

НАНОТЕХНОЛОГИИ.

НАНОМЕТРОЛОГИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ*

Нанотехнологии в своем развитии поставили ряд задач, обусловленных малыми размерами элементов и структур. Именно в нанотехнологии актуален тезис: "Если нельзя правильно измерить, то невозможно создать". Все страны, вступившие в нанотехнологический прорыв, прекрасно представляют необходимость опережающего развития метрологии в этой области, ибо уровень точности и достоверности измерений способен либо стимулировать ее развитие, либо быть сдерживающим фактором.

В нанотехнологиях приборно-аналитическая и технологическая составляющие работают на пределе возможностей, что увеличивает вероятность ошибки, особенно связанной с человеческим фактором.

В этой связи одной из первоочередных задач становится стандартизация параметров и свойств материалов, объектов, элементов и структур нанотехнологий. При междисциплинарном характере нанотехнологий решение этой задачи несет в себе объединяющее начало. К ней вплотную примыкает необходимость стандартизации терминов и определений, направленной на решение проблем общения и взаимопонимания не только внутри одной страны, но и в рамках обмена информацией между странами. Отсюда закономерное следствие – необходимость аттестованных и стандартизованных методик измерений, калибровки и поверки средств измерений, применяемых в нанотехнологиях, и многое другое, что определяется потребностями развития инфраструктуры наноиндустрии.

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

"Наибольший статистический вес" приходится на метрологию, поскольку именно она является количественным базисом стандартизации и сертификации. Специфика нанотех-

нологий привела к развитию нового направления – нанометрологии, с которой связаны теоретические и практические аспекты метрологического обеспечения единства измерений. Из определения нанотехнологии следует первоочередность измерений геометрических параметров объекта, что обуславливает необходимость обеспечения единства линейных измерений в нанометровом диапазоне. Нанометрология присутствует в неявном виде в подавляющем большинстве методов и средств обеспечения единства измерений физико-химических параметров и свойств объектов нанотехнологий, причем часто необходимо прецизионное позиционирование зонда измерительного устройства в место требуемого съема информации. Диапазон линейного сканирования по каждой координате может простираться от единиц нанометра до сотен и более микрометров, а требуемая точность выставления координаты составлять десятые доли нанометра.

Столь большое внимание в нанометрологии уделяют проблеме реализации линейной шкалы в нанометровом и прилегающем к нему диапазонах по следующим причинам:

- обеспечение единства измерений геометрических параметров нанообъекта опирается на метрологию линейных измерений;
- измерения механических, электрических, магнитных, оптических и других свойств объектов нанотехнологии связаны с необходимостью позиционирования зонда измерительного устройства в заданное место с наивысшей точностью [1].

Обеспечение единства измерений физико-химических параметров и свойств объекта требует привязки средства из-

*Полностью материал опубликован в книге Дж.М.Мартинез-Дуарт, Р.Дж.Мартин-Пальма, Ф.Агульеро-Рюэда. "Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники". – М.: Техносфера, 2009.

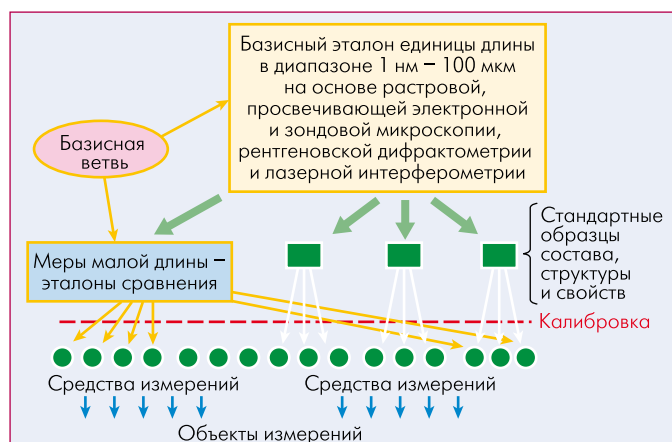


Рис.1 Ближайшая перспектива широкомасштабной схемы метрологического и стандартизационного обеспечения нанотехнологий

