

2004, том 40, № 2

УДК 621.3.083.98

В. В. Календин

(Москва)

НАНОМЕТРИЯ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Рассмотрены состояние и перспективы развития метрологического обеспечения линейных измерений в нанометровом диапазоне. Сформулированы проблемы техники нанометровых измерений и определены важнейшие задачи их решения. На основе анализа принципиальных возможностей различных методов и средств нанометрии, а также технологий изготовления и конструкций мер малой длины рекомендованы наиболее оптимальные с точки зрения разрешающей способности, стабильности и погрешности измерений. Представлены результаты экспериментальных исследований эталонного измерительного комплекса на основе сканирующего зондового микроскопа и лазерного интерферометра, обеспечивающего трехмерные измерения линейных размеров с атомным разрешением в реальном масштабе времени.

Введение. Создание новой техники, наукоемких технологий и новых материалов, обеспечивающих коренные сдвиги в структуре и техническом уровне производства, во многом определяется уровнем метрологического обеспечения измерений. Одна из наиболее интенсивно развивающихся наукоемких отраслей промышленности – электронная, особенно микроэлектроника. Эволюционному процессу развития микроэлектроники свойственно непрерывное последовательное уменьшение геометрических размеров элементов и структур микросхем, обусловленное потребностями повышения степени интеграции и быстродействия. Для традиционных изделий микроэлектроники наметился этап перехода к структурам, имеющим на внешней поверхности рельефные элементы субмикронных размеров [1, 2]. Сегодня технология микроэлектроники превращается в нанотехнологию, т. е. технологию, где необходимо применение техники нанометровых измерений – нанометрии.

Линейные измерения на субмикро- и нанометровом уровнях играют важную роль в разработке принципиально новых технических решений при создании микроэлектронных приборов и микросистемной техники различного назначения. Например, в микроэлектронике при производстве интегральных схем (БИС, СБИС, СВЧ-транзисторов и т. д.) исключительно важное значение имеют измерения геометрических размеров элементов трехмерной топологии базовых структур (периода, ширины линии, высоты профиля, положе-

ния и качества краев), составляющих десятые доли микрометра и соизмеримых с длиной волны видимого света.

Одновременно идет изучение возможности создания наноструктур на атомарном уровне. Эта ветвь исследований развивается как поисковая и имеет значение, прежде всего, для физического эксперимента, решения задач для диагностики, анализа отказов и создания новых приборов микро-нанoeлектроники.

В Международной программе развития микроэлектроники до 2014 г. [1, 3] сформулированы требования к точности измерения размеров элементов СБИС, в том числе критических размеров с проектными нормами от 115 нм (2002 г.) до 22 нм (2014 г.). Реализация этой программы требует разработки новых методов и высокоточных средств измерений длины в нанометровом диапазоне и создания метрологического обеспечения нанометрии.

1. Проблемы и задачи нанометрии. Достижение предельных возможностей в нанометрии связано с использованием высокоразрешающих методов сканирующей зондовой микроскопии: растровой оптической, растровой электронной, сканирующей туннельной и атомно-силовой в сочетании с лазерной интерферометрией и фазометрией.

Основная проблема измерений длины в указанном диапазоне связана с недостаточно исследованными соотношениями между объектом измерений и его изображением в измерительных микроскопах, работающих на различных физических принципах. Регистрируемое изображение неадекватно реальному профилю измеряемого элемента рельефа поверхности объекта. Эта проблема имеет фундаментальный характер и усугубляется сложной природой взаимодействия инструмента с объектом измерений, их сильным взаимным влиянием. Объекты таких размеров не имеют строгой геометрической границы, и необходимо учитывать физические свойства объекта и специфику выбранных методов измерений длины в нанометровом диапазоне. В связи с этим особую важность приобретает физическая модель взаимодействия средств измерений с создаваемыми объектами и интерпретация в рамках этой модели результатов измерений с привлечением методов математического моделирования, обеспечивающих уменьшение систематической погрешности измерений линейных размеров, связанных с локализацией края измеряемого элемента.

Особенность нанотехнологии состоит в том, что необходим независимый контроль прецизионного перемещения и взаимного расположения измерительного зонда и объекта, а также фиксация положения объекта с погрешностью 0,1 нм, что соответствует локальности метода сканирующей зондовой микроскопии. Это, в свою очередь, требует создания суперпрецизионных систем нанопозиционирования как зонда, так и объекта и разработки высокоточных средств измерений их линейно-угловых перемещений в реальном масштабе времени с погрешностью менее 1 нм. Кроме того, для контроля нанотехнологии сверхточной обработки поверхностей микрообъектов необходимы бесконтактные быстродействующие средства измерений шероховатости и формы поверхности с нанометровой погрешностью.

Важная роль в решении проблемы обеспечения единства и достижения требуемой точности линейных измерений в микро- и нанометровом диапазоне принадлежит специальным тест-объектам, аттестованным в качестве эталонных мер малой длины и стандартных образцов с размерами структурных элементов 10–3000 нм, служащих для калибровки и аттестации контрольно-измерительного и технологического оборудования нового поколения.

ния. Технология создания мер и стандартных образцов в диапазоне 10^{-9} – 10^{-5} м должна обеспечивать заданную топологию поверхности, стабильные и воспроизводимые параметры геометрической структуры и отвечать требованиям их применения в различных средствах измерений малых длин.

Возрастающие требования к точности измерений линейных размеров, разнообразие свойств материалов и геометрической структуры, увеличение числа элементов в единице объема приводят к значительному росту числа измерений и необходимости создания высокопроизводительных автоматизированных средств. Согласно предъявляемым требованиям погрешности рабочих средств измерений длины в диапазоне 0,1–10 мкм составляют 1–10 нм, что соизмеримо с погрешностью Государственного первичного эталона единицы длины (ГЭТ 2-85).

