

НАНОМЕТРОЛОГИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ

П.Тодуа
fgupnicpv@mail.ru

История науки и техники неразрывно связана с развитием системы, методов и средств измерений. Нанотехнологии поставили новые специфические задачи, обусловленные малыми размерами элементов и структур. Здесь, как нигде, актуален тезис: «Если нельзя правильно измерить, то невозможно создать».

Страны, вступившие в нанотехнологический прорыв, хорошо представляют необходимость опережающего развития метрологии в этой бурно развивающейся области. Именно уровень точности и достоверности измерений способен стимулировать развитие соответствующих отраслей экономики либо сдерживать его. Особо важно то, что в нанотехнологиях приборно-аналитическая и технологическая составляющие работают на пределе возможностей. Это увеличивает вероятность ошибки, связанной, кроме того, с человеческим фактором.

В этой связи метрологии и стандартизации принадлежит особая роль ключевых элементов приборно-аналитической, технологической и интеллектуальной составляющих нанотехнологий и nanoиндустрии.

Специфика нанотехнологий привела к необходимости зарождения и быстрого развития уникального направления в метрологии – нанометрологии, с которым связаны теоретические и практические аспекты «правильности» измерений, включая эталоны единиц величин; стандартные образцы состава, структуры, размера, свойств; методы и средства калибровки в нанометровом и субнанометровом диапазонах; реализацию наношкалы и многие другие аспекты обеспечения единства измерений.

В решении этой главной задачи метрологии – обеспечении единства измерений, т.е. достижении такого состояния измерительной инфраструктуры, при котором результаты измерений выражены в узаконенных единицах и их погрешности (неопределенности) известны с заданной вероятностью – нанометрология опирается на меры, стандартные образцы состава, структуры, размера, свойств в обеспечение практически каждой единицы оборудования необходимым набором средств, которые воспроизводят нужную шкалу и позволяют осуществлять калибровку средств

измерений, в том числе непосредственно в процессе измерений, что позволяет контролировать результаты каждого из них и обеспечивать их прослеживаемость к эталону соответствующей величины (рис.1).

Создание таких стандартных образцов и мер сопровождается разработкой соответствующих методик поверки и калибровки их самих и средств измерений с их применением, а также методик измерений параметров и характеристик объектов и продукции нанотехнологий и nanoиндустрии с использованием указанных средств измерений.



Рис.1. Прослеживаемость результата измерений к эталону единицы величины



Одна из первоочередных задач стандартизации в нанотехнологиях – стандартизация параметров и свойств материалов, объектов, элементов и структур, подлежащих измерениям. Отсюда закономерное следствие – необходимость аттестованных и стандартизованных методик измерений, калибровки и поверки применяемых в нанотехнологиях средств измерений и многое другое, что определяется потребностями развития инфраструктуры наноиндустрии.

Особый аспект стандартизации – решение задач обеспечения здоровья и безопасности операторов технологических процессов и лиц, взаимодействующих с продукцией нанотехнологий при ее производстве, испытаниях, исследованиях и применении вплоть до утилизации, а также экологической безопасности окружающей среды.

Междисциплинарный характер нанотехнологий инициировал создание в 2005 году в рамках Международной организации по стандартизации (ИСО) Технического комитета ИСО/TK229 «Нанотехнологии». Годом позже в Международной электротехнической комиссии был образован Технический комитет МЭК/TK113 «Стандартизация в области нанотехнологий для электрических и электронных изделий и систем».

Российская сторона представлена в этих комитетах национальным Техническим комитетом ТК441 «Нанотехнологии». Следует подчеркнуть, что ИСО/TK229 и МЭК/TK113 осуществляют свою деятельность в условиях паритетного партнерства, обмена информацией, проведения совместных заседаний, консультаций, форумов, создания совместных рабочих групп по ключевым вопросам стандартизации.

Первоочередные задачи, сформулированные участниками ИСО и МЭК – заинтересованными в развитии этой области странами – состоят в стандартизации в сфере нанотехнологий в направлениях:

- метрология и методы испытаний и измерений;
- стандартные образцы состава структуры, размера и свойств;
- термины и определения; моделирование процессов;
- медицина и безопасность;
- воздействие на окружающую среду.

Решение этих задач даст мощный импульс развитию нанотехнологий и их практическим применениям и внедрениям в различных отраслях.

Область деятельности ИСО/TK229 и МЭК/TK113, как следует из названия, – стандартизация в нанотехнологиях, под которыми в формулировке ИСО/TK229 подразумевается:

- знание и управление процессами, как правило, в масштабе нанометра (не исключая масштаба менее 100 нм) в одном или более измерениях, когда ввод в действие размерного эффекта (явления) приводит к возможности новых применений;
- использование свойств объектов и материалов в нанометровом масштабе, отличающихся от свойств свободных атомов или молекул, а также от объемных свойств вещества, состоящего из этих

атомов или молекул, для создания более совершенных материалов, приборов, систем, реализующих эти новые свойства.

