

ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В НАНОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

М.Ю. Рачков

В статье на примерах измерений линейных параметров нанообъектов, а также их массы и температуры показаны возможности реализации современных методов измерения в нанодиапазонах и дан анализ существующих ограничений в этой области. Рассматриваются интерференционные методы для измерения малых перемещений, в частности, при невозможности прямого определения перемещений исследуемой точки объекта. Приводятся примеры микрокантилеверных датчиков для измерения параметров вещества и способ улучшения разрешения прибора путем использования безапертурной микроскопии ближнего поля. Показан метод определения механических свойств в наномасштабах с помощью динамического индентирования.

Ключевые слова: нанотехнология, измерение, метрология, эталон, мера, микроскопия, кантилевер, интерферометрия.

Введение

В Концепции развития в РФ работ в области нанотехнологий под наносистемной техникой понимаются полностью или частично созданные на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченные системы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от характеристик систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям. Страны, развивающие нанотехнологии, хорошо представляют себе необходимость опережающего развития метрологии в этой новой области [1]. Уровень точности и достоверности измерений способен стимулировать развитие соответствующих отраслей экономики или сдерживать его.

Междисциплинарный характер нанотехнологий инициировал создание в 2005 г. Технического комитета ИСО/ТК229 «Нанотехнологии» в рамках Международной организации по стандартизации (ИСО). Годом позже в Международной электротехнической комиссии был образован Технический комитет МЭК/ТК113 «Стандартизация в области нанотехнологий для электрических и электронных изделий и систем». Российская сторона представлена в этих комитетах национальным Техническим комитетом ТК441 «Нанотехнологии». В части единства измерений наиболее востребованы измерения линейных параметров. Это связано с тем, что из самого определения на-

нотехнологий, имеющих дело с объектами нанометровой протяженности, естественным образом вытекает первоочередная задача измерений геометрических параметров объекта, что, в свою очередь, обуславливает необходимость обеспечения единства линейных измерений в нанометровом диапазоне. В неявном виде нанометрология линейных измерений присутствует также в большинстве методов и средств обеспечения единства измерений параметров и характеристик объектов нанотехнологий, в том числе массы и температуры.

Измерение линейных параметров

Важнейшим этапом в решении задач метрологического обеспечения линейных измерений в нанометровом диапазоне является создание материальных носителей размера – мер с программируемым нанорельефом поверхности, которые обеспечат калибровку средств измерений с наивысшей точностью. Именно

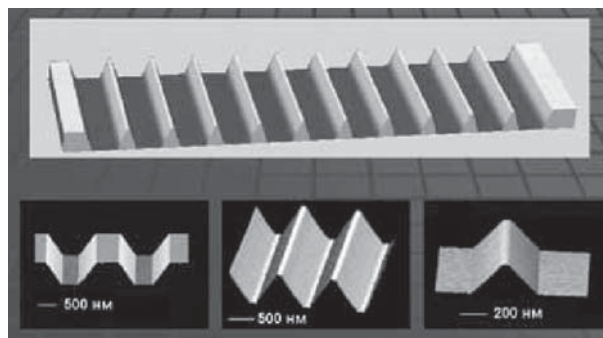


Рис. 1. Рельефные меры малой длины

такие рельефные меры малой длины (рис. 1) – материальные носители размера, позволяют осуществлять комплексную калибровку и контроль основных параметров растровых электронных микроскопов (РЭМ) и сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ) [2, 3].

Трехмерные меры малой длины предназначены для перевода перечисленных сложных устройств из разряда приборов для визуализации исследуемого объекта в средства измерений. Приборы для измерений линейных размеров объектов исследования обеспечивают привязку измеряемых величин к нанометровому диапазону к первичному эталону единицы длины – метру.

Конструктивно мера, получившая название МШПС-2.0К, что расшифровывается как «мера ширины и периода, специальная, номинальный размер 2,0 мкм, кремниевая», сформирована на поверхности монокристаллического кремния. Кремниевый чип с мерой имеет размер 10×10 мм и толщину 500 мкм. Мера состоит из пяти одинаковых модулей, расположенных по четырем углам квадрата размером 1×1 мм и в его центре. Общий вид меры, один из ее модулей и шаговая структура элемента модуля последовательно в различных масштабах показан на рис. 2.

Модуль представляет собой три шаговые рельефные структуры на поверхности кремния, каждая из которых состоит из 11 канавок. Элементы рельефа структуры имеют профиль в форме трапеции с равными боковыми сторонами и заданным углом их наклона. Номинальный размер шага структуры составляет 2 мкм. Глубину рельефа структуры и ширину линии (выступа/канавки) задают при изготовлении меры в зависимости от решаемых задач в диапазоне 100–1500 нм. Длина элементов рельефа

шаговой структуры составляет 100 мкм, а погрешность аттестации 1 нм.

