

## Об эталонах нанометрового размера

В настоящее время стремительно расширяется круг исследователей, разработчиков и производителей изделий нанометрового диапазона. Важность проблемы стала понятной на всех континентах и суммарный объем инвестиций в данное направление превышает  $10^{13}$  евро. Классический эталон метра, находящийся в Парижской палате мер и весов давно был скопирован с высокой точностью во всех ведущих странах мира. Когда потребовалось изготовить эталон одной миллионной части – одного микрона стали применять соответствующие меры длины в виде решеток с периодом порядка 1 мкм. Средний период решеток измерялся с помощью оптических методов, включая измерение угла дифракции отраженного лазерного излучения. Уже при данных размерах решетки вследствие технологических несовершенств её изготовления расстояние между каждыми из её полос выдерживается лишь в среднем, изменяясь в большую и меньшую стороны. Поэтому, несмотря на то, что большинство результатов измерений в таких эталонах отличается от требуемого, однако средняя величина, определяемая путем обработки достаточно большого числа измерений (придается обычно специальная программа) приближается к требуемой величине передаваемого размера эталона. Чем меньше создаваемый размер решетки, тем больше относительная ошибка её изготовления при фиксированном технологическом процессе и тем больше необходимо произвести измерений, чтобы обработав результаты измерений, подавляющее большинство из которых отличается от среднего значения рассчитать величину среднего расстояния между полосами решетки. Кроме того, решетку с микронными расстояниями между полосами необходимо хорошо защищать от пыли, размеры обычных пылинок которой составляют несколько мкм. Поэтому работу с такими решетками желательно производить в чистых комнатах, гермозонах, или вакуумных установках, что многократно усложняет проведение измерений. Дальнейшее уменьшение размеров эталона – например, в тысячу раз, чтобы изготовить эталон нанометровых размеров не только многократно усложняет технологию изготовления, условия проведения измерений и соответственно стоимость, но и спотыкается еще об один барьер, который раньше практически не сказывался при проведении измерений. Этот барьер связан с наличием на поверхности твердого тела слоя молекул окружающего газа, толщина которого соразмерима с 1 нанометром. Устранение адсорбированного слоя обычно производится вакуумных установка путем высокотемпературного нагрева поверхности, однако применение подобного метода при проведении измерений приводит к ещё большему усложнению процедур измерения и хранения эталонов.

На первом этапе развития нанотехнологии проблему создания образцов, которые можно применять в физических экспериментах вместо эталонов физики решали следующим образом – они использовали свежесколотую поверхность пиролитически изготовленного графита, где находили области с регулярным расположением атомов углерода. Данное расстояние между атомами можно было определить по результатам дифракции рентгеновского излучения, что позволяло использовать такую регулярную структуру для калибровки. Однако нестабильность процесса скалывания графита (путем приклеивания скола и его отслаивания вместе с чешуйками графита) и короткий срок жизни такой поверхности на воздухе, реально ограничивает возможность применения подобных образцов в качестве эталонов.

В то же время нарождающаяся нанопромышленность требует применения эталонов, использование которых будет характеризоваться сравнительной простотой, надежностью и воспроизводимостью.

Данные лавины проблем, возникающие при создании эталонов нанометрового диапазона неизбежны по следующей главной причине – эталоны со времен создания эталона метра создаются в виде статических образцов. Естественно при уменьшении размеров эталона в миллиард раз должны возникнуть новые проблемы затрудняющее обычное

масштабирование. Поэтому в настоящее время несмотря на многомиллиардные инвестиции в нанотехнологию эталон 1 или 10 нм отсутствует.

Выход из создавшегося положения заключается в создании эталонов нового типа – динамических, в которых поверхность эталона перемещается под воздействием управляющих воздействий. При этом исключаются проблемы качества изготовления поверхности и наличия на ней различных слоев.

Анализ процедуры измерения длины даже обычных метровых и сантиметровых размеров показывает, что мы в начале сравниваем образец с эталоном в одной точке, а потом в другой. Раньше на том, что сравнение в двух точках на самом деле производится одновременно внимание не обращалось, потому что это было не принципиально. Аналогичная ситуация продолжалась и в микронном диапазоне. Однако уже в субмикронном диапазоне, при проведении измерений с помощью сканирующих зондовых или электронных микроскопов разница времени проведения начального и конечного измерений длины становится более существенной и на неё требуется обратить внимание, чтобы за время перемещения зонда от одной точки к другой возможные помехи типа дрейфа, или внешних воздействий не приводили к искажению результатов измерения. Процесс перемещения зонда также вносит дополнительные погрешности из-за гистерезиса и нелинейности керамики, полевых искажений в системе фокусировки луча и временных нестабильностей из-за сейсмических и акустических помех, а также теплового дрейфа, электромагнитных помех и т. д.

Поэтому целесообразно создавать эталон, в котором перемещение зонда будет минимизировано или полностью исключено, а время между измерениями в одной точке и другой минимизировано. Минимизировать или полностью исключить процесс перемещения зонда возможно при перемещении поверхности эталона. Такие эталоны, у которых контролируется перемещается поверхность логично назвать динамическими эталонами.

В настоящее время созданы первые динамические эталоны, обеспечивающие перемещение в направлении перпендикулярно и параллельно поверхности.

Для обеспечения контролируемого перемещения с высокой степенью воспроизводимости применяются материалы, характеризующиеся практически отсутствием гистерезиса, крипа, нелинейности. С целью уменьшения помех связанных с влиянием внешних магнитных полей и нагревом при протекании тока целесообразно выбирать материалы с обратным пьезоэффектом, а не магнитоstrictionные.

Конструкция и принцип действия динамических эталонов приведен на рис.

В настоящее время данные динамические эталоны независимо испытаны различными методами в лидирующих институтах ведущих странах на разных континентах. Основными применявшимися методами были:

1. Оптическая лазерная интерферометрия – на 3-х различных установках.
2. Когерентная фазовая микроскопия- на 1 установке.
3. Сканирующая зондовая микроскопия – на 4 установках.
4. Электронная микроскопия- на 1-й установке.

Обработка и анализ результатов измерений показали линейную зависимость величин перемещения от приложенного напряжения. Практика эксплуатации динамических эталонов в течение более 2-х лет показала их высокую эксплуатационную стабильность.

На основе множества проведенных испытаний и полученных результатов целесообразно рекомендовать применение динамических эталонов для калибровки SPM, SEM, MEMS.