В Концепции развития в РФ работ в области нанотехнологий используются следующие термины:

- нанотехнология – совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, имеющие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большого масштаба;
- наноматериалы – материалы, содержащие структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками;
- наносистемная техника – полностью или частично созданные на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально закончен-

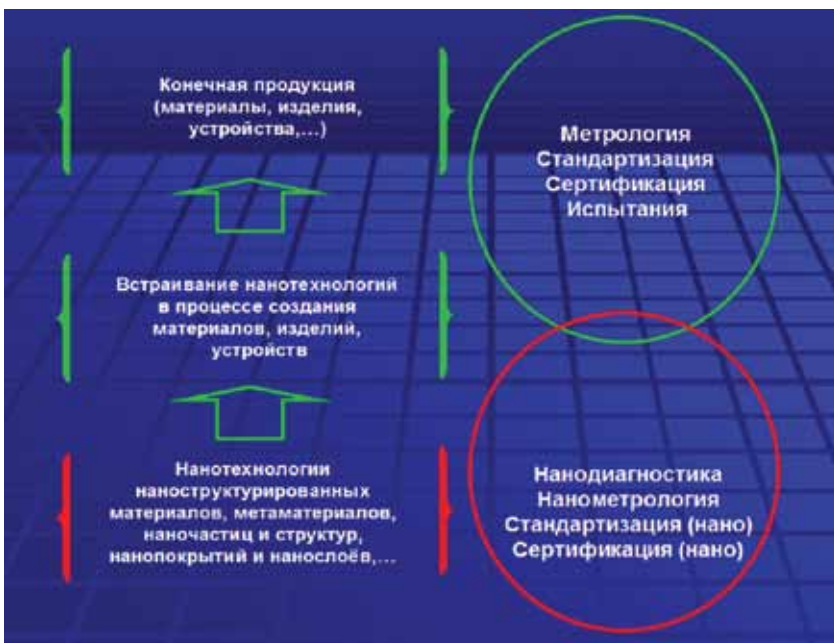


Рис.2. Место и роль нанодиагностики, нанометрологии и стандартизации в нанотехнологиях и nanoиндустрии

ные системы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям;

- наноиндустрия – вид деятельности по созданию продукции на основе нанотехнологий, наноматериалов и наносистемной техники.

Актуальность указанных работ определила необходимость включения научных направлений, связанных с нанотехнологиями, в утвержденный Президентом РФ Перечень критических технологий.

Рис.2 иллюстрирует роль и место нанодиагностики, нанометрологии, стандартизации и сертификации с приставками нано в технологических и инженерно-производственных процессах. Поясним это на примере. Если создается материал для производства лазера на квантовых точках – здесь работает и нанодиагностика, и нанометрология, и наностандартизация. Конечный продукт – лазер на квантовых точках и измерение его параметров: расходимость, длина когерентности, модовый состав, мощность, спектральная плотность излучения – уже область ординарной диагностики, метрологии и стандартизации (верхняя часть рис.2). Конечно,

существует целый ареал – область пересечения той и другой метрологии, и качественно они призваны поддерживать друг друга.

Фундаментальные и проблемно-ориентированные исследования, метрология и стандартизация на наноуровне взаимно подпитывают и обогащают друг друга.

Фундаментальные исследования в нанотехнологиях дают метрологии новые знания и принципы построения эталонов, создания стандартных образцов, требуют новых методов и средств обеспечения единства измерений.

Проблемно-ориентированные исследования в нанотехнологиях открывают новые возможности и новые потребности измерительного базиса. Так, изучение особенностей взаимодействия измерительных нанозондов, пучков заряженных частиц, рентгеновского и оптического излучений с наноструктурированными объектами определили цели, задачи и пути решения проблем нанометрологии и стандартизации, метрологического обеспечения измерений в нанотехнологиях, разработки стандартизованных методик измерений и калибровки стандартных образцов и мер состава, структуры, размера и свойств и средств измерений, а

также стандартизованных методик измерений требуемых параметров объектов и продукции наноиндустрии.

Если взглянуть на отрасли наноиндустрии (рис.3), их метрологическое и нормативно-методическое обеспечение в части единства измерений, то наиболее востребованы измерения линейных или геометрических параметров. Это связано с тем, что из самого определения нанотехнологий, оперирующих с объектами нанометровой протяженности, естественным образом следует первоочередная задача измерений геометрических параметров объекта, что, в свою очередь, обуславливает необходимость обеспечения единства линейных измерений в нанометровом диапазоне. Этим не исчерпывается роль нанометрологии линейных измерений. В неявном виде она присутствует в подавляющем большинстве методов и средств обеспечения единства измерений физико-химических параметров и свойств (механических, оптических, электрических, магнитных, акустических) объектов нанотехнологий.

Часто необходимо осуществлять прецизионное пространственное позиционирование зонда измерительного устройства в требуемом месте съема информации. При этом диапазон линейного сканирования по каж-



Рис.3. Метрологическая и нормативно-методическая база обеспечения единства измерений в нанотехнологиях

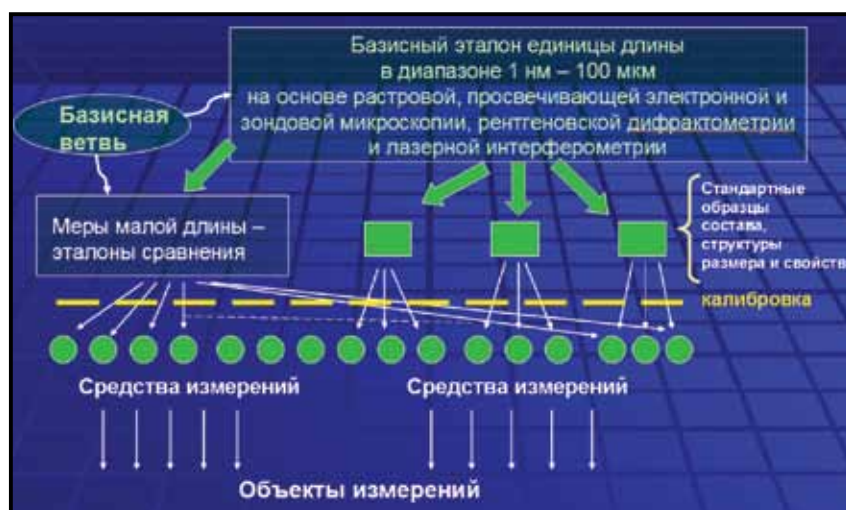


Рис.4. Метрологическое обеспечение измерений в нанотехнологиях

дой координате может простирается от единиц нанометров до сотен микрометров, а требуемая точность выставления координаты составлять десятки доли нанометра.