Нанометр может быть вторичным эталоном длины, который привязан к первичному эталону длины. По аналогии с метром для нанометра можно дать следующее определение. Нанометр – это расстояние, которое проходит свет за $1/299\,792\,458\,000\,000\,000$ с. Однако на практике оно не имеет значения вследствие того, что измерять такие малые промежутки времени пока невозможно.

В альтернативном решении для воспроизведения длины в 1 нм можно использовать изменение размеров пьезокерамической пластинки ΔD при приложении к ее электродам электрического напряжения. Изменение размеров прямо пропорционально приложенному напряжению ΔU (обратный пьезоэффект):

$$\Delta D = d_{33} \Delta U,$$

где d_{33} – коэффициент пропорциональности. Чтобы размер пластинки изменился на 1 нм, необходимо подобрать материал и источник напряжения таким образом, чтобы перемножение значения пьезомодуля материала и значения напряжения источника в результате давало точно 1 нм. Например, если взять керамику с пьезоэлектрическим модулем $d_{33} = 200 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н = $200 \cdot 10^{-12}$ м/В и приложить напряжение к электродам в 5 В, то изменение размеров пластинки составит 1 нм.

Изменение длины и ширины пьезопластинки не зависит от ее толщины. Это важно, ибо, создавая эталон длины, не следует думать о длине самого эталона. Для достижения высокой точности необходимо, чтобы прикладываемое напряжение было постоянно по амплитуде и совпадало с направлением поляризации керамики, поскольку известно, что при при-

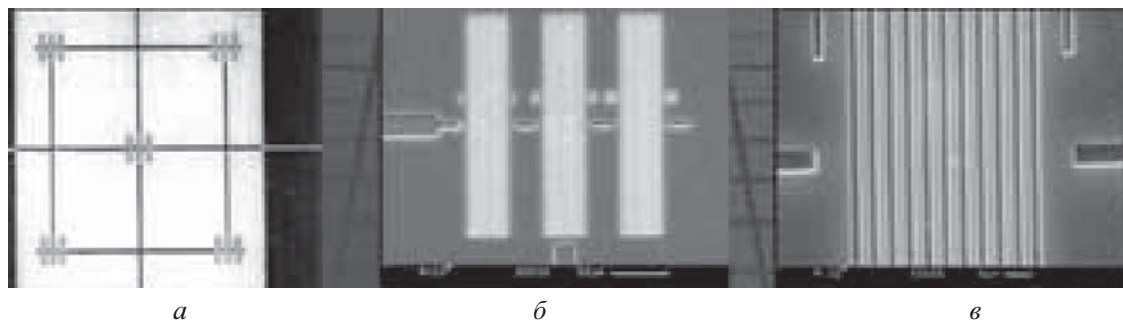


Рис. 2. Мера МШПС-2.0К:

a – мера из пяти модулей, *б* – один модуль меры, *в* – структура элемента модуля

ложении электрического напряжения по поляризации критических изменений пьезосвойств керамики не происходит. Для минимизации погрешности необходимо также поддерживать постоянную частоту прикладываемого электрического напряжения.

Пьезоэлектрический модуль кварца d_{33} составляет около $2 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, что примерно на два порядка меньше пьезоэлектрического модуля пьезокерамики. В связи с этим, прикладывая одинаковое напряжение к кварцевой пластинке и пьезопластинке, величина перемещения первой из них будет соответственно на два порядка меньше величины перемещения второй. Таким образом, сверхмалые перемещения можно обеспечивать с помощью пластинок из кристаллического кварца. К дополнительным достоинствам кварца относятся высокая твердость и низкий коэффициент температурного расширения.

Для измерения малых перемещений могут быть использованы интерференционные методы. При этом необходимо учитывать ряд существенных особенностей, характерных для проведения большинства технических измерений, например, при контроле отсчетных систем прецизионных станков и координатно-измерительных машин. Одна из особенностей состоит в невозможности прямого измерения величины перемещений исследуемой точки объекта. Например, невозможно измерить параметры обрабатываемой на станке детали непосредственно в зоне обработки или величины перемещения рабочей кромки инструмента при резании. Другая особенность заключается в необходимости высокой точности измерений в широком диапазоне перемещений [4].

Учесть указанные особенности позволяет лазерный интерферометр для измерения перемещений (рис. 3). Система светоделителя перемещается вдоль оси оптической системы, в результате чего обеспечивается регулировка чувствительности измерителя в заданных пределах путем изменения расстояния между объектом и светоделителем. Перед началом измерений определяют диапазон возможных значений перемещений. Система светоделителя с закрепленными на нем элементами при помощи механизма перемещения размещается на заданном в соответствии с исследуемым диапазоном изменения перемещений расстоянии R от объекта. Изменение расстояния

между ними приводит к изменению распределения интенсивностей интерференционного поля в плоскости фотоприемного устройства. Для увеличения диапазона измеряемых перемещений расстояние R увеличивается, а для уменьшения диапазона – уменьшается путем изменения положения основания интерферометра.

