

3. Тодуа П. А. и др. Метрологическое обеспечение измерений длины в микрометровом и нанометровом диапазонах и их внедрение в микроэлектронику и нанотехнологию // Микросистемная техника. 2004. № 1. С. 38—44; № 2. С. 24—39; № 3. С. 25—32.

4. Волк Ч. П., Новиков Ю. А., Раков А. В. Калибровка РЭМ с помощью периодической линейной меры микрометрового и субмикрометрового диапазонов // Измерительная техника. 2000. № 4. С. 48—52; Volk Ch. P., Novikov Yu. A., Rakov A. V. Sem calibration in the micrometer and submicrometer ranges by means of a periodic linear measure // Measurement Techniques. 2000. V. 43. N 4. P. 346—352.

5. Голубев С. С., Голубев С. Н. Метрологические аспекты оценки безопасности наноматериалов // 1-я Междунар. науч. школа «Нано-2009». М., 2009.

6. <http://kcdb.bipm.org/appendixC/search.asp?reset=1&met=L;Country=Germany>

7. Волк Ч. П. и др. Универсальная линейная мера для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии // Электронная промышленность. 2000. № 3. С. 60—64.

Дата принятия 01.09.2010 г.

537.533:620.187:539.25

Нанометрология и особенности метрологического обеспечения измерений параметров шероховатости и рельефа наноструктурированных поверхностей

В. Г. ЛЫСЕНКО, В. В. СОЛОВЬЕВ, П. Н. ЛУСКИНОВИЧ,
С. Ю. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ, К. Л. ГУБСКИЙ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы,
Москва, Россия, e-mail: 203_vm@vniims.ru

Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения измерений параметров шероховатости и рельефа наноструктурированных поверхностей. На основе анализа существующих разработок в области сканирующей зондовой микроскопии дано описание физико-технических характеристик различных средств измерений нанометрового диапазона и показана прослеживаемость их к эталонам единицы длины.

Ключевые слова: нанометрология, сканирующая зондовая микроскопия, разрешение, калибровка.

The problems of metrological assurance for roughness and relief of nanostructured surface measurements are considered. On the base of existing types of scanning probe microscopes analysis the description of physical and technical data of different measuring means for nanometer range and the ways of their binding to the length unit standards are presented.

Key words: nanometrology, scanning probe microscopy, resolution, calibration.

В последнее десятилетие в метрологии активно развивается новое направление — нанометрология. *Нанометрология линейных измерений (dimensional metrology)* — это наука об измерениях в диапазоне 10^{-6} — 10^{-9} м, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Имея в виду это определение, будем в дальнейшем рассматривать только нанометрологию. Нанометрология содержит научные, технические и нормативно-методические основы, которые, в свою очередь, базируются на фундаментальных и прикладных исследованиях измерений длины в диапазоне 10^{-6} — 10^{-9} м.

Сканирующая зондовая микроскопия — техническая основа нанометрологии

Изготовить объекты нанотехнологии можно настолько точно, насколько точно можно их измерить. Поэтому важ-

нейшей технической основой нанотехнологии являются средства измерений (СИ) нанометрового диапазона.

Сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ) нельзя в полной мере признать средствами измерений, скорее они являются средствами визуализации поверхностей. Поэтому возникает задача создания на их базе приборов нового уровня, сочетающих в себе достоинства сканирующих микроскопов и позволяющих проводить точные измерения. Для этого, очевидно, сканирующий микроскоп должен быть оборудован тремя шкалами по трем координатным осям, поэтому необходимо применить три интерферометра в качестве измерителей перемещения зонда по трем координатам x , y , z .

Методы сканирующей зондовой микроскопии — одни из самых распространенных на сегодня видов исследований наногеометрии и локальных свойств поверхности. Благодаря активному развитию этого направления за последние несколько лет эти методы из узкоспециальных, дорогостоящих и доступных только отдельным группам исследовате-

лей превратились в широко распространенные. В настоящее время практически ни одно исследование в области физики поверхности и тонкопленочных покрытий не обходится без методов сканирующей зондовой микроскопии, их роль огромна в развитии технологии создания структур с нанометровыми масштабами.

В сканирующей зондовой микроскопии исследование микрорельефа поверхности происходит при помощи специально изготовленных зондов в виде игл. Рабочая часть таких зондов (острие) имеет размеры порядка 10 нм. Характерное расстояние между зондом и поверхностью в микроскопах колеблется от 0,1 до 10 нм. Различие между методами заключается в физических принципах взаимодействия зонда с поверхностью. Так, работа туннельного микроскопа (СТМ) основывается на наличии так называемого туннельного тока между электропроводным (как правило, металлическим) зондом-иглой и поверхностью образца. Различные типы силового взаимодействия лежат в основе работы силовых микроскопов (атомно-силового, магнитно-силового, электросилового).