Почему в нанометрологии столь большое внимание уделяют реализации линейной шкалы в нанометровом и прилегающем диапазонах?

Во-первых, обеспечение единства измерений геометрических параметров нанобъекта – первоочередная задача нанотехнологий.

Во-вторых, измерения многих параметров и свойств объектов нанотехнологий связаны с необходимостью позиционирования зонда измерительного устройства в заданное место с наивысшей точностью [1, 2].

Обеспечение единства измерений физико-химических параметров и свойств объекта требует привязки соответствующего средства измерений к эталону, воспроизводящему единицу величины (например, проводимости – к эталонному сопротивлению), а в нанотехнологиях в большинстве случаев для «точности попадания в цель» еще и обязательной привязки к базисному эталону единицы длины (рис.4).

Уникальность базисного эталона не ограничивается этим дуализмом. Видно, что диапазон измерений длины от единиц нанометров до сотен микрометров перекрывает более пяти по-

рядков значений измеряемой величины при точности измерений в диапазоне в десятые – единицы нанометра.

Из концепции обеспечения прослеживаемости результата каждого измерения геометрических параметров объектов и структур нанотехнологий следует необходимость прослеживаемости к эталону длины – государственному эталону метра.

Линейка объектов нанотехнологий и собственно наноиндустрии чрезвычайно широка и простирается от ультрадисперсных сред до наноструктурированных многослойных материалов и кристаллов. Она включает квантоворазмерные структуры с размерностями локализации: единицы – квантовые ямы (сверхтонкие слои), два – квантовые проволоки или нити, три – квантовые точки. Особенности физических эффектов и протекающих процессов, в том числе оптических, люминесцентных, электрических, магнитных, механических и многих других, определяются характерным размером. В одном и том же материале связанные с размером эффекты проявляются по-разному. Например, особенность оптических свойств материала в ультрадисперсном виде может проявляться при одних размерах наночастиц, а теплофизических – при других.

Чтобы представить себе эффект, связанный с размером,

Эталон – это техническое средство для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы величины с наивысшей точностью.

Май 1875 год – рядом стран, в том числе Россией, была подписана Международная метрическая конвенция и создано в Париже Международное бюро мер и весов – хранитель международных эталонов метрической системы.

Сентябрь 1889 год – на 1-й Генеральной конференции по мерам и весам было принято, что «метр есть длина равная 1/40.000.000 длины Парижского меридиана». В Лондоне были изготовлены прототипы метра – платино-иридиевые жезлы – штриховые меры с неопределенностью 0,1 мкм и розданы странам-участникам.

Последующее развитие науки, техники и других сфер экономики, в том числе торгового комплекса, потребовало более точного определения метра.

Октябрь 1960 год – на XI Генеральной конференции принято новое определение: «Метр – длина, равна 1650763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнем $2p_{10}-5d_5$ атома криптона -86» (Резолюция б). Неопределенность составила 0,01 мкм.

Октябрь 1983 год – на XVII Генеральной конференции предложено новое определение: «Метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени, равный 1/299792458 секунды» (Рекомендация 1).

Сентябрь 1997 год – на 9-й Сессии консультативного комитета по длине были приняты рекомендованные частота и длина волны излучения в вакууме He-Ne/1₂ лазера:

$$\nu = 473612214705 \text{ кГц,}$$

$$\lambda = 632,99139822 \text{ нм.}$$

Наивысшая точность воспроизведения метра составила 10^{-11} м.

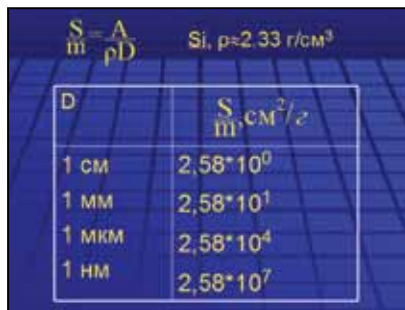


Рис. 5. Размер частиц кремния и их удельная поверхность

достаточно нескольких простых примеров. Представим шарик кремния – основного материала полупроводниковой нанoeлектроники, размером $D \sim 5$ нм, тогда объем его $V \sim 10^{-19}$ см³. Если исходить из плотности кремния $\rho \sim 2,33$ г/см³, в таком объеме содержатся $n \sim 10^{23}$ атомов этого элемента. Исходя из концентрации электрически активной примеси $n_{\text{пр}} \sim 10^{20}$ см⁻³, получим, что таких примесных атомов в шарике всего $n_{\text{пр}} V \sim 10$. Если исходить из концентрации неконтролируемой примеси $n^*_{\text{пр}} \sim 10^{14}$ см⁻³, в шарике $n^*_{\text{пр}} V \sim 10^{-5}$ атомов: в одном шарике содержится один атом такой примеси, а в остальных – 100 тыс. шариков, исключая один, атом неконтролируемой примеси отсутствует. Иными словами, при таком подходе можно получить сверхвысокочистые вещества.