Оптическая система фокусирует излучение от источника когерентного излучения на поверхности объекта в виде светящейся точки, которая в свою очередь является источником излучения, расположенным на поверхности объекта. Излучение от точки отражения попадает на светоделитель, разделяющий его на два луча. Один луч отражается от поверхности светоделителя, а другой – от поверхности отражателя. Пространственное совмещение этих лучей происходит в области размещения фотоприемного устройства, т.е. в месте наблюдения интерференционной картины. Фотоприемное устройство регистрирует интенсивность оптического поля в заданной области интерференционной картины, а устройство регистрации и обработки определяет величину перемещения объекта по результатам измерения интенсивности оптического поля с учетом установленного расстояния R .

Измерение массы и параметров вещества

Ключевая деталь большинства весов – упругий элемент. В весах для определения массы

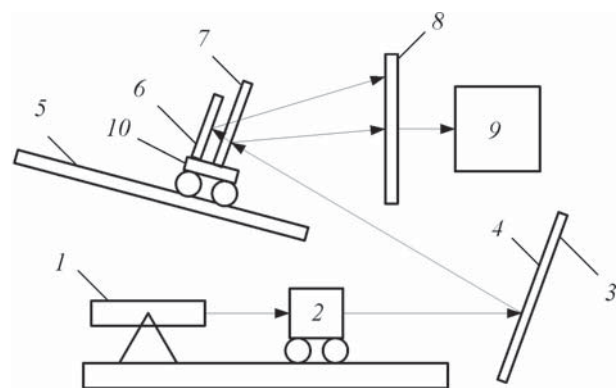


Рис. 3. Схема лазерного интерферометра:

- 1 – источник когерентного излучения, 2 – оптическая система, 3 – объект, 4 – отражающая поверхность объекта, 5 – основание интерферометра, 6 – светоделитель, 7 – отражатель, 8 – фотоприемное устройство, 9 – устройство регистрации и обработки информации, 10 – механизм перемещения

наночастиц размеры такого элемента должны находиться также в нанодиапазоне. В атомных весах с чувствительностью до 10^{-16} г используются кремниевая микроконсоль, которая называется кантилевер, и оптическая система регистрации ее положения [5, 6]. Кантилевер и система регистрации для этого прибора заимствованы из атомно-силового микроскопа (АСМ). В атомных весах подобной конструкции существует ограничение минимальной величины измеряемой массы. Это объясняется тем, что оптическая система регистрации требует, чтобы размеры кантилевера были больше длины источника света – диодного лазера. В реальных экспериментах используют кантилеверы, длина и ширина которых более 5 мкм. Масса такого кантилевера при толщине в 1 мкм – около 10^{-10} г, а минимально достижимая погрешность измерений – на уровне 10^{-16} г.

Для повышения чувствительности весов необходимо использовать кантилеверы нанометрового размера, что требует отказа от использования оптической системы регистрации со свойственным ей дифракционным ограничением. Измерение массы в 10^{-18} г достигнуто с помощью кремниевого кантилевера, на поверхности которого выполнена проводящая золотая дорожка. В тонкой пленке золота наблюдается пьезорезистивный эффект, заключающийся в том, что при изгибе кантилевера изменяется электрическое сопротивление пленки золота. Для достижения высокой чувствительности измерений используют углеродную нанотрубку (УНТ) длиной 254 нм и диаметром 2,09 нм. Масса трубки составляет $2,33 \cdot 10^{-18}$ г. В результате удалось зарегистрировать массу одного атома золота.

Для регистрации положения упругого элемента в измерительную электрическую цепь включены источник тока, УНТ и металлический электрод. Электрод подносят к нанотрубке до появления через зазор тока эмиссии. При колебаниях УНТ изменяется зазор «нанотрубка–электрод», и, соответственно, возникает модуляция тока эмиссии. Зазор начинает излучать радиоволны. Их частота, зарегистрированная радиоприемником, совпадает с частотой колебаний УНТ. При попадании атомов золота на поверхность нанотрубки частота ее колебаний изменяется дискретно. Минимальный размер дискретности соответствует

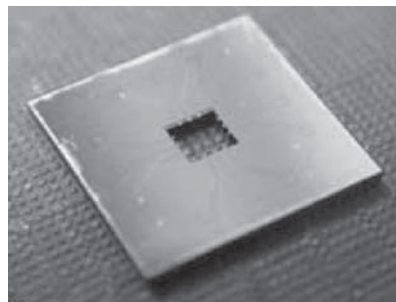


Рис. 4. Система микрокантилеверных датчиков

присоединению одного атома золота.