Указанные проблемы нанометрии предполагают решение следующих важнейших задач:

- разработки концепции метрологического обеспечения измерений длины в диапазоне 1–3000 нм;

- создания прецизионной технологии изготовления специальных тест-объектов и стандартных образцов с различными вариантами топографии поверхности и размерами структурных элементов 10–3000 нм и разработки методов и средств их калибровки;

- разработки методов лазерной наноинтерферометрии и фазометрии для создания высокоточных быстродействующих средств измерений линейных перемещений систем микропозиционирования тест-объектов с разрешением 0,1 нм в реальном масштабе времени;

- создания эталонов нового поколения для воспроизведения и передачи размера единицы длины в нанометровом диапазоне на основе сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) и лазерной интерферометрии;

- разработки физических моделей взаимодействия измерительных микроскопов (РЭМ, СТМ, АСМ) с создаваемыми тест-объектами и интерпретации измерений с учетом различных влияющих на них факторов, позволяющих решить проблему, связанную с локализацией края измеряемого элемента.

Следует отметить, что ведущие страны мира, занимающие ключевые позиции в нанотехнологии (Япония, США, Германия, Англия и другие), вопросам внедрения метрологии в практику линейных измерений в нанометровом диапазоне придают первостепенное значение. В Национальном институте стандартов и технологий (НИСТ, США) создана и успешно реализуется национальная программа метрологического обеспечения микроэлектроники [2–8].

2. Методы и средства нанометрии. В настоящее время в промышленности для измерения малых длин используется значительный парк приборов, основанных на методах физической оптики, электронной и сканирующей зондовой микроскопии.

2.1. Оптическая микроскопия. Измерение линейных размеров элементов интегральных схем на шаблонах и полупроводниковых пластинах в основном осуществляется при помощи оптических, телевизионных, фотоэлектрических микроскопов, в которых регистрируется профиль распределения интенсивности света в изображении элемента. Принцип измерения заключается в выборе относительного уровня интенсивности света на краю изображения элемента (оптического порога), соответствующего физическому краю изображения, измерении ширины изображения по выбранному уровню и вы-

числении размера элемента через увеличение микроскопа. Инструментальная погрешность лучших измерительных микроскопов в диапазоне 0,7–20 мкм достигает 0,03–0,05 мкм [8]. Точное значение оптического порога требует использования высококачественной оптики, создания системы автофокусировки, термо- и вибростабилизации при высоком уровне автоматизации приборов.

К недостаткам оптических измерительных микроскопов (независимо от их модификации) следует, прежде всего, отнести ограничения, связанные с достижением дифракционного предела разрешающей способности, что не позволяет измерить ширину линии элементов объектов ≈ 1 мкм.

2.2. Лазерная дифрактометрия. В настоящее время для измерений микро- и субмикрометровых размеров разработаны лазерные дифрактометры (ЛД), в которых ширина (период) элемента определяется по параметрам дифракционного спектра, возникающего при освещении пучком когерентного света одного или группы элементов. Основная задача в дифракционном методе измерений – восстановление геометрической структуры элементов тест-объектов по распределению интенсивности в дифракционной картине. Это требует проведения теоретических исследований по восстановлению профиля периодической структуры по значениям интенсивности главных дифракционных максимумов (ГДМ) с использованием математических моделей (путем решения обратной задачи). Достоинствами дифракционного метода являются простота измерений, возможность определения статистических параметров величин без проведения отдельных наблюдений и замеров. Аттестация ЛД, реализующих косвенный метод измерений, может быть проведена без использования мер сравнения по значениям интенсивности (углового положения ГДМ) дифрагированного света с применением аттестованных средств измерений угла и энергетической фотометрии с абсолютной привязкой к длине волны. Следует отметить, что для восстановления геометрической структуры измеряемых элементов необходимо знание общего вида и формы элементов, которые априори неизвестны, что, в свою очередь, приводит к некорректности однозначного восстановления топологии поверхности и затрудняет вычисление размеров тест-структур из анализа дифракционной картины.

2.3. Растровая электронная микроскопия. Перспектива развития измерений длины волны в субмикрометровом диапазоне связана с применением растрового электронного микроскопа (РЭМ).

Высокая разрешающая способность (5–10 нм), большой диапазон увеличений (до 100000 и выше), большая глубина фокусировки (~ 100 мкм), многообразие режимов работы и возможность получения информации об объекте в виде электрического сигнала дают возможность разработать высокочувствительное средство измерений линейных размеров на основе РЭМ [9].

В практике мирового приборостроения уже освоен выпуск моделей РЭМ-компараторов, пригодных для проведения линейных измерений элементов субмикронных размеров по регистрируемым видеосигналам. При этом имеются приборы, позволяющие фиксировать сигнал отклика как во вторичных медленных электронах, так и в обратнорассеянных (отраженных). Наряду с моделями РЭМ, предназначенными для решения широкого класса исследовательских задач, созданы специальные электронно-оптические средства измерений линейных размеров, которые можно использовать для аттестации эталонов мер длины в микронном и субмикронном диапазонах [10].

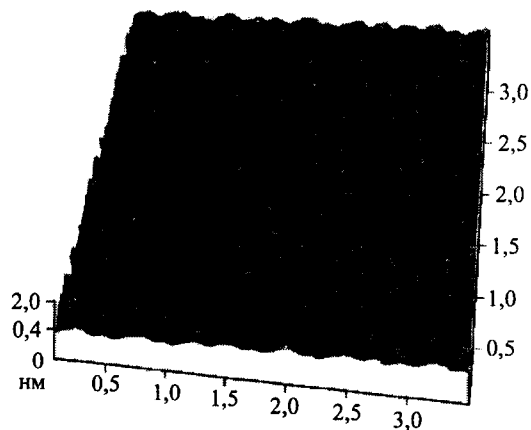


Рис. 1. СТМ-изображение атомной структуры поверхности стандартного образца

Однако РЭМ-метод характеризуется рядом ограничений, к числу которых следует отнести: недостаточно высокое пространственное разрешение; сложность получения трехмерных изображений поверхности; необходимость нанесения дополнительного токоотъемного слоя на плохо проводящие поверхности для предотвращения эффектов, связанных с накоплением заряда; проведение измерений только в условиях вакуума; наконец, возможность повреждения изучаемой поверхности высокоэнергетичным сфокусированным пучком электронов.

