадисперсных сред до наноструктурированных многослойных материалов и кристаллов. Она включает квантоворазмерные структуры с размерностями локализации: одна – так называемые квантовые ямы (сверхтонкие слои), две – квантовые проволоки или нити, три – квантовые точки. Особенности физических эффектов и протекающих при этом процессов, в том числе оптических, люминесцентных, электрических, магнитных, механических и многих других, определяются характерным размером. Причем в одном и том же материале различные эффекты, связанные с размером, проявляются по-разному. Например, особенность оптических свойств материала в ультрадисперсном виде может проявляться при одних размерах наночастиц, а теплофизических – при других. Большинство методов исследований и измерений, которые широко применяются в наноиндустрии, – просвечивающая и растровая электронная микроскопии (РЭМ), сканирующая зондовая микроскопия, ионно-полевая микроскопия, фотоэмиссионная и рентгеновская спектрометрия и рентгеновская дифрактометрия, требуют калибровки средств измерений по стандартным образцам состава, структуры, свойств с известными размерными (то есть геометрическими) характеристиками. Например, один из известных способов определения размеров ультрадисперсных частиц заключается в изучении рассеяния света на них. Рассеяние зависит от соотношения размеров частиц, длины волны падающего излучения и поляризации. При определении размеров частиц, как правило, используется лазерное излучение, но для калибровки такого средства измерений необходим набор ультрадисперсных частиц с дискретным рядом точно заданных размеров.

При доведении широкозонных полупроводниковых соединений группы  $A_2B_6$  до ультрадисперсного состояния происходит «голубое смещение» полосы люминесценции, по которому можно судить о размерах ультрадисперсных частиц люминофора. Но в каждом конкретном случае используемого полупроводникового материала для калибровки необходим набор стандартных образцов из того же материала с целым рядом размеров. При контроле технологических процессов создания многослойных тонкопленочных структур, в том числе и многослойных гетероструктур, необходимо привлечение рентгенодиагностических методов контроля скрытых слоев и, соответственно, наличие многослойных стандартных образцов состава и структуры для калибровки соответствующих средств измерений. Фундаментальные исследования, связанные с прямыми измерениями