Второй пример хорошо иллюстрируется рис.5. Материал – тот же кремний. Показана зависимость удельной поверхности от диаметра объекта (площадь в см², деленная на массу в граммах). При размерах объекта порядка единиц сантиметра – удельная поверхность составляет несколько см²/г. При размерах порядка десятка нанометров – это уже сотня м²/г: наблюдается возрастание почти на шесть порядков. Увеличение удельной поверхности влечет за собой усиление поверхностной активности, что хорошо для катализа, однако возникает масса вопросов, связанных с воздействием таких частиц на биологические объекты. Создание ультрадисперсных частиц из широкого спектра материалов с раз-

личными размерами важно не только с точки зрения стандартных образцов размера, но и для биологов как объекта исследования его воздействия на живые системы, что особенно критично для медицины, безопасности и окружающей среды.

Большинство методов исследований в нанотехнологии, широко применяемых в нанотехнологии, – просвечивающая и растровая электронная микроскопия (РЭМ), сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ), ионно-полевая микроскопия, фотоэмиссионная и рентгеновская спектроскопия, рентгеновская дифрактометрия требуют калибровки средств измерений по стандартным образцам состава, структуры, свойств с известными размерными (геометрическими) характеристиками. Например, один из известных способов определения размеров ультрадисперсных частиц заключается в изучении рассеяния на них света, зависящего от соотношения размеров частиц, длины волны падающего излучения и поляризации. При определении размеров частиц, как правило, используется лазерное излучение, однако для калибровки такого средства измерений необходим набор ультрадисперсных частиц с дискретным рядом точно заданных размеров.

При доведении широкозонных полупроводниковых соединений группы А2В6 до ультрадисперсного состояния происходит «голубое смещение» полосы люминесценции, по которому можно судить о размерах частиц люминофора. В каждом конкретном случае для калибровки используется полупроводникового материала необходим набор стандартных

образцов из него с целым рядом размеров.

При контроле процессов создания многослойных тонкопленочных структур, в том числе гетероструктур, необходимо использование рентгенодиагностических методов контроля скрытых слоев и для калибровки соответствующих средств измерений – наличие многослойных стандартных образцов состава и структуры.

Фундаментальные исследования, связанные с прямыми измерениями физико-химических параметров 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 величины в характеризующийся специфическими особенностями нанометровый диапазон [3].

Первостепенная задача опережающего развития нанотехнологии – реализация нанометры в нанометровом и прилегающих диапазонах. Именно этой проблеме посвящаются многочисленные конференции и публикации. В решение этой фундаментальной проблемы нельзя не отметить существенный вклад России. Достижение предельных возможностей при измерениях длины в нанометровом диапазоне связано с использованием при сохранении абсолютной привяз-

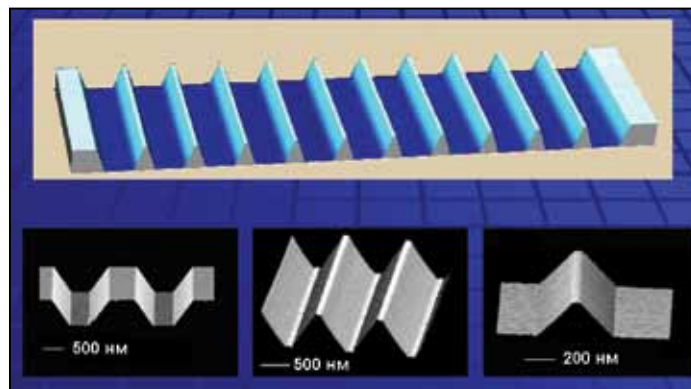


Рис.6. Изображение эталона сравнения – меры в атомно-силовом микроскопе



ки к первичному эталону метра высокоразрешающих методов РЭМ и СЗМ в сочетании с лазерной интерферометрией и рентгеновской дифрактометрией.

В России концептуально создана основа метрологического обеспечения измерений длины в диапазоне 1–1000 нм (рис.4). Разработаны:

- методология обеспечения единства измерений в данном диапазоне, включающая принципы электронной и зондовой микроскопий, лазерной интерферометрии и рентгеновской дифрактометрии;
- метрологический комплекс, 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 данном диапазоне, в том числе меры нанорельефа поверхности;
- методология и алгоритмы измерения параметров профиля элементов микро- и наноструктур;
- пакет компьютерных программ для автоматизации таких измерений.

Важнейший этап в решении задач метрологического обеспечения линейных измерений в нанометровом диапазоне – создание вещественных носителей размера – мер, с программируемым нанорельефом поверхности, которые обеспечивают калибровку средств измерений с наивысшей точностью.

Именно такие трехмерные

меры малой длины (рис. 6–8) – эталоны сравнения – материальные носители размера, позволяют осуществлять комплексную калибровку и контроль основных параметров РЭМ и СЗМ. Они предназначены для перевода этих сложных устройств из разряда приборов для визуализации исследуемого объекта в средства измерений. Приборы для измерений линейных размеров объектов исследования обеспечивают привязку измеряемых величин в нанометровой области к первичному эталону единицы длины – метру [4–9].

Конструктивно мера, получившая название МШПС-2.0К (мера ширины и периода, специальная, номинальный размер 2,0 мкм, кремниевая), сформирована на поверхности монокристаллического кремния.

Кремниевый чип с мерой имеет размер 10x10 мм² и толщину 500 мкм. Мера состоит из пяти одинаковых модулей, расположенных по четырем углам квадрата 1x1 мм² и в его центре. Общий вид меры, одного из модулей и его шаговой структуры последовательно демонстрируется на рис.7. Модуль (рис.7 – центр) представляет собой три шаговые рельефные структуры на поверхности кремния, состоящие из 11 канавок (рис.7, справа).

Элементы рельефа структуры имеют профиль в форме трапеции (рис. 8) с равными боковыми сторонами, заданным углом их наклона $\varphi=54,74^\circ$ относительно нижнего основания и определяемым углом между кристаллографическими плос-

костями (100) и (111). На нем же приведены взаиморасположение кристаллографических плоскостей в мере, вид профиля шаговой структуры в РЭМ и его изображение в АСМ.