2.4. *Сканирующая зондовая микроскопия.* Предельные значения при измерении длины в нано-, субнанометровом диапазонах достигаются при использовании методов сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии (СТМ/АСМ).

Высокое разрешение СТМ ($\leq 0,01$ нм вдоль нормали к поверхности и $\sim 0,1$ нм в горизонтальном направлении, которое реализуется как в вакууме, так и в диэлектрической среде) открывает широкие перспективы для измерений линейных размеров в нанометровом диапазоне [11].

На рис. 1 представлено СТМ-изображение атомной структуры поверхности стандартного образца высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ).

Отметим следующие достоинства метода измерений линейных размеров с помощью СТМ:

- а) неразрушающий характер измерений, обусловленный отсутствием механического контакта и низкой энергией туннелирующих электронов;
- б) возможность проводить измерения как в вакууме, так и в атмосфере, а также в диэлектрических жидкостях;
- в) возможность работы в широком диапазоне температур;
- г) относительно высокая скорость формирования изображения измеряемого объекта с атомным разрешением.

СТМ хотя и обладает значительно более высоким разрешением, чем РЭМ, однако также не позволяет напрямую получать изображение поверхности непроводящих материалов. Кроме того, на точность отображения рельефа поверхности в СТМ заметно влияют плотность электронных состояний

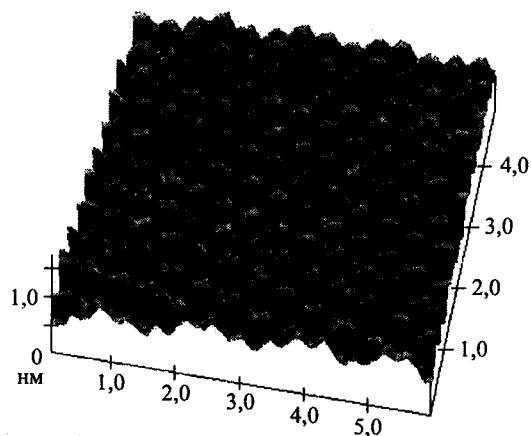


Рис. 2. АСМ-изображение атомной структуры поверхности слюды

вблизи поверхности и работа выхода, наличие природных и индуцированных током ионы адсорбатов.

Сканирующая атомно-силовая микроскопия реализует принцип измерения силы, действующей на острие иглы (зонда) со стороны исследуемой поверхности [12]. В отличие от туннельного микроскопа, где измеряемой величиной является туннельный ток, здесь определяется сила, что позволяет использовать АСМ для контроля топографии поверхностей как проводящих, так и диэлектрических сред. Игла АСМ, расположенная над сканируемой поверхностью, закреплена на кронштейне, образуя с ним единое целое – кантилевер. Силы, действующие на острие иглы, вызывают изгиб кантилевера, что фиксируется датчиком, преобразующим смещение в электрический сигнал. С помощью обратной связи положение образца меняется таким образом, чтобы сила, действующая между острием кантилевера и объектом, оставалась постоянной в процессе сканирования. При этом регистрируются все три координаты положения острия кантилевера, что позволяет получать трехмерное изображение поверхности (рис. 2). Атомное разрешение достигается в режиме, когда расстояние между иглой и поверхностью не превышает нескольких ангстрем.

Необходимо отметить, что зондом СТМ и АСМ является острие иглы, размеры которой (рис. 3, *a*) накладывают ограничения на получение информации об истинном рельефе поверхности исследуемого образца. В последние годы появились конструкции микрозондов в виде тонких нитевидных волокон [13] с радиусом около 100 нм (рис. 3, *b*) и еще более тонких нанотрубок. Форма и размеры острия кантилевера АСМ вносят искажения в регистрируемое АСМ-изображение. Поэтому для АСМ-измерений требуется эталонная структура с известным профилем и аттестованными размерами рельефа поверхности.

В табл. 1 приведены основные метрологические характеристики рассмотренных средств измерений малой длины.

3. Меры малой длины и стандартные образцы нанорельефа поверхности. Важная роль в решении проблемы обеспечения единства измерений и достижения требуемой точности линейных измерений принадлежит специальным мерам малой длины и стандартным образцам нанорельефа атомно-гладких поверхностей с размерами структурных элементов 10–3000 нм – эта-