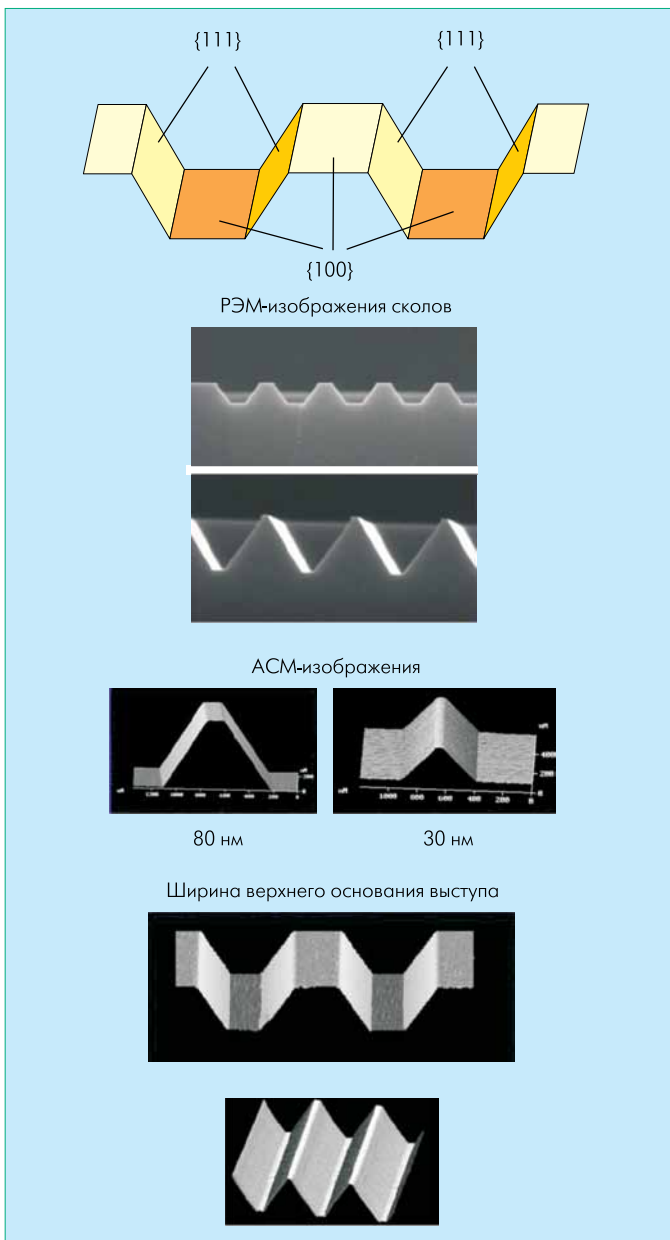


Рис. 4 Профиль эталона сравнения

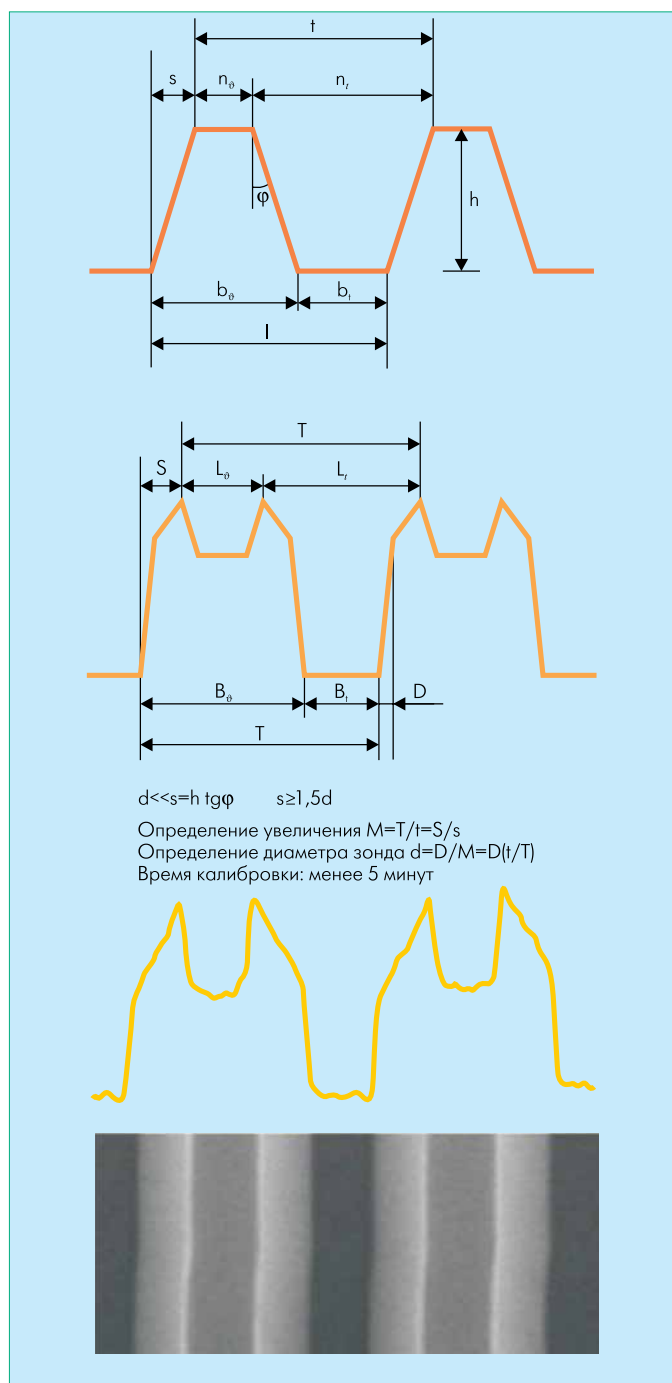


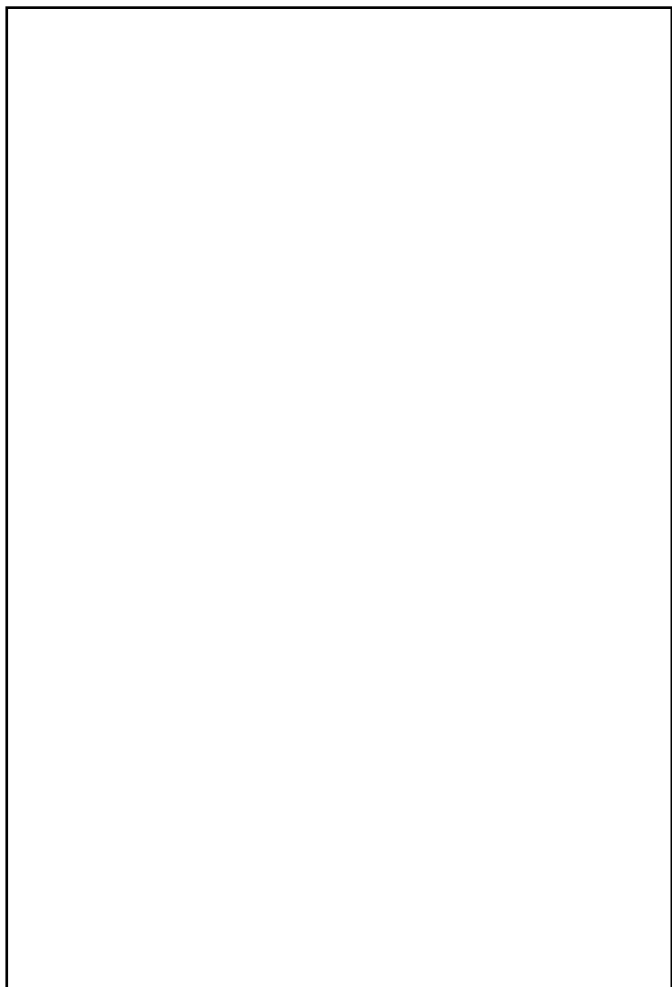
Рис. 5 Метод калибровки РЭМ по одному изображению

физико-химических параметров веществ и материалов нанотехнологии, элементов и устройств нанотехники, требуют понимания закономерностей взаимодействия зонда измерительного средства с объектом измерения. Особую важность приобретают вопросы метрологии и стандартизации таких измерений, метрологического обеспечения, передачи размера единицы физической величины в нанометровый диапазон [3], характеризующийся специфическими особенностями.

Первостепенной задачей опережающего развития нанометрологии считают необходимость реализации наношкалы в нанометровом и прилегающих к нему диапазонах. Именно этой первостепеннейшей задаче нанометрологии посвящаются конференции и многочисленные публикации. Отметим существ-

венный вклад России в решение этой фундаментальной измерительной проблемы. Достижение предельных возможностей при измерениях длины в нанометровом диапазоне связано с использованием высокоразрешающих методов РЭМ и сканирующей зондовой микроскопии в сочетании с лазерной интерферометрией и рентгеновской дифрактометрией при сохранении абсолютной привязки к первичному эталону метра.