Когда зонд приближается к образцу [1—3], между ними начинают действовать силы обменного взаимодействия. В зависимости от того, насколько мало расстояние между зондом и образцом, это будет сила либо притяжения, либо отталкивания. Отсюда и возникают два разных режима сканирования — контактный и бесконтактный.

При контактном режиме, или режиме отталкивания, острие зонда настолько близко подходит к исследуемому образцу, что возникает так называемый физический контакт. При этом сила отталкивания уравнивается силой упругости консоли и капиллярной силой, которая неизбежно возникает, когда измерение проводят на воздухе: зонд «протыкает» тонкий слой влаги, который адсорбируется на образце. Константа упругости консоли в этом режиме должна быть достаточно маленькой, для того чтобы зонд отслеживал профиль поверхности, не разрушая ее.

Рельеф исследуемой поверхности формируется, как правило, в режиме либо постоянной высоты, либо постоянной силы. В первом случае кантилевер передвигается в горизонтальной плоскости, и регистрируется его отклонение в каждой точке. Во втором случае при помощи системы обратных связей постоянным поддерживается отклонение (прогиб) кантилевера, т. е. сила взаимодействия его с образцом. Передвижение образца или кантилевера происходит при помощи пьезоэлектрического манипулятора.

Еще одним способом определения координат точек поверхности является режим прерывистого контакта, или *tapping mode*. Реализация такого метода, например в СЗМ «Нано-Скан-3D» [4], осуществляется путем применения измерительных зондов с высокой жесткостью (около $5 \cdot 10^4$ Н/м), представляющих собой пьезокерамический биморфный резонатор в форме камертона. В качестве сканирующих игл применяются трехгранные алмазные пирамиды. Работа зонда в резонансном режиме позволяет контролировать его контакт с поверхностью по изменению амплитуды и частоты колебаний. Такой режим позволяет не только получить информацию о параметрах шероховатости и рельефа поверхности, но также оценить модуль упругости в различных точках поверхности в процессе сканирования (строить карту модуля упругости) материалов и покрытий, в том числе сверхтвердых. Конструкция зонда позволяет прикладывать к алмазной пирамиде нагрузку до 100 мН, что дает возможность проводить измерения механических параметров нанобъектов контактными методами.

Бесконтактный режим «работает» на вандерваальсовом притяжении, поэтому расстояние между зондом и образцом должно быть не таким маленьким, чтобы отталкивание не играло большую роль, и не таким большим, чтобы это взаимодействие быстро ослабевало с расстоянием. Например, вертикальные отклонения измеряются высокоточными оптическими методами: лазерный луч отражается в зеркале, закрепленном на кантилевере, и регистрируется фотодиодом.

Наглядное трехмерное изображение поверхности получается лишь после соответствующей математической обработки цифровой информации, в качестве которой выступают двумерные массивы целых чисел, например отклонения кантилевера. Существует множество разных алгоритмов обработки, необходимость использования которых зависит от цели экспериментатора и конкретной ситуации. В процессе сканирования появляются различные флуктуационные выбросы, которые надо сглаживать или фильтровать. Приходится также учитывать тепловой дрейф образца или нелинейности пьезокерамического манипулятора. Всю вычислительную работу выполняет компьютер и выдает в качестве результата уже готовое изображение.

От сканирующей зондовой микроскопии — к нанометрологии

Высокое разрешение СЗМ позволяет обнаруживать геометрические элементы атомарных размеров. Однако объекты нанотехнологии имеют размеры до единиц, десятков и более микрометров.

Задачей нанометрологии является обеспечение единства измерений (а не разрешения) геометрических параметров нанобъектов. Для измерения геометрических характеристик трехмерного объекта нанотехнологии необходимо наличие ортогональной декартовой системы координат, в которой описывается геометрия нанобъекта, а также СИ его отдельных координат (x , y , z). В качестве механической реализации декартовой системы координат в СЗМ используют пьезоэлементы, осуществляющие перемещение первичного измерительного преобразователя в заданную точку нанобъекта, координаты которой измеряются.