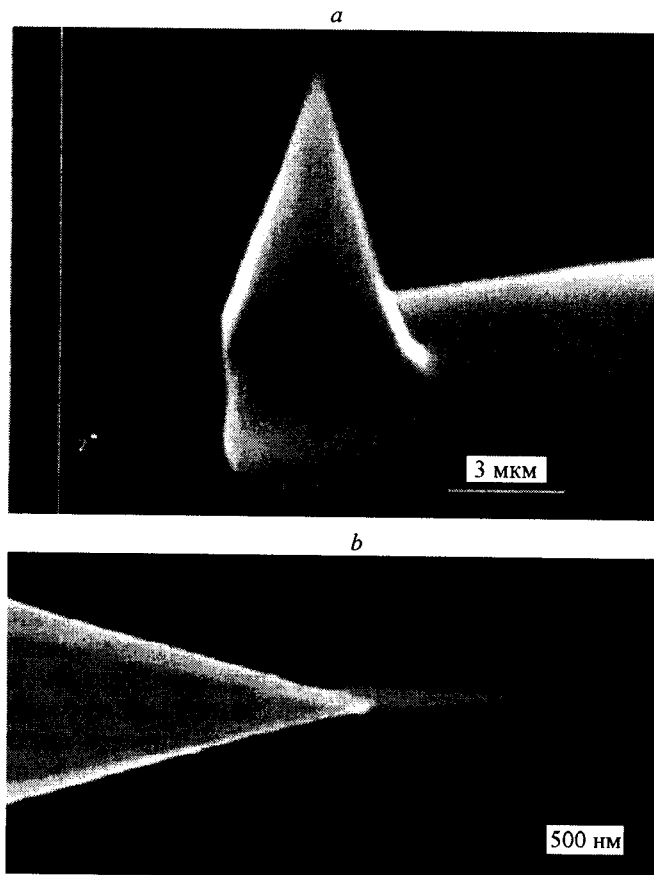


Рис. 3. Микрофотографии в РЭМ: обычный (а) и нитевидный (b) кантильверы

лонам сравнения, обеспечивающим передачу размера единицы длины в микро- и нанометровом диапазонах.

В настоящее время измерения малых длин связаны с определенной номенклатурой мер, определяемой международной практикой и включающей:

- одномерные (двумерные) периодические (шаговые) меры с периодом 0,2–3 мкм,
- меры ширины линии (штриха) в диапазоне 0,1–3,0 мкм,
- меры высоты ступени в диапазоне 8–1000 нм.

Все известные в настоящее время меры малой длины (от микрометров до десятых долей микрометра) имеют периодическую (шаговую) структуру с аттестованным периодом (шагом) по принятым международным стандартам с использованием явлений интерференции или дифракции света. Обычно период таких структур определяется в долях длины волны излучения стабилизированного He–Ne-лазера.

Параметры мер длины нанометрового диапазона приведены в табл. 2. Такие меры позволяют провести калибровку высокоточных средств измерений, предназначенных для определения длины малых отрезков между двумя эквивалентными сторонами исследуемой шаговой структуры, но не позволяют выполнить измерение ширины линии (длины отрезка между противоположными сторонами одного элемента структуры) [14–16]. В то же время

Таблица 1

Тип средства измерений	Диапазон измерений, мкм	Погрешность измерений, мкм
Микроскопы оптические: телевизионные фотоэлектрические растровые	2–40	0,15–0,8
	0,8–100	0,05–0,3
	0,3–50	0,03–0,1
Микроскопы электронные: растровые просвечивающие	0,1–100	0,02–0,1
	0,001–10	0,0005–0,03
Микроскопы сканирующие зондовые: туннельные атомно-силовые	0,002–50	0,001–0,01
Лазерные дифрактометры	0,25–50	0,01–0,1
Лазерные эллипсометры	0,005–10	0,002–0,01
Лазерные измерители перемещений	0,001–10000	0,0005–0,05
Меры малой длины: периодические ширины линии высоты ступени специальные	0,2–10	0,001–0,01
	0,1–3,0	0,015–0,03
	0,01–1000	0,001–0,01
	0,3–20,0	0,001–0,01

Таблица 2

Мера	Аттестуемый параметр	Метод аттестации	Аттестуемый размер, нм
GN-Au-4 (Россия)	Период	Дифракция	277,7 + 0,3
NJ-1000 (Япония)	Период	Дифракция	240 ± 1
SRM-2090 (США)	Шаг	Интерференция	250 ± 1
BCR-97A/G-7 (Германия)	Шаг	Интерференция	399 ± 3
Рельефные прямоугольные структуры (Россия)	Ширина линии	Эллипсометрия	98,9 ± 0,4
			150,7 + 0,3
			369,7 ± 0,8
			434,7 ± 0,8

практика линейных измерений в нанометровом диапазоне требует для калибровки сканирующих зондовых микроскопов создания мер малой длины, выполненных в виде рельефной шаговой структуры с заданными шириной, высотой (глубиной) и формой профиля. Именно такие меры малой длины – материальные носители размера – необходимы не только для самой калибровки перечисленных зондовых микроскопов, но и для подтверждения достоверности результатов измерения ширины элемента реального объекта, изображение которого регистрируется в микроскопе.

В НИСТ (США) реализуется специальная программа по созданию и аттестации мер малых длин и стандартных образцов нанорельефа поверхности. Созданы и аттестованы меры ширины линии и периода на фотошаблонах (SRM-473, SRM-2059). Меры представляют собой набор штрихов, вытравленных в слое хрома на кварцевой подложке. Диапазоны ширины линий и периода составляют 0,25–32 и 0,5–50 мкм соответственно. Стандартная неопределенность результатов измерений ширины линий (периода) не превышает 37 нм (10 нм).

Проводятся разработки по созданию меры ширины линии на монокристаллическом кремнии (диэлектрике с атомно-гладкими поверхностями) и аттестации ее по количеству атомных плоскостей в каждом направлении. Сравнение данных измерений этой меры различными методами РЭМ, СЭМ с измерениями ширины по электрическому сопротивлению таких структур показало, что неопределенность результатов измерений не превышает 20 нм.

В Научно-исследовательском центре по изучению свойств поверхности и вакуума (НИЦПВ) совместно с Институтом общей физики РАН, ОАО «НИИМЭ и МИКРОН» создана и аттестована специальная мера ширины и периода МШПС-2,0К, предназначенная для калибровки средств измерений линейных размеров на основе РЭМ и СЭМ в диапазоне 0,03–20 мкм с погрешностью не более 1–20 нм [17]. Мера представляет собой периодическую (шаговую) рельефную структуру с заданной высотой профиля элементов, выполненную на поверхности кремния с использованием технологии анизотропного травления. Элементы рельефа этой структуры имеют профиль в форме трапеции с равными боковыми сторонами и заданным углом наклона боковых сторон $\varphi = 54,74^\circ$ относительно нижнего основания, определяемым углом между кристаллографическими плоскостями (100) и (111). Вид профиля шаговой структуры показан на микрофотографии скола структуры в РЭМ на рис. 4, а, а на рис. 4, б – изображение шага структуры в атомно-силовом микроскопе. Применение данной меры позволяет провести калибровку АСМ по трем координатам, определить неортогональность Z-сканера и эффективный радиус кантилевера АСМ [18].