мерений к эталону, воспроизводящему единицу данной физической величины (например, проводимости – к эталонному сопротивлению), а в нанотехнологиях в большинстве случаев – еще и к базисному эталону единицы длины (рис.1). Этим не ограничивается уникальность базисного эталона. Видно, что диапазон измерений длины от единиц нанометров до сотен микрометров перекрывает более пяти порядков значений измеряемой величины при точности во всем диапазоне в десятые единицы нанометра.

Спектр объектов nanoиндустрии простирается от ультрадисперсных сред до наноструктурированных многослойных материалов и кристаллов, включая квантоворазмерные структуры с размерностями локализации: один – “квантовые ямы”, два – квантовые проволоки или нити, три – квантовые точки. Особенности физических эффектов и протекающих процессов определяются характерным размером, причем в одном и том же материале различные эффекты, связанные с размером, проявляются по-разному.

Большинство методов исследований нанообъектов – просвечивающая, растровая электронная, сканирующая зондовая, ионно-полевая микроскопии, фотоэмиссионная и рентгеновская спектрометрия и рентгеновская дифрактометрия – требуют калибровки средств измерений по стандартным образцам состава, структуры, свойств с известными геометрическими характеристиками. Один из способов определения размеров ультрадисперсных частиц заключается в изучении рассеяния света на них, зависящего от соотношения размеров частиц, длины волны падающего излучения и поляризации. Для этого, как правило, используется лазерное излучение, но для калибровки такого средства измерений необходим набор ультрадисперсных частиц с дискретным рядом точно заданных размеров.

При контроле процессов создания многослойных тонкопленочных структур, в том числе гетероструктур, необходимо привлечение рентгенодиагностических методов контроля скрытых слоев и, соответственно, наличие для калибровки многослойных стандартных образцов состава и структуры.

Прямые измерения физико-химических параметров веществ и материалов нанотехнологии, элементов и устройств нанотехники требуют понимания закономерностей взаимодействия зонда измерительного средства с объектом. Особую важность приобретают вопросы стандартизации таких измерений, метрологического обеспечения, передачи размера единицы физической величины в нанометровый диапазон [2].

Первостепенной задачей опережающего развития нанометрологии специалисты считают необходимость реализации нанометры в нанометровом и прилегающем к нему диапазонах. Достижение предельных возможностей при измерениях длины в нанометровом диапазоне связано с использованием высокоразрешающих методов растровой электронной и сканирующей зондовой микроскопии (РЭМ и СЗМ) в сочетании с лазерной интерферометрией и рентгеновской дифрактометрией при сохранении абсолютной привязки к первичному эталону метра.

В России концептуально решена задача создания основ метрологического обеспечения измерений длины в диапазоне 1–1000 нм. Разработаны методология обеспечения единства измерений в этом диапазоне длин, основанная на вышеперечисленных принципах; эталонный комплекс средств измерений, обеспечивающий воспроизведение и передачу размера единицы длины вещественным мерам длины в указанном диапазоне с погрешностью 0,5 нм; поколение мер малой длины для калибровки средств измерений в исследуемом диапазоне, в том числе меры нанорельефа поверхности; методология и алгоритмы измерения параметров профиля элементов микро- и наноструктур и пакет компьютерных программ для автоматизации измерений.

Важнейшим этапом в решении задач метрологического обеспечения линейных измерений в нанометровом диапазоне явилось создание вещественных носителей размера – мер с программируемым нанорельефом поверхности, обеспечивающих калибровку средств измерений с наивысшей точностью (рис.2, 3, 4).