В результате длительных исследований в России концептуально создана основа метрологического обеспечения измерений длины в диапазоне 1 – 1000 нм (см. рис.1). При этом разработаны: методология обеспечения единства измерений в диапазоне длин 1 – 1000 нм, включающая принципы зондовой микроскопии и лазерной интерферометрии и рентгеновской дифрактометрии; эталонный комплекс средств измерений, обеспечивающий воспроизведение и передачу размера единицы длины в диапазоне 1 – 1000 нм вещественным мерам длины с погрешностью 0,5 нм; поколение мер малой длины для калибровки средств измерений в диапазоне 1 – 1000 нм, в том числе меры нанорельефа поверхности; методология и алгоритмы измерения параметров профиля элементов микро- и наноструктур и пакет компьютерных программ для автоматизации таких измерений. Важнейший этап в решении задач метрологического обеспечения линейных измерений в нанометровом диапазоне – это создание вещес-



твенных носителей размера – мер, с программируемым нано-рельефом поверхности. Они обеспечивают калибровку средств измерений с наивысшей точностью (рис. 2, 3, 4). Именно такие трехмерные меры малой длины, или эталоны сравнения, – материальные носители размера, позволяют осуществлять комплексную калибровку и контроль основных параметров растровых электронных и сканирующих зондовых микроскопов. Они предназначены для перевода этих сложных устройств из разряда устройств для визуализации исследуемого объекта в разряд средств измерений. Приборы для измерений линейных размеров объектов исследования обеспечивают привязку измеряемых величин в нанометровой области к первичному эталону единицы длины – метру [4–9].