Массив кантилеверов с пьезоэлектрической системой регистрации приведен на рис. 4.

Система микрокантилеверных датчиков расположена внутри квадратного отверстия. Датчик на определенное вещество должен отличать именно это вещество от всех остальных. Эту задачу решает формирование на поверхности чувствительного элемента датчика рецепторного слоя, который избирательным образом реагирует только на искомое вещество.

В настоящее время датчики работают с кантилеверами микрометрового размера, что позволяет не только наносить надежным образом рецепторные слои, но и точно регистрировать изгиб кантилевера. В зависимости от баланса сил в слое «рецептор–вещество» кантилевер может изгибаться как в сторону слоя, так и в противоположную сторону, что дает дополнительную информацию о характере межмолекулярных сил в слое. Положение зонда отслеживается с помощью системы обратной связи, измеряющей силу взаимодействия между острием волокна и поверхностью образца. Результатом экспериментов является не только оптическое изображение образца, но и топографическая картина.

Разрешение системы ограничено размерами острия волокна, а также диаметром расположенной на острие апертуры. В отдельных случаях размеры апертуры на острие волокна составляет около 30 нм. Ограничение размеров отверстия связано не только со сложностями производства, но и с тем, что прохождение света через столь малые апертуры затруднено.

Пространственное разрешение системы может быть улучшено при использовании безапертурной микроскопии ближнего поля. В этом случае в качестве нанометрового зонда используется острое иглы. Для получения вы-

сокого пространственного разрешения системы применяется излучение, рассеянное этим острием. Разрешение метода ограничено лишь радиусом кривизны иглы. Схема установки для таких измерений представлена на рис. 5. При рассеянии внешнего возбуждающего излучения на острие иглы образуется как ближнее, так и дальнее поле. Однако при достаточно близком расположении зонда над образцом основной вклад в регистрируемый сигнал вносит именно взаимодействие с ближним полем.

Одной из важнейших механических характеристик наноструктурированных материалов является твердость. Поскольку измерение твердости не сопровождается разрушением изделия, методики измерения твердости широко распространены в промышленности и используются при контроле технологических процессов, определении эксплуатационных характеристик изделий и выборе режимов механической обработки.

Для измерения механических характеристик в субмикрометровом и нанометровом масштабах применяют контактные методы, в основе которых лежит контроль взаимодействия твердого наконечника-индентора, с поверхностью материала [7].

При измерении механических характеристик в нанометровых масштабах особое вни-

мание необходимо уделять шероховатости поверхности исследуемого образца, так как она влияет на определение площади контакта, поскольку индентор касается поверхности не в одном месте и имеет несколько пятен контактов. При этом реальная площадь контакта меньше, чем определяемая по модели. Возможность визуализации области измерения до испытаний и после них позволяет оценить степень влияния шероховатости и навалов на результаты измерения. Измерение механических характеристик методом микротвердости по остаточному отпечатку в микромасштабах регламентируется ГОСТ 9450–76, в соответствии с которым минимальную нагрузку составляет масса 5 г, а размер отпечатка должен быть не менее 4 мкм, что обусловлено предельными техническими характеристиками оптической системы наблюдения отпечатка.

Исследование остаточного отпечатка методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) позволяет определить не только проекцию его площади, но и глубину, а также учесть площадь пластических навалов при определении контактной площади отпечатка (рис. 6).

При переходе к наномасштабным измерениям и уменьшении глубины внедрения индентора до 50 нм на результаты измерения могут оказывать значительное влияние эффект упругого восстановления и шероховатость поверхности, что накладывает ограничения на возможность применения метода измерения твердости по восстановленному отпечатку.

Наиболее распространенным способом определения механических характеристик в наномасштабах является измерительное динамическое индентирование, в основе которого лежит определение и анализ зависимостей между прикладываемой нагрузкой и глубиной внедрения индентора (рис. 7).