Номинальный размер шага структуры – 2 мкм, а его точное значение (расстояние между эквивалентными стенками конкретной пары элементов рельефа) определяется при аттестации меры на метрологическом комплексе НИЦПВ. Глубина рельефа структуры, ширина линии (выступа/канавки) задаются при изготовлении меры в зависимости от решаемых задач. Длина элементов рельефа шаговой структуры составляет 100 мкм.

В пользу высокого качества меры свидетельствует изображение в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) среза поперечного сечения меры, толщиной порядка 50 нм (рис.9), полученного с помощью острорасфокусированного пучка ионов на Multi-beam SEM-FIB-Sistem JIB-4500 («JEOL», Япония). Срез осуществлен перпендикулярно плоскостям (100) и (111). В плоскости ПЭМ-изображения в режиме светлого и темного полей видны атомные плоскости (111), расстояние между которыми $d=a/\sqrt{3}$, где a – параметр решетки кремния ($d=0,314$ нм).

Аттестация мер производится на АСМ (рис.10), входящем в состав метрологического комплекса (см. рис.4) по обеспечению единства измерений геометрических параметров объектов нанотехнологий и продукции наноиндустрии.

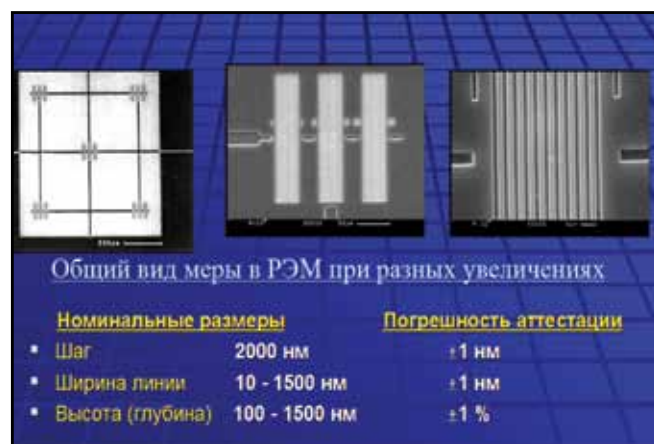


Рис.7. Эталон сравнения – мера

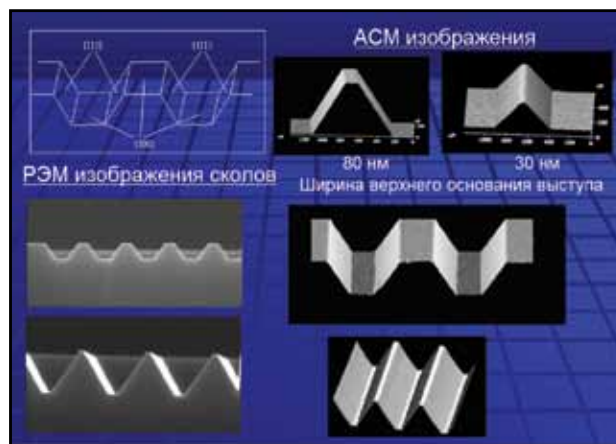


Рис.8. Профиль эталона сравнения – мера

КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЯ

Аттестуются шаг меры и размеры верхних и нижних оснований выступов и канавок (ширина линии), а также высота (глубина) рельефа. При одном и том же шаге структуры возможно изготовление эталонов сравнения с шириной линии в диапазоне 10–1500 нм и высотой рельефа 100–1500 нм. Мера позволяет по одному ее изображению в РЭМ (даже по одному сигналу), что очень важно для контроля технологических процессов, выполнить калибровку микроскопа (рис.11), определить его увеличение, линейность шкал и диаметр электронного зонда [10–15]. Слева вверху приведены характерные параметры эталонной меры, в центральной части – параметры видеосигнала, в правой части – реальное РЭМ-изображение. При необходимости подтвердить правильность измерений можно контролировать параметры РЭМ непосредственно при измерении размеров исследуемого объекта, что дополнительно гарантирует их высокое качество.

Мера позволяет легко автоматизировать линейные измерения и создавать на основе РЭМ автоматизированные измерительные комплексы, уже существующие. В частности, в НИЦПВ созданы автоматизированные комплексы для линейных измерений в диапазоне 1 нм–100 мкм на основе РЭМ JSM-6460 LV («JEOL», Япония) и РЭМ сверхвысокого разрешения S-4800 («Hitachi», Япония).

Аналогичным образом по заданным параметрам меры проводятся калибровка и контроль [16–21] таких характеристик

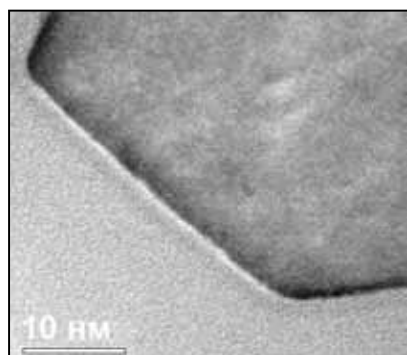


Рис.9. ПЭМ-изображение верхнего основания меры

АСМ, как цена деления и линейность шкал по трем координатам, ортогональность систем сканирования, радиус острия зонда (кантилевера), настройка параметров, выход микроскопа в рабочий режим (рис.12).

Слева вверху изображены характерные параметры эталонной меры, а ее АСМ-изображение – справа. Системы калибровки и аттестации АСМ успешно внедряются на предприятиях, специализирующихся на создании оборудования для нанотехнологий.