4. Лазерная наноинтерферометрия перемещений. Важнейшей задачей развития нанотехнологий является разработка высокочувствительных методов и прецизионных средств измерений линейных перемещений систем позиционирования объектов и зонда с предельно допустимой точностью, а также методов и средств их калибровки. Одним из перспективных решений проблемы является создание и внедрение в практику линейных измерений методов и средств лазерной фазометрии, опирающихся на эталоны физических величин.

Фазовые методы используют для измерений пространственно-временных изменений разности фаз – угла фазового сдвига (УФС) в интерференционном поле между измерительным и опорным пучками. Теоретически достижимый предел фазовых измерений находится на уровне $10^{-9} - 10^{-10}$ рад и

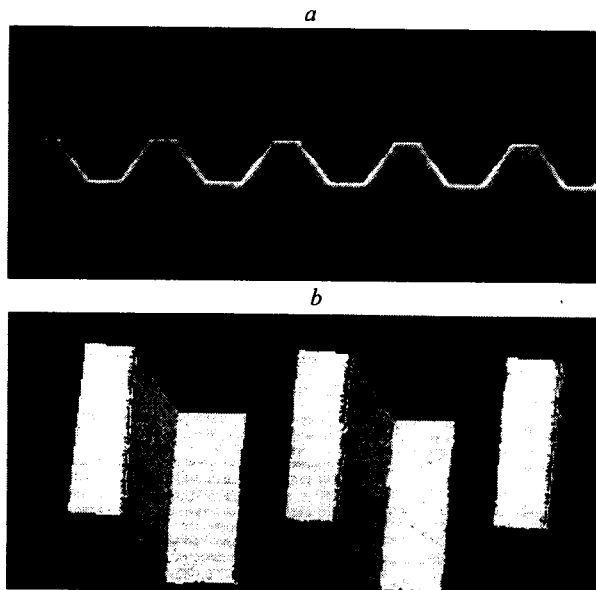


Рис. 4. Вид профиля шаговой структуры: изображение скола меры в РЭМ (а) и шага меры в АСМ (b)

ограничен квантовыми флуктуациями оптического излучения. Достигнутый уровень на много порядков выше упомянутого предела, что объясняется сильным влиянием неконтролируемых факторов случайного характера. Внедрение корреляционных методов обработки фазовой информации, использование современной элементной базы и достижений информационных технологий позволяют довести уровень фазовых измерений до порядка 10^{-5} – 10^{-6} рад и обеспечить расширение диапазона линейных измерений до 10^{-10} – 10^{-11} м.

В НИЦПВ создана лазерная интерференционная измерительная система, реализующая фазовые методы измерений линейных наноперемещений в оптическом диапазоне [19]. Принцип действия основан на двойном преобразовании частоты оптической несущей в опорном и сигнальном каналах интерферометра с помощью акустооптических модуляторов и последующем выделении сигнала разностной частоты в радиодиапазоне с фазовой цифровой обработкой измерительной информации.

На рис. 5 приведена структурная схема системы интерферометра, состоящей из одночастотного стабилизированного He–Ne-лазера, связанного с акустооптическим модулятором (АОМ), установленным под углом Брэгга φ_B , электрический вход которого через калибратор фазы (КФ) подключен к генератору, осуществляющему модуляцию лазерного излучения, проходящего через модулятор. Выход АОМ оптически связан с интерферометром, что обеспечивает совмещение интерферирующих пучков в плоскости фотоприемника, на выходе которого выделяется электрический сигнал разностной частоты $F = 1,0$ МГц. Генераторный блок связан электрически с помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с опорным входом высокоточного цифрового следящего фазометра, измерительный вход которого подключен к фотоприемному устройству (ФПУ) для выделения