В этом методе твердость определяется как отношение максимальной приложенной силы

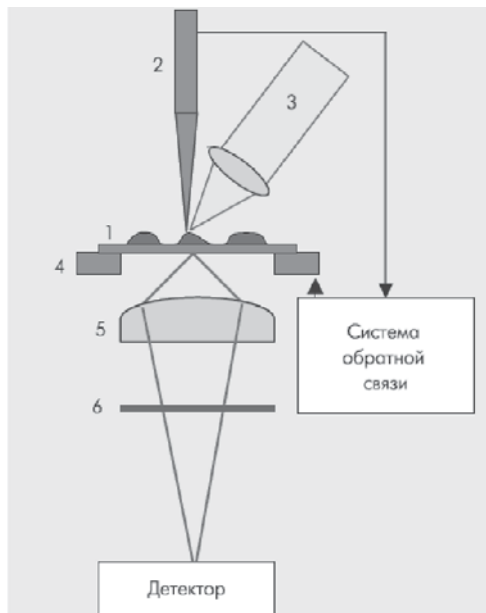


Рис. 5. Схема установки для безапертурной микроскопии ближнего поля:

- 1 – образец; 2 – зонд;
3 – возбуждающее излучение; 4 – сканер;
5 – собирающий объектив; 6 – поляризатор

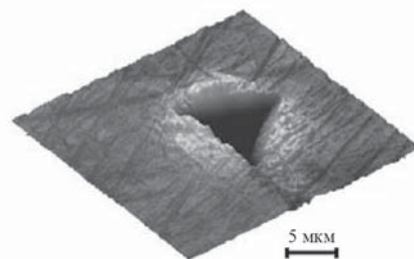


Рис. 6. Трехмерное СЗМ-изображение микроотпечатка на стали

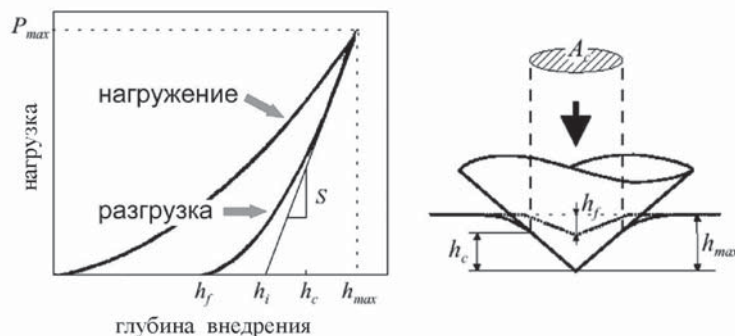


Рис. 7. Динамическое индентирование

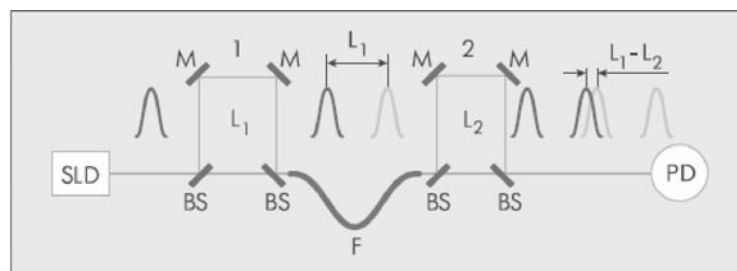


Рис. 8. Схема тандемного интерферометра:

SLD – низкокогерентный источник, F – соединяющее оптическое волокно, PD – фотоприемник, $L_1 - L_2$ – оптическая разность хода первого и второго интерферометра соответственно, BS – делители света, M – зеркало

P_{max} к площади проекции отпечатка, причем его визуализация не предусмотрена. Площадь проекции отпечатка определяется по известной геометрии наконечника с площадью проекции отпечатка A и контактной глубине индентирования, вычисленной по кривой «нагрузка–разгрузка».

Основное достоинство метода наноиндентирования заключается в том, что твердость определяется в момент максимального внедрения наконечника, т.е. до начала упругого восстановления материала.

Контроль температуры и толщины нанослоев

Для бесконтактного контроля температуры и толщины перспективным является метод низкокогерентной тандемной интерферометрии [8]. Метод основан на том, что зондирующий свет последовательно проходит через исследуемый образец, который выполняет роль первого интерферометра, и через оптический коррелометр, который является вторым интерферометром. Оптическая разность хода второго интерферометра может перестраиваться с высокой точностью. Достоинством являются высокая постоянная чувствительность во всем

диапазоне измеряемых оптических толщин и универсальность, поскольку измерять можно и толщину, и температуру.

Система содержит низкокогерентный источник света и два интерферометра (рис. 8), которые представляют собой линии задержки, связанные через оптическое волокно. Если оптические разности хода обоих интерферометров больше длины когерентности источника света, ни один из них в отдельности не дает интерференционного сигнала.

Однако в результате последовательного прохождения низкокогерентного света через обе линии задержки интерференция будет наблюдаться, если оптические разности хода интерферометров L_1 и L_2 совпадут. Первый интерферометр делит импульс когерентности на два неперекрывающихся импульса с задержкой между ними L_1 . Во втором интерферометре каждый из двух импульсов на входе делится еще на два. В результате на выходе второго интерферометра получаем четыре импульса. При условии

$$\Delta L = |L_2 - L_1| < L_{\text{ког}},$$

где $L_{\text{ког}}$ – длина когерентности источника, два

из четырех импульсов будут перекрываться и интерферироваться.