Именно такие трехмерные меры малой длины, или эталоны сравнения, – материальные носители размера, позволяющие осуществлять комплексную калибровку и контроль основных параметров РЭМ и СЗМ, предназначены для их перевода из разряда устройств для визуализации исследуе-

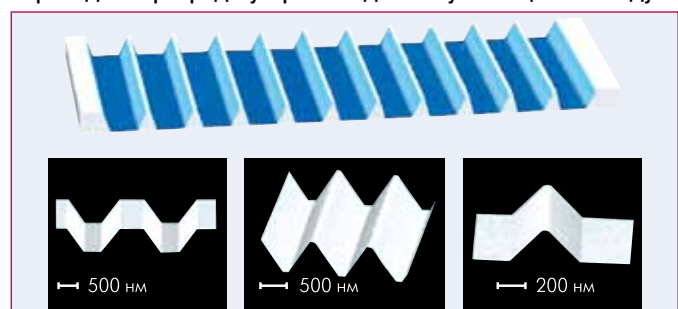
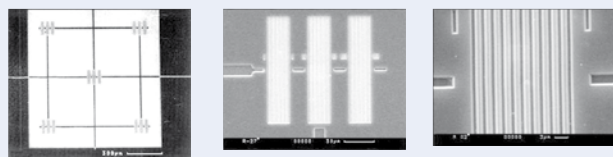


Рис.2 Изображение эталона сравнения в атомно-силовом микроскопе

Метод аттестации – интерферометрический



Общий вид в РЭМ при разных увеличениях

Номинальные размеры	Погрешность аттестации
Шаг2000 нм	±1 нм
Ширина линии10–1500 нм	±1 нм
Высота (глубина)100–1500 нм	±1%

Рис.3 Эталон сравнения – линейная мера. Носитель размера – длина волны He-Ne лазера

мого объекта в разряд приборов для измерений линейных размеров объектов исследования, обеспечивающих привязку измеряемых величин в нанометровой области к первичному эталону единицы длины – метру [3–6].

Аттестация эталонов сравнения осуществляется с использованием трехмерной интерферометрической системы измерений наноперемещений.

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 линий в диапазоне 10–1500 нм и высотой рельефа 100–1500 нм.

Мера позволяет по одному ее изображению в РЭМ (даже по одному сигналу) выполнить калибровку микроскопа (рис.5), определить его увеличение, линейность шкал и диаметр электронного зонда [7–10]. На рис.5 (слева вверху) приведены характерные параметры эталонной меры, в центральной части – параметры видеосигнала, в правой части – реальное РЭМ изображение.

При необходимости можно контролировать параметры РЭМ непосредственно в процессе измерений размеров исследуемого объекта, что является дополнительной гарантией их высокого качества. Мера позволяет легко автоматизировать линейные измерения и создавать на основе РЭМ автоматизированные измерительные комплексы. В частности, в НИЦПВ создан такой комплекс на основе РЭМ JSM-6460LV для линейных измерений в области размеров от 1 нм до 100 мкм.

Аналогичным образом по заданным параметрам меры проводятся калибровка и контроль [11–15] таких характеристик атомно-силовых микроскопов (АСМ), как цена деления и линейности шкал по всем трем координатам, ортогональность систем сканирования, радиус острия зонда (кантилевера), настройка параметров и выход 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, 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 аттестовываются, 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 и идеальное средство для осуществления таких операций. Непреложно одно: культура измерений требует, чтобы любой РЭМ или СЗМ был укомплектован мерами, обеспечивающими калибровку и контроль их параметров. Только тогда производимые измерения могут претендовать на достоверность.

Использование методов и средств калибровки и аттестации даст возможность производителям РЭМ и СЗМ создавать новые приборы с лучшими характеристиками, которые, в свою очередь, позволят продвижение на пути развития нанотехнологий.

Для обеспечения нормативной базы нанометрологии разработаны и внедрены семь российских стандартов [15].

