

Методики и средства измерений линейных размеров в нанометровом диапазоне

Всесторонне и наиболее полно состояние измерений линейных размеров нанобъектов, соответствующие методики и средства измерений описаны в [11], откуда и заимствованы приводимые в данном разделе сведения и оценки развития этого важнейшего направления нанометрологии.

Интенсивное развитие нанотехнологии требует создания системы метрологического обеспечения измерений, в первую очередь длины в нанометровом диапазоне. Большинство имеющихся средств измерений длины в нанометровом диапазоне основано на таких физических принципах, как растровая электронная и оптическая микроскопия, сканирующая зондовая микроскопия, лазерная интерферометрия и фазометрия. В настоящее время рядом ведущих зарубежных фирм Jeol (Япония), Digital Instruments, Hewlett Packard (США), Burleigh Perten (Германия), Nanosurf, NFL (Великобритания) производится широкий спектр указанных средств. Следует отметить, что и наши производители (например, АОЗТ «НТ-МДТ», «КПД», Зеленоград) осуществляют разработку и выпуск контрольно-измерительного оборудования, реализующего принципы сканирующей зондовой микроскопии.

На сегодня большинство средств измерений находится вне сферы метрологического обслуживания, не проходит сертификационных испытаний и не обеспечено средствами калибровки и поверки. Все это снижает метрологический уровень контрольно-измерительных операций при производстве изделий микро-, наноэлектроники, не гарантирует единства и достоверности данных измерений. Анализ состояния измерений длины в микро- и нанометровом диапазонах показывает, что полный комплекс метрологического обеспечения таких измерений, включающий в себя эталоны, установки высшей точности, меры малой длины и стандартные образцы нанорельефа поверхности, аттестованные рабочие средства измерений, а также соответствующая Государственная поверочная схема и нормативная документация находятся пока еще в стадии разработки.

Следует отметить, что страны, занимающие ключевые позиции в микроэлектронике (Япония, США, Германия, Великобритания и др.), придают вопросам внедрения метрологии в практику линейных измерений в микро- и нанометровом диапазонах первостепенное значение.

В США реализуется Национальная программа метрологического обеспечения микроэлектроники (National Semiconductor Metrology Program). Программа опирается на прогноз потребности в метрологическом обеспечении, который создавался при участии NIST и оформлен в виде национального технологического прогноза для полупроводникового производства (National Technology Roadmap for Semiconductors). Часть этого прогноза посвящена линейным измерениям. В табл. 3.5 представлен ожидаемый прогресс в уменьшении размеров топологических элементов микросхем для важнейших линейных величин, которыми они определяются.

Программа метрологического обеспечения предполагает решение следующих важнейших задач:

- создания эталонов единицы длины в нанометровом диапазоне на основе использования одновременно растрового электронного и сканирующего зондового микроскопов, трехкоординатного интерференционного компаратора на основе атомно-силового микроскопа и рабочего эталона единицы длины на основе конфокального микроскопа и средств их аттестации, способов и устройств передачи единицы длины рабочим средствам измерений;

- создания прецизионной технологии получения эталонов единицы длины в виде трехмерных наноструктур на атомарно-гладкой поверхности полупроводниковых материалов (Si, GaAs) с подсчетом числа атомных плоскостей в каждом из направлений (Atombased Metrology), мер ширины, рассовмещения на основе моно218 Раздел 3. Методы и средства метрологического обеспечения исследований... кристаллического кремния на диэлектрике с атомарно-гладкими поверхностями и мер для определения числа плоскостей в каждом направлении (Single Crystal CD and Overlay Reference Material), а также технологии изготовления игл с воспроизводимой формой для сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), методов и средств их калибровки;

Таблица 3.5

Изменение геометрических размеров элементов в полупроводниковой микроэлектронике США на период 1995-2010 гг.