Подстраивая длину одной опорной линии задержки под положение максимума интерференционной картины на выходе устройства, можно определить оптическую толщину другой линии задержки, которую представляет собой измеряемый объект, и зафиксировать ее изменения, возникающие при изменении размеров объекта, а также при изменении температуры. Абсолютная точность измерения оптической толщины ограничивается точностью отсчетного устройства, используемого для определения разности хода, возникающей в опорной линии задержки.

Примером нанотермометра является устройство, состоящее из комбинации неорганических и полимерных материалов. Они образуют высокоупорядоченные наноразмерные структуры (рис. 9).

Нанотермометр имеет диаметр около 30 нм и реагирует на разность температур до 60 °С в объеме всего в 200 нм. Структура нанотермометра состоит из частиц золота размером 20 нм с полимерными наносферами на ее поверхности. При изменении температуры изменяется размер наносфер, и, соответственно, расстояние между ними. Это приводит к изменению сигнала в измерительной схеме [9].

Объектом нанотехнологий являются не только малоразмерные объекты, такие как пленки, но и объемные материалы, модифицируемые с помощью нанотехнологий, например, нанокерамики. В некоторых случаях новые свойства наноматериалов обусловлены глубокими изменениями в самой природе исходных материалов, в частности, на квантовом уровне. Например, уменьшение размеров кристаллитов до масштаба нанометров ведет к появлению квантово-размерных эффектов (уменьше-

ние температуры плавления), спектральному сдвигу полос люминесценции, изменению динамики процессов фотовозбуждения, возникновению релаксации и электрооптических эффектов и т.д., что можно эффективно использовать в приборах.

Иногда применение модифицированных методов необходимо и для контроля свойств объемных материалов, созданных с использованием нанотехнологий. В частности, такая потребность возникает, когда материал формируется непосредственно в процессе изготовления изделия и невозможно получить адекватные контрольные образцы стандартной конфигурации. Подобная ситуация наблюдается при измерении теплового расширения материалов с малыми коэффициентами теплового расширения.

Для измерения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) твердых материалов созданы приборы, в которых реализованы различные методы измерения удлинения исследуемого образца: оптические, рентгеновские и механические. Однако, когда значения ТКЛР исследуемых материалов, включая наноматериалы, менее $2 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, только использование высокочувствительных интерферометрических методов позволяет обеспечить контроль температурного расширения образцов с требуемой точностью.

Метод интерференционной дилатометрии основан на точном интерференционном измерении температурного удлинения, при этом в соответствии с изменением длины образца регистрируются интерферометрические сигналы (картины полос), по изменениям фаз которых определяют удлинение образца, выраженное в длинах волн оптического излучения. Основным ограничением классических интерференционных дилатометров является необходимость в изготовлении образцов специальной формы. Это особенно важно, если наноматериал не поддается точной механической обработке или полировке; если технология создания материала не позволяет получить его в достаточном объеме, в частности, вследствие ограничений, вносимых технологическим процессом изготовления; если наноматериал содержит дорогостоящие компоненты. Кроме того, поскольку в некоторых нанотехнологиях материал создается в форме изделия, возникает необходимость в измерении ТКЛР непо-

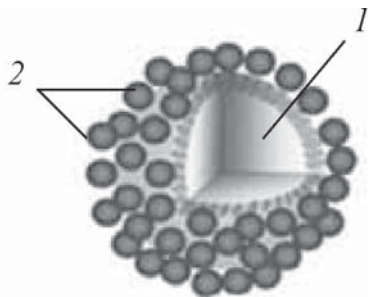


Рис. 9. Чувствительный элемент нанотермометра:
1 – ядро из золота; 2 – полимерные наносферы

средственно материала изделия, так как образцы материала могут просто не существовать.

Одно из решений проблемы контроля образцов материалов и изделий с нерегулярной поверхностью состоит в применении разновидности интерференционного метода – спекл-интерферометрии, которая позволяет изучать случайные интерференционные поля, формируемые при диффузном отражении когерентной световой волны от нерегулярных поверхностей. Современный уровень оптики, измерительной техники и компьютерных технологий позволяет обеспечить формирование, регистрацию и обработку спекл-интерференционных полей с извлечением необходимой информации о температурном расширении исследуемого образца [10].

В высокоточных интерференционных dilatометрах для абсолютных измерений ТКЛР используется схема интерферометра Физо (рис. 10), образованного двумя прозрачными пластинами M_1 и M_2 , между которыми размещается образец исследуемого материала.