Для аттестации эталонов сравнения используют эталонную трехмерную интерферометрическую систему измерений наноперемещений. Аттестуют шаг меры и размеры верхних и нижних оснований выступов и канавок (ширина линии), а также высоту (глубину) рельефа. Эталоны сравнения можно изготовить с разной шириной линий от 10 нм до 1500 нм и высотой рельефа от 100 нм до 1500 нм, но при одном и том же шаге структуры. Мера позволяет по одному ее изображению в РЭМ (даже по одному сигналу), что очень важно для контроля технологических процессов, выполнить калибровку микроскопа (рис.5), определить увеличение микроскопа, линейность его шкал и диаметр электронного зонда [10–15].

Кроме того, при необходимости подтвердить правильность измерений можно контролировать параметры РЭМ непосредственно в процессе проведения измерений размеров исследуемого объекта. Это является дополнительной гаран-

тией высокого качества измерений. Мера позволяет легко автоматизировать линейные измерения и создавать на основе растровых электронных микроскопов автоматизированные измерительные комплексы. Ряд подобных комплексов уже существует. Так в НИЦПВ создан автоматизированный комплекс для линейных измерений в области размеров от 1 нм до 100 мкм на основе растрового электронного микроскопа JSM-6460LV.

Аналогичным образом по заданным параметрам меры проводятся калибровка и контроль [16–21] таких характеристик атомно-силовых микроскопов (АСМ), как цена деления и линейность шкал по всем трем координатам, ортогональность систем сканирования, радиус острия зонда (кантилевера), настройка параметров и выход микроскопа в рабочий режим (рис. 6). Системы калибровки и аттестации АСМ успешно внедряются на предприятиях, специализирующихся на создании оборудования для нанотехнологии.

Развитие нанотехнологий ужесточает требования к измерительным системам, погрешности измерений которых должны быть сравнимы с межатомными расстояниями. Все это требует серьезного отношения к вопросу обеспечения единства линейных измерений в нанометровом диапазоне. РЭМ и сканирующий зондовый микроскопы только тогда могут считаться средствами измерений, когда их параметры будут соответствующим образом аттестовываться, калиброваться и контролироваться, причем последнее непосредственно в процессе измерений. Трехмерные меры или эталоны сравнения – материальные носители размера – своеобразный мост между объектом измерений и эталоном метра, являются идеальным средством для осуществления таких операций. Важно одно: культура измерений требует, чтобы любой растровый электронный или сканирующий зондовый микроскоп, независимо от того, где он находится – в научной или промышленной лаборатории, учебном заведении или участвует в технологическом процессе, – должен быть укомплектован мерами, обеспечивающими калибровку и контроль параметров этого сложного устройства. Только тогда измерения, производимые на нем, могут претендовать на достоверность. Кроме того, использование методов и средств калибровки и аттестации растровых электронных и сканирующих зондовых микроскопов производителями соответствующих приборов позволит им создавать новые приборы с лучшими характеристиками, которые, в свою очередь, позволят продвигаться дальше на пути развития нанотехнологий.

Для обеспечения нормативной базы нанометрологии, разработаны и введены в действие семь российских стандарта [22]: ГОСТ Р 8.628–2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния. Требования к геометрическим формам, линейным размерам и выбору материала для изготовления»; ГОСТ Р 8.629–2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельеф-