Развитие нанотехнологий ужесточает требования к измерительным системам, погрешности измерений которых должны быть сравнимы с межатомными расстояниями, что требует серьезного отношения к обеспечению единства линейных измерений в нанометровом диапазоне. РЭМ и СЗМ только тогда могут считаться средствами измерений, когда их параметры соответствующим образом аттестованы, калибруются и контролируются, причем последнее осуществляется непосредственно в процессе измерений. Трехмерные меры или эталоны сравнения – материальные носители размера – своеобразный мост между объектом измерений и эталоном метра – идеальное средство для осуществления таких операций. Непреложно одно: культура измерений требует, чтобы любой РЭМ или СЗМ, независимо от того, где они работают – в научной или промышленной лаборатории, учебном заведении или в технологическом процессе, – должны быть укомплектованы мерами, обеспечивающими калибровку и контроль параметров этих устройств. Только тогда производимые измерения могут претендовать на достоверность.

Использование методов и средств калибровки и аттестации производителями РЭМ и

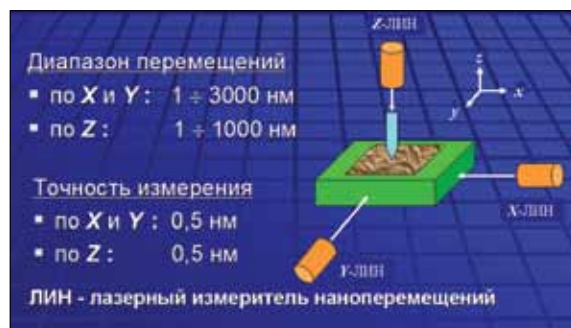


Рис.10. Метрологический атомно-силовой микроскоп

СЗМ позволит им создавать новые приборы с лучшими характеристиками, которые, в свою очередь, обеспечат дальнейшее продвижение на пути развития нанотехнологий.

На рис.9 представлено ПЭМ изображение поперечного среза эталонной меры для РЭМ и АСМ. Напомним, что ее параметры измерены интерферометрически на метрологическом АСМ (длина волны излучения He-Ne лазера – материальный носитель длины) – привязаны к эталону метра. Отсюда возникает возможность использования таких срезов – новых мер, в качестве стандартных образцов для ПЭМ.

В обеспечение нормативно-методической базы нанометрологии разработаны и последовательно вводятся в действие национальные стандарты [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» [23].
- ГОСТ Р 8.629-2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапециевидным профилем элементов. Методика поверки» [24].
- ГОСТ Р 8.630-2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые измеритель-

- «Методика поверки» [25];
 - ГОСТ Р 8.631-2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы электронные растровые измерительные. Методика поверки» [26].
 - ГОСТ Р 8.635-2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые. Методика калибровки» [27].
 - ГОСТ Р 8.636-2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы электронные растровые. Методика калибровки» [28].
 - ГОСТ Р 8.644-2008 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецидальным профилем элементов. Методика калибровки» [29].
 - ГОСТ Р 8.696-2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Межплоскостные расстояния в кристаллах и распределение интенсивностей в дифракционных картинах. Методика выполнения измерений с помощью электронного дифрактометра» [30].
 - ГОСТ Р 8.697-2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Межплоскостные расстояния в кристаллах. Методика выполнения измерений с помощью просвечивающего электронного микроскопа» [31].
 - ГОСТ Р 8.698-2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Размерные параметры наночастиц и тонких пленок. Методика выполнения измерений с помощью малоуглового рентгеновского дифрактометра» [32].
 - ГОСТ Р 8.700-2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методика измерений эффективной высоты шероховатости поверхности с помощью сканирующего зондового атомно-силового микроскопа» [33].
- Разработаны и введены в действие Межгосударственные стандарты (СНГ):
- ГОСТ 8.591-2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецидальным профилем элементов. Методика поверки» [34].
 - ГОСТ 8.592-2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния. Требования к геометрическим формам, линейным размерам и выбору материала для изготовления» [35].
 - ГОСТ 8.593-2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые. Методика поверки» [36].
 - ГОСТ 8.594-2009 «Государ-

ственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы электронные растровые. Методика поверки» [37].

Организации-разработчики вышеназванных стандартов:

Государственный научный метрологический центр НИЦПВ;

РНИЦ «Курчатовский институт»;
Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН;

Московский физико-технический институт.

Разработанные стандарты взаимодополняют друг друга, что свидетельствует о системном подходе к этой проблеме. Так, например, при измерении параметров шероховатости в нанодиапазоне с помощью сканирующего АСМ следует указывать радиус острия кантилевера [33], который определяется в соответствии с методикой стандарта [27], опирающейся на меры. Требования к геометрическим размерам, материалу, методам калибровки и поверки изложены в стандартах [23, 24, 29].

Междисциплинарный характер нанотехнологий и различные исследовательские, технологические и измерительные подходы и методы, используемые в различных отраслях различными научными центрами и лабораториями, приводят к некой разобщенности, затрудняющей осуществление успешного обмена технической информацией. Это обстоятельство инициировало выход в свет в издательстве «Техносфера» терминологического словаря «Мир материалов и технологий. Нанотехнологии, метрология, стандартизация и сертификация в терминах и определениях» под редакцией М.В. Ковальчука, П.А. Тодуа [38], призванного улучшить взаимопонимание между специалистами, работающими в различных областях и сферах нанотехнологий, с теми, кто призван осуществлять метрологическое и стандартизационное обеспечение в этой области науки, техники и производства.