При тепловом расширении образца изменяется оптическая длина пути волны, отраженной от поверхности верхней пластины M_1 по отношению к оптической длине пути волны,

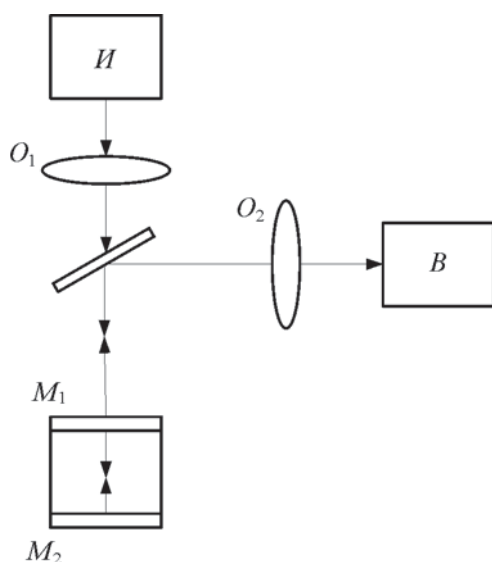


Рис. 10. Оптическая схема интерферометра Физо для определения температурного удлинения исследуемых образцов:

$И$ – источник когерентного излучения;
 $В$ – видеокамера;
 O_1 , – коллиматор; O_2 – объектив;
 M_1 , M_2 – прозрачные пластины

отраженной от нижней пластины M_2 . При этом измерение разности фаз интерферирующих волн позволяет определять тепловое расширение образца с высокой точностью.

При контроле ТКЛР наноматериалов схема интерферометра Физо во многих случаях неприменима, поскольку образец или исследуемое изделие из наноматериала может иметь неплоский рельеф, негладкую поверхность или микроскопические размеры, что делает размещение на нем верхней пластины весьма затруднительным или невозможным. В таких случаях используют схему интерферометра Майкельсона, в которой измерительная волна отражается непосредственно от поверхности образца, а опорная волна – от подставки образца (рис. 11).

При освещении шероховатой поверхности когерентным излучением происходит диффузное отражение с формированием картины спеклов (от англ. *speckle* – крапинка, пятнышко). При тепловом расширении образца интенсивность и фаза спеклов динамически изменяются, причем изменением фазы характеризуется нормальное смещение поверхности образца. В процессе измерений требуется отслеживать изменения фазы отдельных спеклов. Поскольку контраст спеклов при температурном расширении исследуемого образца изменяется случайным образом во времени и от спекла к спеклу, необходимо разделять спеклы по амплитуде и вычислять изменения фазы по набору спе-

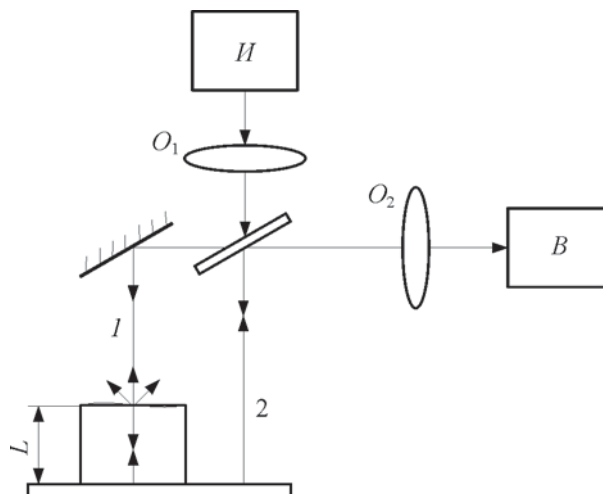


Рис. 11. Оптическая схема интерферометра Майкельсона для определения температурного удлинения исследуемых образцов:

1 – измерительная волна; 2 – опорная волна

клов. В отличие от традиционной схемы интерферометра Физо, при помощи которого наблюдают интерференцию плоских волн, использование спекл-интерферометра для контроля ТКЛР образцов с неплоским рельефом и негладкой поверхностью требует фокусировки на поверхности образца при помощи объектива O_2 . Регистрация интенсивности отдельных спеклов, характеризующих нормальные смещения поверхности со сложным рельефом, обеспечивается видеокамерой.

Дефокусировка изображения в плоскости видеокамеры пренебрежимо мала при нормальном смещении поверхности образца вдоль оптической оси на малую величину. Пусть, например, перемещение не достигает половины длины волны $\lambda/2$. Вследствие изменения разности хода в интерферометре распределение интенсивности в пятнах спекл-структуры в плоскости видеокамеры изменится. Однако, когда перемещение достигнет половины длины волны $\lambda/2$ и изменение оптической разности хода станет равным λ , распределение интенсивности в пятнах восстановится и спекл-структура окажется идентичной исходной, которая была до смещения поверхности образца. Спекл-структура в плоскости видеокамеры восстанавливается всякий раз, когда разность хода принимает значение, равное целому числу длин волн.