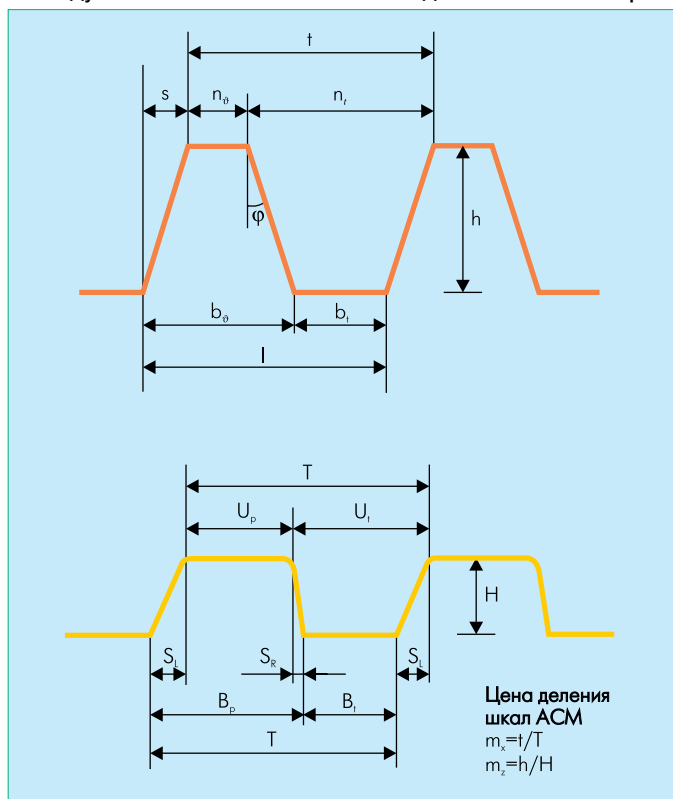


Рис. 6 Метод калибровки АСМ по одному изображению



ные нанометрового диапазона с трапецеидальным профилем элементов. Методика поверки»; ГОСТ Р 8.630–2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые измерительные. Методика поверки»; ГОСТ Р 8.631–2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы электронные растровые измерительные. Методика поверки»; ГОСТ Р 8.635–2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые. Методика калибровки»; ГОСТ Р 8.636–2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы электронные растровые. Методика калибровки»; ОСТ Р 8.644 – 2008 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецеидальным профилем элементов. Методика калибровки».

Для решения научно-технической проблемы обеспечения единства измерений в нанотехнологиях необходимо осуществить ряд научно-методических, технических и организационных мероприятий. В первую очередь, это создание новой структурной схемы передачи размера единиц физических величин от первичных эталонов рабочим средствам измерений. Она исключает многоступенчатость передачи. В этот комплекс мероприятий входят: фундаментальные исследования механизмов взаимодействия зондов измерительных

систем с объектом измерения; разработка новых алгоритмов измерений и соответствующего им математического обеспечения, учитывающего влияние взаимодействия рабочего средства измерений с измеряемым объектом; создание новых мер – материальных носителей размера, обладающих свойствами, аналогичными свойствам вторичного эталона и измеряемого объекта; разработка и создание стандартных образцов состава, структуры и рельефа поверхности и стандартизованных методик измерений в нанометрии, обеспечивающих прослеживаемость передачи размера единицы физической величины от эталона рабочим средствам измерений в нанометровый диапазон без существенной потери точности для аттестации, калибровки и поверки средств измерений. Дело за немногим – необходима гармонизированная система стандартных образцов состава, структуры и свойств, служащих потребностям нанотехнологий. Все это создает предпосылки и закладывает основы ускоренного развития высоких технологий в России, и особенно главной из них – нанотехнологии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Postek M.T. Nanometer – Scale Metrology. – Proc.s of SPIE.2002, v.4608.
2. Тодуа П.А. Метрология в нанотехнологии. – Российские нанотехнологии, 2007, т. 2, № 1 – 2.