Для решения проблемы обеспечения единства измерений в нанотехнологиях необходимо

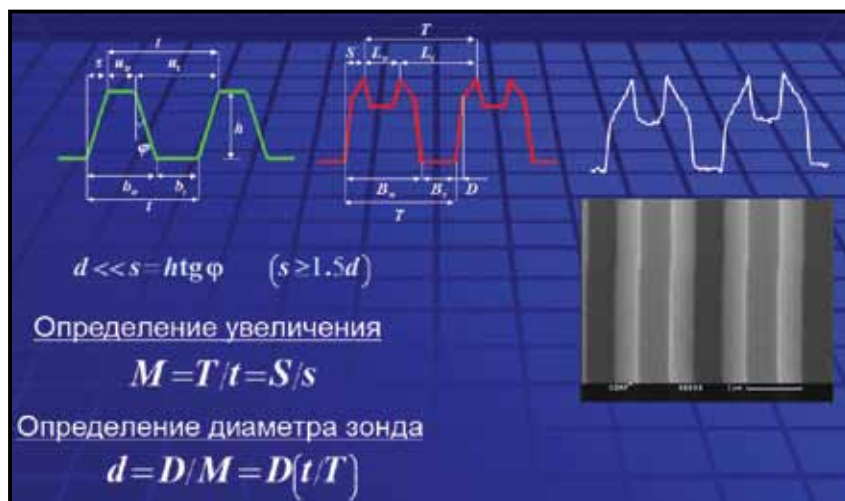


Рис.11. Принцип калибровки растрового электронного микроскопа с помощью эталонной меры

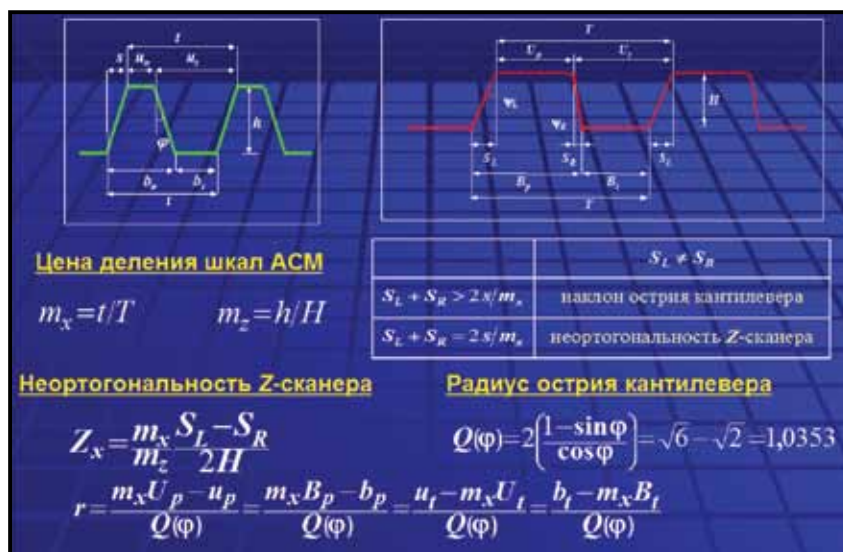


Рис.12. Принцип калибровки атомно-силового микроскопа

осуществить ряд научно-методических, технических и организационных мероприятий. В первую очередь, это создание новой структурной схемы передачи размера единиц величин от первичных эталонов рабочим средствам измерений. Она исключает многоступенчатость передачи (см. рис.4). 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, размера и свойств;
- создание стандартизованных методик измерений в нанометрии, обеспечивающих прослеживаемость передачи размера единицы величины от эталона на рабочим средствам измерений в нм-диапазон без существенной потери точности для аттестации, калибровки и поверки средств измерений. Достичь эту цель вполне ре-

ально, так как фундамент решения проблемы основан на концепции базисного эталона (рис.4), в котором реализована нанoshкала. Этот эталон – основа для передачи единиц величин в нанометровый диапазон. Дело за немногим – необходима гармонизированная система стандартных образцов состава, структуры, размера и свойств, служащих потребностям нанотехнологий. Все это создает предпосылки и закладывает основы ускоренного развития в России высоких технологий, и особенно главной из них – нанотехнологии.

*по вопросам приобретения эталонов сравнения – метрологически аттестованных мер для калибровки РЭМ и АСМ в нм-диапазоне – обращаться: 119421, Россия, Москва, ул. Новаторов, дом 40, корп. 1, НИЦПВ, Тел.: (+7 495) 935-9777, Факс: (+7 495) 935-5911
e-mail: fgupnicpv@mail.ru,
www.nicpv.ru*

Литература

1. М.Т.Postek Nanometer — Scale Metrology // Proceedings of SPIE.2002, vol.4608, p.84-96.
2. Тодуа П.А. Метрология в нанотехнологии. – Российские нанотехнологии. 2007, т. 2, № 1-2, с.61-69.
3. Тодуа П.А., Быков В.А., Волк Ч.П., Горнев Е.С., Желкобаев Ж., Зыкин Л.М., Ишанов А.Б., Календин В.В., Нови-

ков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., А.М. Прохоров, Раков А.В., Саунин С.А., Черняков В.Н. Метрологическое обеспечение измерений длины в микрометровом и нанометровом диапазоне и их внедрение в микроэлектронику и нанотехнологию. – Микросистемная техника, 2004, № 1, с.38-44; № 2, с.24-39; № 3, с.25-32.

4. Yu.A.Novikov, A.V.Rakov, P.A.Todua. Metrology in linear measurements of nanoobject elements. – Proceedings of SPIE,2006, vol. 6260, p.626013-1-626013-8.

5. Yu.A.Novikov, V.P.Gavrilenko, Yu.V.Ozerin, A.V.Rakov, P.A.Todua. Silicon test object of linewidth of nanometer range for SEM and AFM. – Proceedings of SPIE, 2007, vol. 6648, p.66480R-1-66480R-11.