Условие получения необходимой информации о температурном удлинении образца состоит в обеспечении достаточной глубины фокусировки на поверхности образца. Если смещение поверхности превысит определенное значение, дефокусировка изображения в плоскости видеокамеры изменит вид спекл-структуры и нельзя будет найти положения, при котором она вновь будет идентична самой себе. Допустимое смещение поверхности образца зависит от характеристики оптического прибора, описывающей его возможность сбора света, угловой апертуры α объектива O_2 , который формирует изображение. Допустимое нормальное смещение поверхности образца должно быть

$$\Delta L \leq 2\lambda / \alpha^2.$$

При высоте образца $L = 20$ мм ТКЛР слабо расширяющегося наноматериала при повышении температуры образца в диапазоне до 1000 К изменение длины образца составит

0,2 мкм, т.е. менее половины длины волны излучения видимого диапазона длин волн. Влияние дефокусировки вследствие удлинения образца пренебрежимо мало и поэтому при определении ТКЛР слабо расширяющихся материалов основное внимание следует уделять обеспечению фокусировки в диапазоне отклонений рельефа поверхности образца.

При малых α возникают значительные потери регистрируемой мощности диффузно-отраженного излучения, поэтому при контроле образцов материалов с шероховатой поверхностью необходим источник излучения достаточной мощности. Энергетические расчеты показывают, что в dilatометрах с использованием спекл-интерферометра мощность излучения источника должна быть не менее 5 мВт.

При регистрации спекл-интерференционных полей необходимо, чтобы средний размер спеклов в плоскости регистрации превышал размер пикселей видеокамеры. В противном случае снижается контраст спекл-структуры, и наблюдаются значительные потери полезной информации. Изменения спекл-интерференционных полей в спекл-интерферометре контролируются с точностью до 0,5 нм.

Заключение

Обеспечение единства измерений параметров и характеристик нанообъекта требует привязки средства измерений к соответствующему эталону, воспроизводящему единицу нановеличины. Из концепции обеспечения прослеживаемости результата каждого измерения геометрических параметров объектов и структур нанотехнологий следует необходимость прослеживаемости к государственному эталону метра.

На примерах измерений линейных параметров нанообъектов, а также их массы и температуры показаны возможности реализации современных методов измерения в нанодиапазонах, и проведен анализ существующих ограничений в этой области.

В нанотехнологиях приборная и технологическая составляющие работают на пределе своих возможностей. Это увеличивает вероятность ошибки, связанной, прежде всего, с человеческим фактором. В связи с этим метрологии и автоматизации принадлежит особая роль в наноиндустрии.

Список литературы

1. Instrumentation and Metrology for Nanotechnology // Report of the National Nanotechnology Initiative Workshop, January 27-29, 2004, Gaithersburg, MD, USA. P. 174.
2. Алехин В., Мирошниченко И., Серкин А. Лазерный интерферометр для измерения перемещений // Наноиндустрия. 2010. № 2. С. 38–41.
3. Яминский Д., Яминский И. Эталон нанометра // Наноиндустрия. 2009. № 4. С. 44–45.
4. Меньшиков Е., Яминский И. Атомно-силовой интерференционный микроскоп // Наноиндустрия. 2009. № 1. С. 26–28.
5. Калечиц В. Нанотехнология: Измерение параметров частиц, контроль и измерения // Наноиндустрия. 2010. № 5. С. 70–75.
6. Ким Т., Ким С., Ванг К. и др. Кантилеверные наносенсоры: возможности и применения // Наноиндустрия. 2009. № 5. С. 34–37.
7. Рудометкин Л.Е., Антонов А.А., Рачков М.Ю. Система управления контролем остаточных напряжений конструкций // Известия МГИУ. 1 (24). 2012. с. 13–17.
8. Волков П., Данильцев В., Лукьянов А. и др. Бесконтактный контроль температуры и толщины в технологии микро- и нанослоев // Наноиндустрия. 2008. № 2. С. 20–25.
9. Rachkov M. Nanotechnology and Measurement // Proc. of the Int. Workshop on Micro- and Nano Production Technologies and Systems. – IPM RAS, Moscow, Russia, 2007, P. 113–119.
10. Компан Т.А., Корнев А.С., Пухов Н.Ф. и др. Метод спекл-интерферометрии для определения теплового расширения наноматериалов // Измерительная техника. № 4. 2011. С. 48–52.

Материал поступил в редакцию 06.04.2013

РАЧКОВ Михаил Юрьевич

E-mail: michyur@gmail.com
Тел.: (917) 549-85-09

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО МГИУ, академик Российской академии космонавтики. Сфера научных интересов – автоматизация, робототехника и измерительные системы. Автор двух монографий, более 300 научных публикаций и более 80 изобретений.