Для единства измерений в нанотехнологиях необходимо осуществить ряд научно-методических, технических и организационных мероприятий. В первую очередь это касается создания исключаяющей многоступенчатость (см. рис.1) новой структурной схемы передачи размера единиц физических величин от первичных эталонов рабочим средствам измерений. В этот комплекс мероприятий входят также: исследования механизмов взаимодействия зондов измерительных систем с объектом измерения; новые алгоритмы измерений и соответствующее им математическое обеспечение, учитывающее влияние взаимодействия средства измерений с измеряемым объектом; создание новых мер – материальных носителей размера, обладающих свойствами, аналогичными свойствам вторичного эталона и измеряемого объекта; создание стандартных образцов состава, структуры и рельефа поверхности и стандартизованных методик измерений, обеспечивающих прослеживаемость передачи размера единицы физической

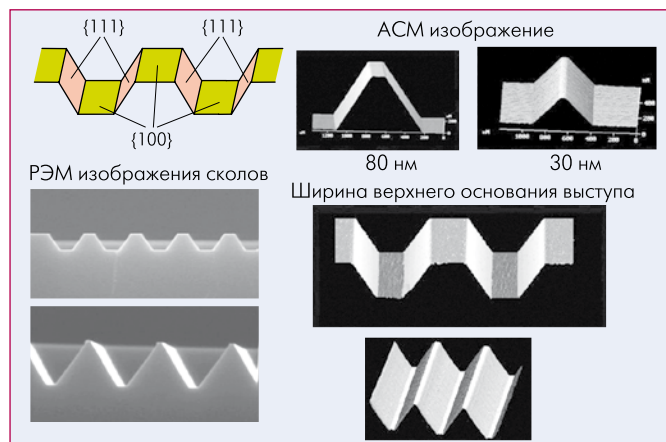


Рис.4 Профиль эталона сравнения

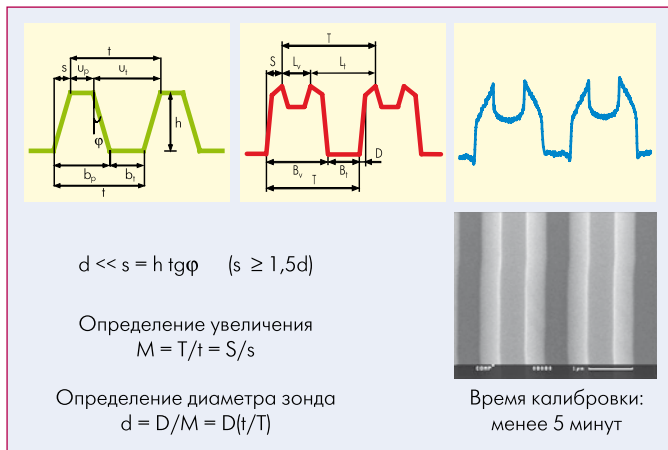


Рис.5 Эталон сравнения. Калибровка РЭМ по первому изображению

величины от эталона рабочим средствам измерений для их аттестации, калибровки и поверки в нанометровый диапазон без существенной потери точности.

Достижение данной цели вполне реально, поскольку фундамент решения указанной проблемы основан на концепции базисного эталона (см. рис.1), в котором реализована наношкала. Этот эталон – основа для передачи единиц физических величин в нанометровый диапазон. Дело за немногим – необходима гармонизированная система стандартных образцов состава, структуры и свойств, служащих потребностям нанотехнологий. Все это создает предпосылки и закладывает основы ускоренного развития нанотехнологии в России.