Задача механической реализации ортогональной декартовой системы координат — как можно более точно смоделировать ее элементы: ортогональность, прямолинейность осей, равномерность шкал. Вместе с тем, из теории координатных измерений известно, что механическая реализация декартовой системы координат имеет систематические погрешности — непрямолинейность и неортогональность осей координат, погрешности шкал. Указанные погрешности до начала измерений должны быть выявлены и скомпенсированы с максимально возможной точностью.

В качестве СИ координат x , y , z в СЗМ используют лазерные интерферометры перемещений [5]. Таким образом, средством измерений координат нанобъектов являются технические устройства, состоящие из регистратора — щуповой системы, основанной на каких-либо физических принципах, обеспечивающих высокое разрешение, механической реализации декартовой системы координат и СИ координат перемещения регистратора.

В качестве измерителя координат x , y , z целесообразно использовать гетеродинный двухчастотный лазерный интерферометр перемещений Майкельсона.

Такой СЗМ, имеющий в качестве измерителя координат x , y , z лазерные интерферометры, называется метрологическим. Примером такого метрологического СЗМ является АСМ «НаноСкан-3D», разработанный в рамках проекта «Создание метрологического комплекса и нормативно-методической базы для измерения геометрических параметров шероховатости и рельефа в нанометровом диапазоне».

В интерферометре Майкельсона для двух интерферирующих пучков $E_{1,2} = a_{1,2} \exp \{-i(\omega_{1,2}t + 4\pi x_{1,2}/\lambda)\}$ согласно принципу интерферометрии распределение интенсивности в результирующей интерференционной картине определяется выражением

$$I = (E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^* = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos[4\pi(x_2 - x_1)/\lambda - (\omega_2 - \omega_1)t],$$

где $a_{1,2}$, $\omega_{1,2}$, λ — амплитуды, угловые частоты и длина волн интерферирующих пучков; $(x_2 - x_1)$ — разность хода волновых фронтов.

При $a_1^2 + a_2^2 = A_0$, $2a_1a_2 = A$, $x_2 = x_0 \pm \int_0^t v(t)dt$, где $v(t)$ — скорость перемещения отражателя; x_0 — начальная координата перемещения.

Выходной сигнал фотоприемника

$$u(t) = A_0 + A \cos \left[4\pi(x_0 - x_1)/\lambda \pm (4\pi/\lambda) \int_0^t v(t)dt - (\omega_2 - \omega_1)t \right].$$

Здесь A_0 — постоянная составляющая или интерференционный фон. Если полоса пропускания гетеродинного интерферометра не охватывает низких частот, а начало отсчета перемещений $x_0 = x_1$, то

$$u(t) = A \cos[(\omega_2 - \omega_1)t \pm (4\pi/\lambda)L], \quad (1)$$

где $L = \int_0^t v(t)dt$.

В формуле (1) пространственная фаза гармонического сигнала на несущей частоте $\omega_2 - \omega_1$ зависит только от перемещения $(4\pi/\lambda)L$. Это фазовый метод, сводящий проблему измерения перемещений к цифровой фазометрии; при перемещении $L = \lambda/2$ фаза $4\pi L/\lambda$ изменяется на 2π , т. е. на 360° . При разрешении фазометра порядка $0,6^\circ$ можно измерять перемещения с дискретностью $\Delta L < \lambda/2000$ и менее, что соответствует атомарному разрешению.

Ограничения на точность интерференционных измерений длины связаны с нестабильностью частоты лазеров и возможностью отсчета доли интерференционной полосы. Но существуют и другие ограничения на предельно измеримое смещение. Из соотношения неопределенностей для координаты и импульса можно найти квантовое ограничение на такое смещение

$$\Delta L \geq (\hbar \tau / m)^{1/2},$$

где $\hbar$ — постоянная Планка; τ — время перемещения тела; m — его масса. При массе зеркала интерферометра 100 г и $\tau = 1$ мс получим $\Delta L \geq 10^{-18}$ м.

Следовательно, гетеродинная интерферометрия может быть использована в СИ нанометрового диапазона.

Итак, средства измерений в нанометрологии обладают сверхвысоким разрешением, основанным на принципах туннельной и атомно-силовой микроскопии. Для измерения перемещений в нанометровом и микрометровом диапазонах могут быть использованы гетеродинные лазерные интерферометры, обеспечивающие точность, сопоставимую с точностью первичного эталона. Вместе с тем, измерение координат трехмерных геометрических нанообъектов требует наличия декартовой системы координат, точность механической реализации которой существенно зависит от ее систематических погрешностей. В дополнение к этому точность измерений геометрических параметров наноструктур зависит от внешних условий, физических свойств и других влияющих факторов, которые требуют дополнительного анализа. Таким образом, суммарная точность пространственных измерений двух- и трехмерных наноструктур и субшероховатости существенно зависит от точности механической реализации декартовой системы координат и других источников погрешностей и может значительно отличаться от разрешающей способности СЗМ.