3. **Тодуа П.А., Быков В.А., Волк Ч.П. и др.** Метрологическое обеспечение измерений длины в микр- и нанометровом диапазоне и их внедрение в микроэлектронику и нанотехнологию. – Микросистемная техника, 2004, № 1 – 3.
4. **Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A.** Metrology in linear measurements of nanoobject elements. – Proc.of SPIE, 2006, v.6260, №13.
5. **Novikov Yu.A., Gavrilenko V.P., Ozerin Yu.V. et al.** Silicon test object of linewidth of nanometer range for SEM and AFM. – Proc.of SPIE, 2007, v. 6648, № 0R.
6. **Novikov Yu.A., Gavrilenko V.P., Rakov A.V. et al.** Test objects with right-angled and trapezoidal profiles of the relief elements. – Proc.of SPIE, 2008, v.7042, №08.
7. **Todua P.A., Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A. et al.** Check of the quality of fabrication of test objects with a trapezoidal profile. – Proc.of SPIE, 2008, v.7042, № 09.
8. **Данилова М.А., Митюхляев В.Б., Новиков Ю.А. и др.** Тест-объект с шириной линии менее 10 нм для растровой электронной микроскопии. – Измерительная техника, 2008, № 8.
9. **Данилова М.А., Митюхляев В.Б., Новиков Ю.А. и др.** Тест-объект с тремя аттестованными размерами ширины линии для растровой электронной микроскопии. – Измерительная техника, 2008, № 9.
10. **Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A.** Linear sizes measurements of relief elements with the width less 100 nm on a SEM. – Proc.of SPIE, 2006, v. 6260, №15.
11. **Gavrilenko V.P., Filippov M.N., Novikov Yu.A. et al.** Measurements of linear sizes of relief elements in the nanometer range. – Proc.of SPIE, 2007, v.6648, № 0T.
12. **Novikov Yu.A., Darznek S.A., Filippov M.N. et al.** Nanorelief elements in reference measures for scanning electron microscopy. – Proc.of SPIE, 2008, v. 7025, № 11.
13. **Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V. et al.** Measurements of the parameters of the electron beam of a scanning electron microscopy. – Proc.of SPIE, 2008, v.7042, №0С.
14. **Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А.** Точность измерения линейных размеров на РЭМ в микро- и нанотехнологиях. – Измерительная техника, 2008, № 6.
15. **Волк Ч.П., Новиков Ю.А., Раков А.В. и др.** Калибровка РЭМ по двум координатам с использованием одного аттестованного размера. – Измерительная техника, 2008, № 6.
16. **Todua P.A., Filippov M.N., Gavrilenko V.P. et al.** Measurement of linear sizes of relief elements using AFM. – Proc.of SPIE, 2007, v. 6648, № 0S.
17. **Novikov Yu.A., Filippov M.N., Lysov I.D. et al.** Direct measurement of the linewidth of relief elements of AFM in nanometer range. – Proc.of SPIE, 2008, v. 7025, №10.
18. **Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А.** Геометрия формирования изображения в сканирующей зондовой микроскопии. – Микроэлектроника, 2008, т. 37, №6.
19. **Раков А.В., Новиков Ю.А., Тодуа П.А.** Калибровка АСМ по трем координатам с использованием одного аттестованного размера. – Измерительная техника, 2008, № 5.
20. **Раков А.В., Тодуа П.А.** Измерение линейности сканирования в атомно-силовом микроскопе. – Измерительная техника, 2008, № 6.
21. **Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А.** Прямое измерение ширины линии на атомно-силовом микроскопе. – Измерительная техника, 2008, № 5.
22. **Гавриленко В.П., Лесновский Е.Н., Новиков Ю.А. и др.** Первые российские стандарты в нанотехнологиях. – Известия РАН. Сер.физич., 2009, т. 73, №4.



### Выставка технологии машинного зрения «VIT Ехро 2010»

Выставочная компания «Руаль Интерэкс» приглашает специалистов на выставку уникальной инновационной технологии машинного зрения «VIT Ехро 2010» 27–29 апреля 2010 года в Центр Международной Торговли (Москва). Выставка посвящена технологиям машинного зрения, промышленной обработки изображений и системам бесконтактных измерений. Машинное (техническое) зрение – электронная альтернатива человеку на операциях визуального или ручного контроля качества продукции, особенно необходимая на высокоскоростных технологических линиях и в труднодоступных местах производства. Проекту оказывает содействие Европейская ассоциация по машинному зрению (EMVA). Вниманию посетителей будут представлены высокотехнические продукты: системы распознавания, регистрации и анализа изображений; скоростная видеосъемка и промышленные видеокамеры; компоненты и системы машинного зрения; 3D-сканирование и 3D-моделирование; бесконтактные измерения.

Свою продукцию продемонстрируют ведущие бренды России, Белоруссии, Германии, США, Японии: BASLER, FASTVIDEO, IDS IMAGING, IMPERX INCORPORATED, JENOPTIK,

OMRON, SENSOPART, «Алдитек», РИФТЭК и др. Компания Omron Electronics представит новый класс датчиков и систем технического зрения с распознаванием реальных цветов, для точного измерения формы объектов со сложным рельефом поверхности, с множеством интеллектуальных функций. Компания «Алдитек» представит посетителям систему промышленного контрастного автофокусирования URANUS. На стенде компании «Сенсорика-М» посетители выставки смогут познакомиться с широким выбором универсальных систем и датчиков для измерения физических величин в любых условиях эксплуатации производства. НПО «АСТЕК» представит приборы для высокоскоростной видеосъемки и регистрации быстрых процессов. Компания «КамераЛаб» предложит высококачественные промышленные высокоскоростные и мегапиксельные видеокамеры с прогрессивным сканированием. Экспозицию дополняют технические семинары. По всем интересующим вопросам обращайтесь по тел.: +7 (495) 772 3845, e-mail: contact@rual-interex.ru

Организационный комитет ([www.rual-interex.ru](http://www.rual-interex.ru))