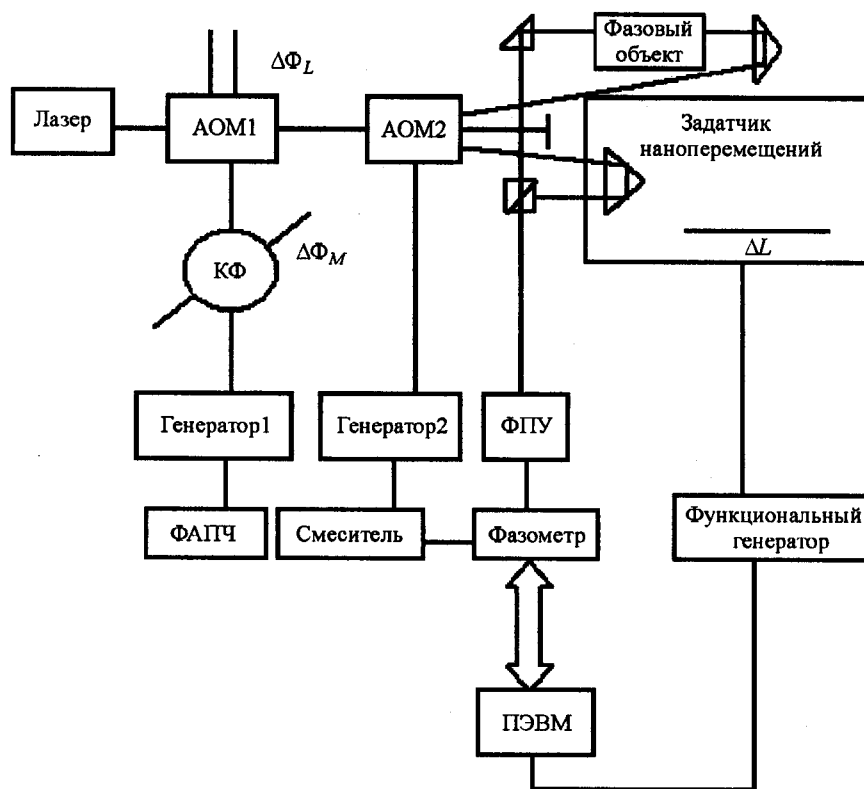


Рис. 5. Структурная схема системы интерферометра

информационного сигнала частоты 1 МГц. Выход фазометра сопряжен с компьютером для последующей обработки результатов измерений. Система обработки данных построена по стандартной схеме, позволяющей оцифровывать аналоговый сигнал и через интерфейс вводить эту цифровую информацию в процессор для последующей математической обработки. Конструктивно интерферометр выполнен в виде отдельного термостабильного малогабаритного оптико-механического блока на основе ситалла.

Исследования стабильности показали, что скорость дрейфа лазерного гетеродинного интерферометра не превышает 10^{-2} градуса фазы за 10 мин, что соответствует чувствительности к линейным смещениям на уровне 0,01 нм. Отличительными особенностями лазерной измерительной системы являются простота оптической схемы, легкость ее юстировки, малые габариты, быстродействие, помехозащищенность и надежность, обусловленная фазовыми цифровыми методами обработки информационного сигнала.

В интерферометре реализован новый метод самокалибровки измерителей перемещений в диапазоне 10^{-9} – 10^{-3} м, основанный на компенсировании (сравнении) измеряемого угла фазового сдвига непрерывного лазерного излучения в диапазоне $(0-360^\circ)N$ ($N=10^6$) с величиной калиброванного значения УФС, задаваемого эталонными фазовращателями, как в радио-, так

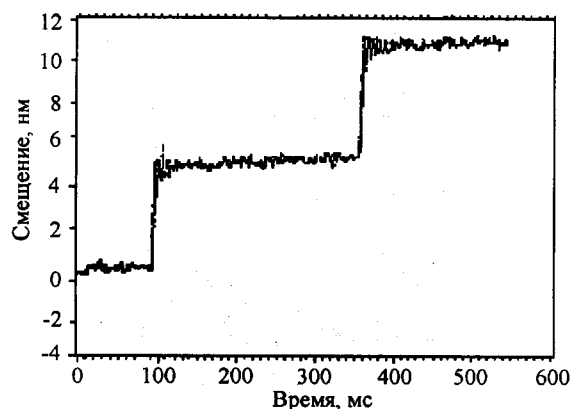


Рис. 6. Результаты измерений смещений, задаваемых магнитострикционным винтом МН-1

и в оптическом диапазоне с погрешностью 0,1 градуса фазы, что соответствует дискретности отсчета линейного перемещения менее 0,1 нм (1 Å) [20].

Применение в составе радиооптического фазового компаратора высокоточного цифрового фазометра позволило создать замкнутое «фазовое кольцо» по электрическому сигналу радиочастоты (F), обеспечивающее прецизионное измерение, задание и регулирование УФС как в радио-, так и в оптическом диапазоне. При этом материализованной мерой УФС в оптическом диапазоне служит акустооптический модулятор. Исследование метрологических характеристик радиооптического фазового компаратора показало, что погрешность измерения и регулирования УФС в оптическом диапазоне составляет 0,05 градуса фазы и что это соответствует линейному перемещению (0,5 Å).

С использованием интерферометра проведена калибровка прецизионной системы нанопозиционирования объекта при помощи магнитострикционного запоминающего силового привода – нановинта МН-1, изготовленного из материала с гигантской магнитострикцией. Результаты измерений приведены на рис. 6. Основная погрешность измерений линейных перемещений системы в диапазоне до 1 мм составила 0,5 нм при дискретности отсчета 0,1 нм и времени измерений 10^{-6} с.

Для подтверждения достоверности результатов измерений сверхмалых перемещений были проведены совместные измерения перемещений стандартного образца атомарно-чистой поверхности высокоориентированного пирографита методами лазерной интерферометрии и сканирующей туннельной микроскопии. Получено пространственное разрешение – межатомное расстояние, равное 0,24 нм, что соответствует постоянной кристаллической решетке пирографита. Тем самым впервые осуществлена привязка параметра кристаллографической решетки к длине волны стабилизированного He-Ne-лазера (рис. 7).

В НИЦПВ создана эталонная установка на основе сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопов и лазерных интерферометров наноперемещений, обеспечивающая измерение линейных размеров объектов по трем координатам с атомным разрешением в реальном масштабе времени [21]. Установка состоит из измерительной ячейки (СТМ/АСМ) с набором

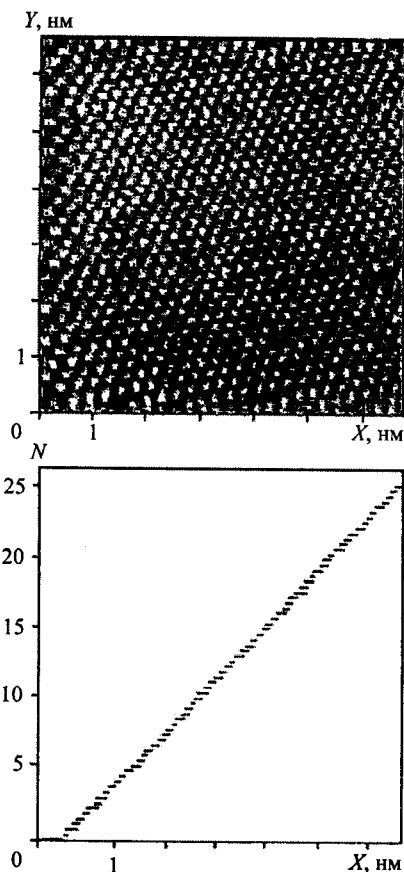


Рис. 7. Результаты интерференционных измерений атомной структуры поверхности стандартного образца ВОПГ (N – число атомов)

зондов, системы позиционирования объекта по двум осям координат (X, Y) и вертикального (по оси Z) смещения острия иглы, прецизионных лазерных интерферометров для измерения наноперемещений по трем осям координат и управляющей электронной системы, сопряженной с персональным компьютером.