Технологическая характеристика	Год					
	1995	1998	2001	2004	2007	2010
Диаметр пластины, мм	200	200	300	300	400	400
Критический размер, нм	350	250	180	130	100	70
Технологический допуск на критический размер, нм	35	25	18	13	10	7
Погрешность измерений критического размера, нм	3,5	2,5	1,8	1,3	1,0	0,7
Допуск на совмещение, нм	100	75	50	40	30	20
Погрешность совмещения, нм	10	7,5	5	4	3	2
Шаг металлической разводки, мкм	1,0	0,8	0,55	0,35	0,3	0,3
Погрешность измерения шага разводки, нм	10	8	5,5	3,5	3,0	3,0

- разработки теоретических (математических) моделей взаимодействия тестирующих потоков растровых электронных микроскопов (РЭМ), СЗМ и оптических микроскопов с различными наноструктурами и микроструктурами и моделей решения задач деконволюции для определения ширины мер с помощью игл;
- разработки систем нанопозиционирования нанообъектов и технологии управления их движением для СЗМ с субнанометровым разрешением в диапазоне длин до 50 мм (50x50 мм) (Advancing the State-of-art Stage for Subatomic Scale Displacement Metrology Project).

Отсутствие достаточного метрологического обеспечения твердотельной электроники в нашей стране является одной из основных причин нашего отставания в этой области от развитых стран. В связи с этим становится важной задача разработки высокоточных методов и прецизионных средств измерений малых длин в микро-и нанометровом диапазонах, а также обеспечения единства этих измерений.

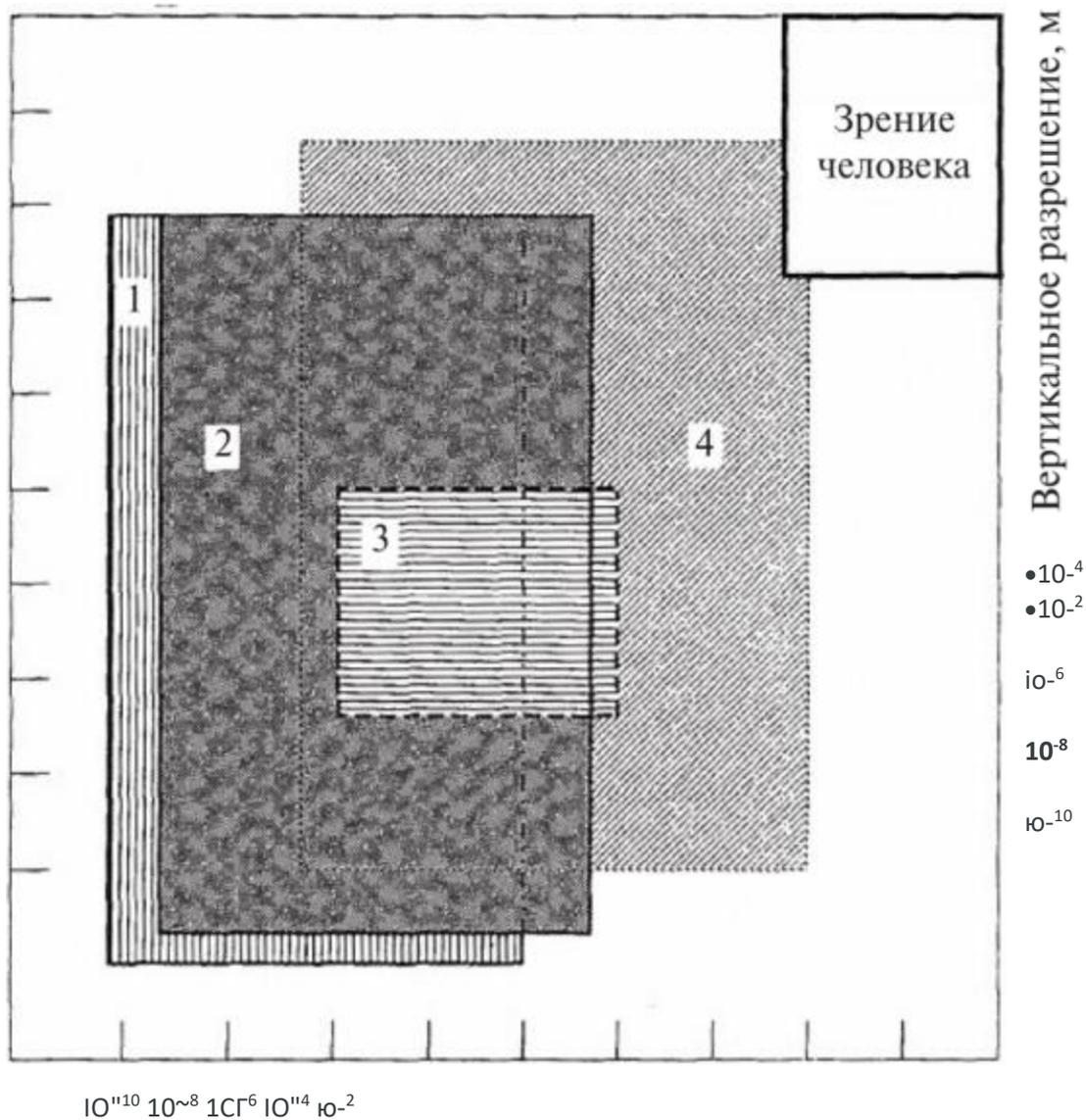
Следует отметить, что внедрение метрологии в эту специфическую область измерений связано с определенными трудностями, а именно:

- • необходимостью разработки прецизионной технологии получения специальных тест-объектов;
- • многообразием наблюдаемых видов специальных тест-объектов и стандартных образцов с различными вариантами топографии поверхности;
- • большим числом контролируемых параметров в процессе измерений;
- • отсутствием единства в методах измерений линейных размеров структурных элементов тест-объектов и в методах поверки средств измерений;
- • отсутствием достаточного количества нормативной документации на методы и средства измерений (поверки) малых длин.

Для успешного решения данной проблемы необходим комплексный подход, заключающийся в разработке специальной технологии получения тест-объектов и стандартных образцов нанорельефа поверхности, анализе принципиальных возможностей различных методов линейных измерений, выборе наиболее эффективных в метрологическом отношении методов и их технической реализации, оптимальной с точки зрения стабильности и разрешающей способности.

Основным инструментом для наблюдения и измерений (качественной и количественной оценки) сверхмалых объектов являются микроскопы, использующие различные физические принципы и средства воздействия на объект: световые потоки, электронные и ионные пучки, акустоэлектронные взаимодействия, рентгеновские лучи, туннельные потоки носителей заряда, силовые поля на сверхмалых расстояниях и т.д.

Микроскопия прошла сложный путь развития, и каждое ее достижение сопровождалось прежде всего увеличением разрешающей способности (рис. 3.1), а также существенным ослаблением воздействия на объект в процессе измерений, облегчением работы экспериментатора в отношении юстировки, наблюдения по большому полю (введение растрового режима), автоматизации сбора, обработки и отображения результатов измерений на дисплее или жестком носителе. В настоящее время в промышленности для измерений малых длин используется значительный парк приборов, основанных на методах физической оптики и электронной микроскопии.



Горизонтальное разрешение, м

Рис. 3.1. Сопоставление пространственного разрешения для различных методов микроскопии: 1 — сканирующая туннельная микроскопия; 2 — атомно-силовая микроскопия; 3 — просвечивающая микроскопия; 4 — сканирующая электронная микроскопия

Оптическая микроскопия

Оптический микроскоп является основным средством контроля линейных размеров в микроэлектронике. Его высокие эксплуатационные качества — простота, надежность, слабое влияние на объект измерений, высокая скорость получения результата, а также относительно низкая стоимость часто (особенно в промышленности) заставляют отдавать ему предпочтение среди других средств измерений, таких как, например, растровый электронный или атомно-силовой микроскопы.

Техническое совершенствование оптических микроскопов превратило их в высокоавтоматизированные измерительные инструменты (фотоэлектрические, телевизионные микроскопы), в которых профиль изображения контролируемого элемента регистрируется и обрабатывается с помощью компьютера. Это позволило исключить субъективную погрешность и достичь воспроизводимости измерений линейных размеров в тысячные доли микрометра.

Впечатляющий прогресс в области метрологического обеспечения линейных размеров в микроэлектронике в 1960—1970 гг., достигнутый благодаря исследованиям, проведенным в Национальном институте стандартов и технологий (NIST) и Национальном бюро стандартов США (NBS), позволил уменьшить систематическую погрешность измерений топологических элементов на фотошаблонах в диапазоне размеров от 20 мкм до сотых долей микрометра. Но эти многообещающие успехи на начальном этапе становления технологии контроля линейных размеров в микроэлектронике не дали возможности преодолеть объективные сложности, существующие в контроле линейных размеров элементов топологии интегральных микросхем.