Метрологическое обеспечение нанотехнологии и наноиндустрии

В настоящее время недостаточно качественной, визуальной информации о технологических процессах и научных исследованиях в нанометровом диапазоне. Необходима их количественная оценка, позволяющая обеспечить получение с требуемой точностью измерительной информации о заданных эксплуатационных показателях или результатах измерений и контроля параметров нанообъектов. Суперпрецизионные измерения — это неотъемлемая процедура современных нанотехнологии и наноиндустрии. Произвести качественную продукцию нанотехнологии можно с такой точностью, с какой ее можно измерить.

Номенклатура показателей, используемых для достоверной и точной измерительной информации нанотехнологии и наноиндустрии, включает понятия точности, воспроизводимости и разрешающей способности. Вместе с тем, показателем точности измерений является основная погрешность, т. е. погрешность СИ нанометрового диапазона, определяемая в нормальных условиях его применения. Наряду с этим внедряется, в том числе и в область нанометрологии, понятие неопределенности измерений.

Разрешающая способность атомно-силового микроскопа (АСМ). При сканировании влияние сейсмических шумов в достаточной степени исключается использованием простейших антисейсмических фильтров, например, демпфирующей каучуковой прокладки под гранитным основанием, на котором устанавливается прибор. Разрешающая способность АСМ по нормали (в направлении z) ограничена другими шумами: пьезоманипулятора, кантилевера и электронного блока (предусилителя), цепи обратной связи и вы-

соковольтных усилителей, задающих сигналы на электродах пьезоманипулятора.

Критерием разрешающей способности по нормали может служить минимальное изменение z-координаты зонда при сканировании, детектируемое на уровне шумов. Последний существенно зависит от параметров сканирования (скорости, параметров пропорционального и интегрального звеньев цепи обратной связи, размера кадра), а также от вязкоупругих свойств исследуемого образца. Обычно предел разрешения по нормали составляет единицы и десятки единиц нанометров.

Процедура определения разрешающей способности в латеральном направлении не устоялась. Например, согласно [3] разрешение в латеральном направлении АСМ определяется как

$$d \approx 3 \left(2R / A \Psi^{1/2} \right)^{1/2} \sqrt{8(R+r) \Delta z},$$

где $A = 1,025^{-1} \text{ эВ}^{1/2}$; Ψ — высота потенциального барьера.

Согласно [1] представляется возможным определить ее следующим образом. Пусть зондирующее острие характеризуется радиусом кривизны R , а разрешаемые особенности поверхности — радиусом r . Тогда возможность латерального разрешения поверхностных особенностей будет связана с пределом разрешения по нормали Δz : критерием разрешения является условие возможности детектирования разницы в значениях вертикальной координаты зонда над объектами и между ними. Геометрический анализ позволяет получить соотношение для минимального расстояния между разрешаемыми поверхностными особенностями, при котором «провал» между ними на АСМ-изображении еще может быть детектирован (т. е. когда он равен Δz):

$$d = \sqrt{8(R+r) \Delta z}, \quad (2)$$

где d — искомый латеральный предел разрешения; R , r — радиусы кривизны зонда и разрешаемых объектов; Δz — предел разрешения по нормали.

Поскольку достижимое пространственное разрешение должно быть инвариантной характеристикой прибора (не зависящей от объекта исследования), то его следует определить, рассмотрев условие детектирования двухточечных объектов ($r = 0$). Тогда соотношение (2) примет вид

$$d = \sqrt{8R \Delta z},$$

связав предел разрешения в латеральном направлении d с пределом разрешения по нормали Δz и радиусом кривизны зондирующего острия R .

Отметим, что введенная процедура определения латерального пространственного разрешения упрощена и не учитывает, например, влияния зонда на структуру объекта (из-за контактных деформаций). Введенная процедура, по-видимому, неприменима при определении разрешающей способности в исследованиях атомной (молекулярной) структуры поверхности.