Сканирующий зондовый микроскоп предназначен для визуализации с высоким разрешением аттестуемых мер длины при сканировании последних в режиме контактной и неконтактной мод. Аттестуемая мера на держателе вставляется в пружинный механизм, расположенный в трубчатой пьезокерамике, которая закреплена на верхнем столике системы микроперемещений мер. В качестве зонда в сканирующем туннельном микроскопе используется вольфрамовая проволока диаметром 0,3 мкм, острие которой заточено с помощью электрохимического травления. Радиус закругления кончика иглы не более 100 нм. Кантилевер (микрозонд) атомно-силового микроскопа крепится к металлической пластине пьезосканера узла микроскопа. Резонансная частота кантилевера составляет 50 кГц. На электроды пьезокерамики подается пилообразное напряжение для шагового движения образца и обратной связи в целях поддержания постоянного расстояния между зондом и образцом.

Двухкоординатная (по X и Y) система микроперемещений аттестуемых мер состоит из двух столиков, расположенных один над другим и развернутых на 90° относительно друг друга с точностью угловых мер. На нижнем столике располагается объект измерений – мера, на верхнем – микрозонд. Измеряемый объект может смещаться в направлении X , а микрозонд в направлении Y . Такая конструкция обеспечивает компактность и максимальную развязку по X - и Y -направлениям. Смещение острия микрозонда вдоль нормали к поверхности образца (по оси Z) производится с использованием пьезосканера, обеспечивающего микропозиционирование зонда в диапазоне $0\text{--}1$ мкм с шагом $0,1$ нм.

Система сбора, обработки данных (СОД) и управления режимами работы установки состоит из персонального компьютера и интерфейсной платы аналого-цифрового преобразователя.

В интерферометре предусмотрена абсолютная калибровка линейных перемещений по каждой координате X , Y , Z в долях длины волны одномодового стабилизированного He–Ne-лазера с дискретностью отсчета $0,1$ нм и использованием аттестованных фазовращателей оптического диапазона. Для получения топографического изображения участка поверхности объекта с минимальными искажениями, связанными с нелинейностью и гистерезисом пьезокерамики, проводилась калибровка пьезосканера с использованием результатов интерферометрических измерений. Достигнута воспроизводимость результатов измерений линейных перемещений независимо по X -, Y -координатам менее 1 нм в диапазоне перемещений $3 \times 5 \times 1$ мкм за время измерений < 1 мин. Величина теплового дрейфа не превышала $0,5$ нм/мин.

Аттестация эталонной установки проводилась путем сличения с помощью специальных периодических мер малых длин – эталонов сравнения. Были сличены результаты измерений периодов специальных мер малой длины на эталонных лазерных интерференционных дифрактометрах (ЛИД) ВНИИМ (Россия), МБМВ (Франция) и эталонной установке на основе СТМ/АСМ и лазерных интерферометров ФГУП НИЦПВ (Россия). Результаты измерений периода мер сравнения приведены в табл. 3.

Результаты сличений периодических мер сравнения в нанометровом диапазоне, проведенных на эталонных установках, работающих на различных физических принципах (ЛИД и АСМ), показали, что расхождение не превышает 1 нм.

5. Концепция метрологического обеспечения нанометрии. Обеспечение единства линейных измерений в нанометровом диапазоне – основа нанометрии – базируется на комплексном подходе, включающем создание Го-

Т а б л и ц а 3

Организация	Номинальный период, нм	
	400	280
ВНИИМ (Санкт-Петербург)	$391,0 \pm 0,6$	$277,0 \pm 0,3$
МБМВ (Париж)	$391,0 \pm 0,5$	$277,0 \pm 0,3$
ФГУП НИЦПВ (Москва)	$391,0 \pm 0,4$	$277,0 \pm 0,4$

сударственного специального эталона единицы длины в диапазоне 10^{-10} – $3 \cdot 10^{-6}$ м, способов и средств передачи размера единицы высокоточным рабочим средствам измерений.

Значительный парк средств измерений длины в микро- и нанометровом диапазонах, а также интенсивное развитие нанометрии в ведущих странах мира определяют необходимость развития работ по созданию системы метрологического обеспечения измерений длины в нанометровом диапазоне и увеличение диапазона Государственного первичного эталона единицы длины (ГЭТ 2-85) вплоть до 10^{-10} м.

Известно, что основой системы метрологического обеспечения линейных измерений является структура передачи размера единицы длины от Государственного эталона единицы длины рабочим средствам измерений, регламентированная соответствующей поверочной схемой. Практическая реализация структуры передачи размера единицы длины в нанометровом диапазоне зависит от наличия соответствующих эталонных средств измерений на каждой ступени передачи.

Государственный специальный эталон единицы длины в диапазоне 10^{-9} – $5 \cdot 10^{-6}$ м должен представлять собой интерференционный компаратор на основе атомно-силового микроскопа, обеспечивающий трехмерные измерения линейных размеров со стандартной неопределенностью 0,1 нм.

Воспроизведение и передача размера единицы длины в нанометровом диапазоне в соответствии с определением метра должны осуществляться интерференционным методом с применением длины волны высокостабилизированного He–Ne-лазера. В качестве устройств передачи размера единицы длины по координатам (X , Y , Z) необходимо использовать: а) эталонные лазерные интерферометры, обеспечивающие измерения малых линейных перемещений в реальном масштабе времени в диапазоне 10^{-9} – 10^{-3} м со стандартной неопределенностью не более 0,5–1 нм; б) специальные периодические (шаговые) меры и стандартные образцы нанорельефа поверхности – эталоны сравнения.