По вопросам приобретения эталонов сравнения – метрологически аттестованных мер для калибровки РЭМ и АСМ в нанометровом диапазоне обращаться:

119421, Россия, Москва, ул. Новаторов, дом 40, корп. 1, НИЦПВ
Тел.: (+7) 495-935-9777, Тел./факс: (+7) 495-935-5911
E-mail: fgupnicpv@mail.ru, www.nicpv.ru

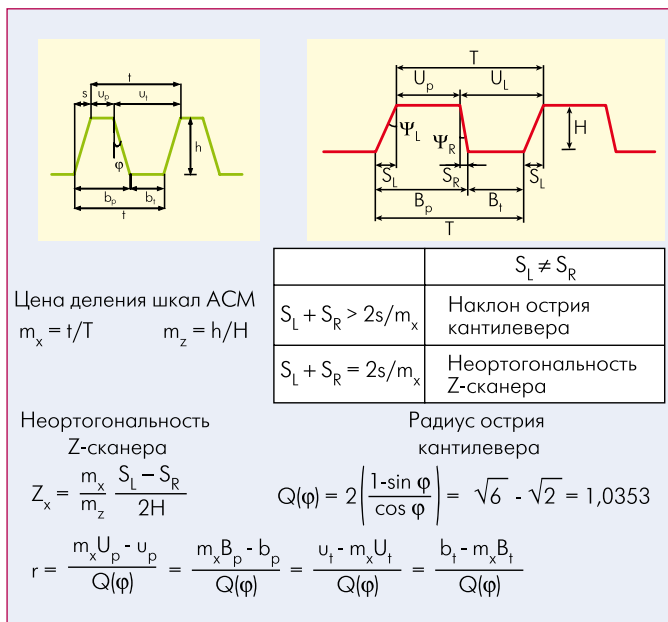


Рис.6 Эталон сравнения. Калибровка АСМ по 1 изображению

ЛИТЕРАТУРА

1. Гавриленко В., Новиков Ю., Озерин Ю., Раков А., Тодуа П. Российский прототип международного тест-объекта нано-рельефа для РЭМ и АСМ. – Наноиндустрия, 2008, №6, с. 22–26.
2. Тодуа П.А., Быков В.А., Волк Ч.П., Горнев Е.С., Желкобаев Ж., Зыкин Л.М., Ишанов А.Б., Календин В.В., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., Прохоров А.М., Раков А.В., Саунин С.А., Черняков В.Н. 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.
3. Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. Metrology in linear measurements of nanoobject elements. – Proceedings of SPIE, 2006, vol.6260, p.626013-1–626013-8.
4. Novikov Yu.A., Gavrilenko V.P., Ozerin Yu.V., Rakov A.V., Todua P.A. Silicon test object of linewidth of nanometer range for SEM and AFM. – Proceedings of SPIE, 2007, vol. 6648, p. 66480R-1–66480R-11.
5. Todua P.A., Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V. Check of the quality of fabrication of test objects with a trapezoidal profile. – Proceedings of SPIE, 2008, vol.7042, p. 704209-1–704209-8.
6. Данилова М.А., Митохляев 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.
7. Gavrilenko V.P., Filippov M.N., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. 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.
8. Novikov Yu.A., Darznek S.A., Filippov M.N., Mityukhlyayev V.B., Rakov A.V., Todua P.A. Nanorelief elements in reference measures for scanning electron microscopy. – Proceedings of SPIE, 2008, vol. 7025, p. 702511-1–702511-10.
9. Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. Measurements of the parameters of the electron beam of a scanning electron microscopy. – Proceedings of SPIE, 2008, vol.7042, p.70420C-1–70420C-12.
10. 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.
11. Todua P.A., Filippov M.N., Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V. 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.
12. 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 elements of AFM in nanometer range. – Proceedings of SPIE, 2008, vol. 7025, p. 702510-1–702510-10.
13. Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Геометрия формирования изображения в сканирующей зондовой микроскопии. – Микроэлектроника, 2008, т. 37, №6, с. 448–469.
14. Раков А.В., Тодуа П.А. Измерение линейности сканирования в атомно-силовом микроскопе. – Измерительная техника, 2008, № 6, с. 12–14.
15. Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Прямое измерение ширины линии на атомно-силовом микроскопе. – Измерительная техника, 2008, № 5, с. 10–12.
16. 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.