Возможность достижения атомного (молекулярного) разрешения при помощи АСМ. В [1, 4, 6] отмечается, что согласно модели Герца соотношение $a = (FDR')^{1/3}$, где $D = 3[(1 - \sigma^2)/E + (1 - \sigma'^2)/E']/4$; E , E' — модули Юнга образца и зонда, соответственно; σ , σ' — коэффициенты Пуассона об-

разца и зонда, соответственно, которое определяет латеральный размер области контакта зонда и образца при сканировании плоской подложки зондом с радиусом кривизны острия R' (при нагружающей силе F), должно, на первый взгляд, рассматриваться как фундаментальный предел достижимого латерального разрешения АСМ при измерении топографии поверхности.

Рассчитанная по формуле при типичных условиях АСМ-эксперимента оценка $a \approx 1 \text{ нм}$ означает, что площадь области контакта πa^2 имеет значение $S \approx 3 \text{ нм}^2$. Например, если сравнить эту оценку с типичным размером площади, приходящейся на одну молекулу в плотноупакованном слое ($0,2 \text{ нм}^2$), то очевидно, что при сканировании в каждый момент времени имеется контакт зонда не с одной, а с десятком и более молекул. Согласно [4] размер контактной площадки πa^2 будет равен $0,2 \text{ нм}^2$ (контакт с единственным атомом при расстоянии между атомами порядка $0,5 \text{ нм}$) при радиусе кривизны зонда 10 нм и достаточно жестком образце (модуль Юнга 10^{11} Па) лишь при минимизации силы воздействия зонда при сканировании до значения $0,1 \text{ нН}$, что требует специальных экспериментальных условий (исследования в жидких средах или в вакууме).

Бюджет неопределенности измерений СЗМ. Рассмотрим возможные факторы, влияющие на точность микроскопов. Многие факторы не могут быть проконтролированы однозначно. Для них можно определить теоретические значения отклонений по аппроксимационной модели или экспериментально при разработке микроскопа каким-либо косвенным способом. Источниками неопределенности измерений являются:

механические и акустические вибрации (неопределенность типа А) — один из самых значительных факторов, ограничивающих разрешение. Для уменьшения влияния механических вибраций применяют специальные пружинные подвесы, а головку микроскопа устанавливают на тяжелую плиту. Для снижения акустических вибраций необходимо поместить СТМ в вакуумную камеру;

внешние электромагнитные наводки и наводки сети питания (неопределенность типа А). Как правило, наибольшее влияние в этом случае оказывает электромагнитное излучение монитора компьютера. Здесь помогает экранирование микроскопа;

нестабильность поддержания туннельного зазора неизменным (неопределенность типа А). Она зависит от параметров электронных схем микроскопа;

несоответствие острия зонда требуемым параметрам (неопределенность типа А). Под такими параметрами подразумеваются: «одноострийность» зонда, минимальный радиус закругления (если есть смысл говорить об острие как о теле вращения), достаточная длина (около 100 А). Качество острия зонда проконтролировать крайне сложно, тем более сложно добиться его идеальности;

неперпендикулярность зонда (острия) поверхности образца;

неперпендикулярность осей x и y при сканировании; температурный дрейф сканера (неопределенность типа А). Его можно минимизировать, поместив сканирующую установку в термостат;

перемещение зонда вследствие конструкции сканера не по прямой, параллельной поверхности образца, а по дуге окружности (неопределенность типа В);

несоответствие площади сканирования, заданной оператором, площади, реально просканированной, из-за отклонения длины (зонд плюс сканер) от расчетной (неопределенность типа А). Уменьшить влияние этого фактора можно, если контролировать длину зонда перед сканированием;

влияние адсорбата на поверхности образца (неопределенность типа А). Имеется в виду, что на воздухе каждый предмет покрыт тонким слоем воды (примерно 2 нм) и другими загрязнениями, которые в значительной степени ограничивают разрешающую способность воздушных СТМ. Влияние этой составляющей неопределенности можно значительно уменьшить, поместив СТМ в вакуум;

примесные включения образца (неопределенность типа А). Так как различные материалы имеют разные электрические свойства, то даже при сканировании атомарно-гладкой поверхности, где есть атомы различных элементов, на изображении будут видны отклонения от идеальной плоскости. Избежать влияния этой погрешности невозможно, хотя это влияние и очень мало;

«недооценивание» объектов типа «ступенька». Влияния этой составляющей неопределенности также невозможно избежать, хотя и оно очень мало.

Комплекс мер для калибровки средств измерений шероховатости и рельефа в нанометровом диапазоне

Существующие стандартные образцы для калибровки метрологического комплекса. Метрологический комплекс обеспечен следующими стандартными образцами (мерами):

1. Мера РА01 для калибровки пространственной разрешающей способности зонда изготовлена на основе пористого алюминия. Расстояние между порами приблизительно 5 нм, радиус пиков на поверхности 2 нм, поперечные размеры 5×5 мм, толщина подложки 0,5 мм.