6. Yu.A.Novikov, V.P.Gavrilenko, A.V.Rakov, P.A.Todua. Test objects with right-angled and trapezoidal profiles of the relief elements. – Proceedings of SPIE, 2008, vol. 7042, p.704208-1-704208-12.

7. P.A.Todua, V.P.Gavrilenko, Yu.A. Novikov, A.V. Rakov. Check of the quality of fabrication of test objects with a trapezoidal profile. – Proceedings of SPIE, 2008, vol. 7042, p. 704209-1-704209-8.

8. 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.

9. Данилова М.А., Митюхляев В.Б., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Раков А.В., Тодуа П.А. Тест-объект с тремя аттестованными размерами ширины линии для растровой электронной микроскопии. – Измерительная техника, 2008, № 9, с. 49-51.

10. Yu.A.Novikov, A.V.Rakov, P.A.Todua. Linear sizes measurements of relief elements with the width less 100 nm on a SEM. – Proceedings of SPIE, 2006, vol. 6260, p. 626015-1-626015-6.

11. V.P.Gavrilenko, M.N.Filippov, Yu.A.Novikov, A.V.Ra-

КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЯ

kov, P.A.Todua. Measurements of linear sizes of relief elements in the nanometer range using a scanning electron microscopy. – Proceedings of SPIE, 2007, vol. 6648, p. 66480T-1-66480T-12

12. Yu.A.Novikov, S.A.Darznak, M.N.Filippov, V.B.Mityukhlyayev, A.V.Rakov, P.A.Todua. Nanorelief elements in reference measures for scanning electron microscopy. – Proceedings of SPIE, 2008, vol. 7025, p. 702511-1-702511-10.

13. V.P.Gavrilenko, Yu.A.Novikov, A.V.Rakov, P.A.Todua. Measurements of the parameters of the electron beam of a scanning electron microscopy. – Proceedings of SPIE, 2008, vol. 7042, p. 70420C-1-70420C-12.

14. Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Точность измерения линейных размеров на растровых электронных микроскопах в микро- и нанотехнологиях. – Измерительная техника, 2008, № 6, с. 15–18.

15. Волк Ч.П., Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Калибровка растрового электронного микроскопа по двум координатам с использованием одного аттестованного размера. – Измерительная техника, 2008, № 6, с. 18–20.

16. P.A.Todua, M.N.Filippov, V.P.Gavrilenko, Yu.A.Novikov, A.V.Rakov. Measurement of linear sizes of relief elements in the nanometer range using an atomic force microscopy. – Proceedings of SPIE, 2007, vol. 6648, p. 66480S-1-66480S-12.

17. Yu.A.Novikov, M.N.Filippov, I.D.Lysov, A.V.Rakov, V.A.Sharonov, P.A.Todua. Direct measurement of the linewidth of relief elements of AFM in nanometer range. – Proceedings of SPIE, 2008, vol. 7025, p. 702510-1-702510-10.

18. Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Геометрия формирования изображения в сканирующей зондовой микроскопии. – Микроэлектроника, 2008, т. 37, №6, с. 448–469.

19. Раков А.В., Новиков Ю.А., Тодуа П.А. Калибровка АСМ по трем координатам с использованием одного аттестованного размера. – Измерительная техника, 2008, № 5, с. 13–15.

20. Раков А.В., Тодуа П.А. Измерение линейности сканирования в атомно-силовом микроскопе. – Измерительная техника, 2008, № 6, с. 12–14.

21. Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Прямое измерение ширины линии на атомно-силовом микроскопе. – Измерительная техника, 2008, № 5, с. 10–12.

22. Гавриленко В.П., Лесновский Е.Н., Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А., Филиппов М.Н. Первые российские стандарты в нанотехнологиях. – Известия РАН, сер. физич., 2009, т. 73, № 4, с. 454–462.

23. 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».

24. ГОСТ Р 8.629-2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецидальным профилем элементов. Методика поверки».

25. ГОСТ Р 8.630-2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые измерительные. Методика поверки».

26. ГОСТ Р 8.631-2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы электронные растровые измерительные. Методика поверки».

27. ГОСТ Р 8.635-2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые. Методика калибровки».

28. ГОСТ Р 8.636-2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы электронные растровые. Методика калибровки».

29. ГОСТ Р 8.644-2008 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецидальным профилем элементов. Методика калибровки».

30. ГОСТ Р 8.696-2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Межплоскостные расстояния в кристаллах и распределение интенсивностей в дифракционных картинах. Методика выполнения измерений с помощью электронного дифрактометра».

31. ГОСТ Р 8.697-2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Межплоскостные расстояния в кристаллах. Методика выполнения измерений с помощью просвечивающего электронного микроскопа».

32. ГОСТ Р 8.698-2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Размеры параметры наночастиц и тонких пленок. Методика выполнения измерений с помощью малоуглового рентгеновского дифрактометра».

33. ГОСТ Р 8.700-2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методика измерений эффективной высоты шероховатости поверхности с помощью сканирующего зондового атомно-силового микроскопа».

34. ГОСТ 8.591-2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецидальным профилем элементов. Методика поверки».

35. ГОСТ 8.592-2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния. Требования к геометрическим формам, линейным размерам и выбору материала для изготовления».

36. ГОСТ 8.593-2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые. Методика поверки».

37. ГОСТ 8.594-2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы электронные растровые. Методика поверки».

38. Мир материалов и технологий. Нанотехнологии, метрология, стандартизация и сертификация в терминах и определениях./Под ред. М.В.Ковальчука и П.А.Тодуа. – М.: Техносфера, 2009.