В состав вторичных эталонов в области малых длин должен быть включен комплекс эталонных измерительных интерференционных установок для передачи размера единицы длины всей совокупности типоразмеров мер малой длины, определяемой международной метрологической практикой и результатами международных сличений.

Для обеспечения единства измерений в нанометрии в НИЦПВ создан и аттестован комплекс эталонных средств измерений, включающий:

– эталонный компаратор на основе растрового электронного микроскопа с разрешением 5–8 нм и стандартные образцы (ГСО 5819-91 и ГСО 6261-93), предназначенные для передачи размера единицы длины в диапазоне 0,05–50 мкм с расширенной неопределенностью 5–20 нм;

– эталонную интерференционную установку на основе атомно-силового микроскопа и лазерных интерферометров, предназначенную для аттестации трехмерной топографии мер длины в диапазоне 10^{-9} – $3 \cdot 10^{-6}$ м со стандартной неопределенностью менее 1 нм.

– комплект специальных периодических мер и стандартных образцов нанорельефа поверхности, предназначенный для передачи размера единицы длины в диапазоне 10^{-8} – $5 \cdot 10^{-5}$ м со стандартным отклонением 1–5 нм.

Высокие метрологические характеристики созданных эталонных средств измерений подтверждаются результатами международных сличений в области нанометрии. Создание системы метрологического обеспечения нанометрии позволит обеспечить высокую достоверность и единство измерений, повысить качество, надежность и конкурентоспособность отечественной продукции с выходом на мировой рынок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **The National Technology Roadmap for Semiconductors** // SIA. San Jose, CA, USA. 1994. Н. 168.
2. **International Technology Roadmap for Semiconductors** // <http://public.itrs.net>
3. **Postek M. T., Ho H. J., Weese H. L.** Dimensional metrology at the nanometer level: Combined SEM and PPM // Proc. SPIE. 1997. **3050**. P. 250.
4. **Dixon R. G., Kining R., Tsai V. W. et al.** Dimensional metrology with the NIST calibrated atomic force microscope // Proc. SPIE. 1999. **3677**.
5. **Lowney J. R., Vladar A. E., Postek M. T.** High-accuracy critical-dimension metrology using a scanning electron microscope // Proc. SPIE. 1996. **2725**. P. 515.
6. **Villarrubia J. S., Dixon R. G., Jons S. N. et al.** Intercomparison of SEM, AFM, and electrical linewidths // Proc. SPIE. 1999. **3677**. P. 587.
7. **Schneir J., Villarrubia J. S., NeWaid T. H. et al.** Increasing the value of atomic force microscope process metrology using a high-accuracy scanner, tip characterization, and morphological image analysis // Journ. Vac. Sci. Technol. 1996. **B14**, N 2. P. 1540.
8. **Larrabee R. D., Silver R. M., Davidson M.** Optical line width models: Then and now // Proc. SPIE. 1999.
9. **Postek M. T.** Scanning electron microscope-based metrological electron microscope system and new prototype scanning electron microscope magnification standard // Scanning Microscopy. 1989. **3**, N 4. P. 1087.
10. **Богданович О. В., Желкобаев Ж., Календин В. В. и др.** Измерение малых длин на основе растрового электронного микроскопа // Измер. техника. 1985. № 11. С. 31.
11. **Биннинг Г., Рорер Г.** Сканирующая электронная микроскопия – от рождения к юности // УФН. 1988. **151**, № 2. С. 261.
12. **Binning G., Quate C.F., Gerber Ch.** Atomic force microscope // Phys. Rev. Lett. 1986. **56**. P. 930.
13. **Быков В. А., Лемешко С. В., Новиков Ю. А., Раков А. В.** Исследование субмикронных канавок с помощью атомно-силовых микроскопов // Тез. докл. 12-й Росс. симп. по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. Черногловка. 2001. С.173.
14. **Pat. 4068381 US** /D. B. Ballard.
15. **Баканава Е. С., Календин В. В., Невзорова Л. Н., Щигов Н. Н.** Штриховые меры для калибровки растровых электронных и оптических микроскопов // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. **48**, № 12. С. 2339.
16. **Календин В. В., Козлитин Л. И., Никитин Ф. В., Сретенский В. И.** Метрологическое обеспечение измерений сверхмалых размеров с использованием теоретических моделей, мер и природных констант // Измер. техника. 1996. № 11. С. 15.

17. Волк Ч. П., Горнев В. С., Календин В. В. и др. Универсальная мера для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии // Электрон. пром-сть. 1999. № 4.
18. Волк Ч. П., Горнев Е. С., Новиков Ю. А. и др. Линейная мера микронного, субмикронного и нанометрового диапазонов для измерений размеров элементов СБИС на растровых электронных и атомно-силовых микроскопах // Микроэлектроника. 2002. 31, № 4. С. 243.
19. Todua P. A., Zhelkobaev Z., Kalendin V. V. Fast laser two frequency interferometer-phasemeter // Proc. of 5th IMECO-TC14 Symp. on Dimensional Metrology in Production and Quality Control. ISMOC-95. Zaragoza, Spain. 1995.
20. Gorbatiuk S. N., Zhelkobaev Zh., Kalendin V. V. et al. Radiooptical phase comparator of nanometre band // European metrological conf. St. Peterburg, 1992. P. 48.
21. Kalendin V. V., Chernyakov V. N., Todua P. A., Zhelkobaev Zh. Etalon interferometric comparator for 3D measurements of surface topography, based on the scanning tunnel and atomic force microscopes // Proc. of the 9th Intern. Precision Eng. Seminar. Stadthalle-Braunschweig, Germany, 1997. P. 28.

*Научно-исследовательский центр
по изучению свойств поверхности и вакуума*

*Поступила в редакцию
2 февраля 2004 г.*