2. Мера TGX01 для калибровки формы зонда и нелинейности манипулятора изготовлена с острыми краями. Радиус закругления краев менее 5 нм. Данная мера используется при измерении профиля зонда АСМ.

3. Меры TGZ для калибровки по высоте изготовлены в виде прямоугольных полосок из SiO₂ на поверхности Si.

4. Мера TGG01 для калибровки угловой дисторсии и нелинейности сканера по вертикали изготовлена в виде треугольных структур, угол которых определяется кристаллографическими осями материала подложки.

Комплексная мера геометрических параметров поверхности для калибровки СИ нанометрового диапазона. На основе анализа существующих мер была создана комплексная мера, на поверхности которой размещены:

меры различной толщины МРТ 1, 2, 3, 4, 5 (формируются непосредственно на поверхности кремниевой пластины);

мера РА01 для калибровки пространственной разрешающей способности зонда;

меры TGX01, TGX11 для калибровки формы зонда и нелинейности манипулятора;

мера TGG01 для калибровки угловой дисторсии и нелинейности сканера по вертикали;

меры TGZ01, TGZ02, TGZ03, TGZ04, TGZ11 для калибровки по высоте.

Динамическая мера для калибровки средств измерений нанометрового диапазона, применяемых в нанотехнологиях. Динамическая мера, разработанная в рамках проекта «Создание метрологического комплекса и нормативно-методической базы для измерений геометрических

параметров шероховатости и рельефа в нанометровом диапазоне», служит для обеспечения единства измерений в нанотехнологиях с субнанометровой погрешностью во всем нанометровом диапазоне 1—100 нм, изготовлена из монокристаллического материала (ниобата лития) с уменьшенным гистерезисом. Мера имеет дистанционно перестраиваемые размеры, контролируемые в реальном масштабе времени (в процессе калибровки) встроенным лазерным интерферометром.

Алгоритмическое программное обеспечение СЗМ для измерения параметров шероховатости и рельефа поверхности

При помощи СЗМ определяют геометрические координаты точек, принадлежащих исследуемой поверхности. Далее проводится математическая обработка полученной информации в соответствии с программным обеспечением (ПО), в котором заложены определенные алгоритмы обработки измерительной информации и вычисления параметров шероховатости и рельефа поверхности. Согласно действующим правилам и нормам ПО СИ должно проходить аттестацию с использованием регламентированных методов и средств. Одним из таких методов является метод «черного ящика», суть которого состоит в том, что на вход аттестуемого ПО подается известная математическая модель, а погрешность определяется по расхождению рассчитанных и измеренных при помощи ПО параметров шероховатости и рельефа поверхности.

Проведенные исследования показали, что прослеживаемость к эталону единицы длины в нанометровом диапазоне может быть достигнута путем выполнения калибровки СИ в этом диапазоне согласно калибровочной (иерархической) схеме, во главе которой стоит исходное по точности СИ — государственный эталон единицы длины. Размер единицы длины в нанометровой области измерений передается от специального эталона эталонам первого разряда и далее рабочим СИ.

Литература

1. Галлямов М. О., Яминский И. В. Сканирующая зондовая микроскопия: основные принципы, анализ искажающих факторов [электрон. ресурс]. http://www.spm.genebee.msu.ru/members/gallyamov/gal_yam/gal_yam1.htm (дата обращения 01.07.2010).
2. Исаакян В. А. Микроскопия вчера, сегодня, завтра [электрон. ресурс]. <http://www.keral.ru> (дата обращения 01.07.2010).
3. Whitehouse D. J. Handbook of surface metrology. England: RTH, University of Warwick.
4. Гоголинский К. В. и др. Разработка метрологического комплекса для обеспечения единства измерений свойств поверхности в нанометровом диапазоне на базе сканирующего зондового микроскопа «НаноСкан-3D» // Законодательная и прикладная метрология. 2010. № 1 (107). С. 33—34.
5. Пат. 96429 РФ / К. Г. Гоголинский и др. Сканирующий зондовый микроскоп, совмещенный с оптической системой линейных измерений // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 21.
6. Meine K. Correlation of Friction and Roughness // X Intern. Colloq. on surfaces. Chemnitz (Germany), 2000.

Дата принятия 01.09.2010 г.