Ограничения, существующие для оптических микроскопов при контроле малых размеров интегральных микросхем, обычно связывают с ограничением их разрешающей способности. Однако для микроэлектроники на первый план часто выступают ограничения, связанные с самими объектами контроля, с их геометрией и оптическими свойствами. Эти характеристики заметно влияют на изображение элементов топологии микросхем даже при сравнительно больших размерах и существенно возрастают при значениях, близких к тем, которые определяют разрешающую способность оптики таких микроскопов. При разнообразии оптических (коэффициенты отражения от нижнего и верхнего основания элемента и оптического сдвига фазы на границе элемента) и геометрических (клин травления, «забор», «клюв» и др.) свойств элементов топологии микросхем разрешающая способность и погрешность измерений зависят от диапазона измерения линейных размеров. Так, для элементов одной и той же ширины, но разной толщины данные при измерении ширины этих элементов могут различаться приблизительно на 0,3 мкм.

Указанная особенность не является единственным или главным препятствием, затрудняющим контроль малых линейных размеров микросхем. Серьезное ограничение связано с физической особенностью самого метода контроля — микроскопии. Действительно, для достижения высокого разрешения объекта контроля в оптических микроскопах используются объективы с высокой числовой апертурой. Однако при этом глубина резкости уменьшается обратно пропорционально квадрату значения апертуры, что формально приводит к «планаризации» контролируемого объекта с малыми размерами, ширина которого реально сравнима с его толщиной. При наличии клина на краю такого элемента размер, определенный по тонкому слою верхнего или нижнего плато, не способен адекватно отразить его ширину.

Трудности измерения ширины, а также связанные с самим объектом контроля, дополняются препятствиями, возникающими в связи с применением оптического микроскопа даже в пределах его разрешающей способности. Так, серьезной проблемой является освещение. Использование для этой цели белого света удобно в эксплуатационном плане — увеличивается отношение сигнал-шум при измерениях, исключается образование слабоконтрастных изображений при визуальных наблюдениях. Однако высокая чувствительность к коэффициенту отражения для различных длин волн потенциально приводит к потере чувствительности и изменению ширины линии.

Примерно таким же образом влияет на изображение контролируемого элемента и слабая когерентность света в освещающем пучке. Увеличение углов падения света на образец, выгодное

энергетически, приводит к образованию теневых эффектов на границах изображения, зависимости коэффициентов отражения от углов падения и в конечном счете — к «размыванию» этих границ, которое по значению больше, чем то, которое определяется чисто дифракционными эффектами.

Таким образом, качественно более сложный объект контроля в интегральных микросхемах (по сравнению с плоскими, бинарными по своим оптическим свойствам объектами фотошаблонов) выявил принципиальные ограничения метода традиционной оптической микроскопии.

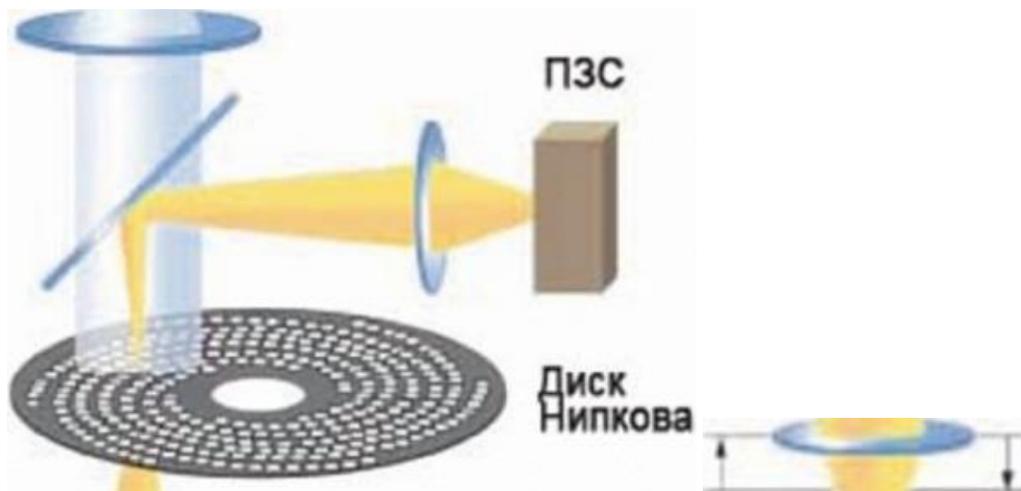
Неудовлетворенная потребность в контроле линейных размеров интегральных микросхем методом традиционной оптической микроскопии привела в последнее время к появлению новых методов измерений, которые приспособлены или специально предназначены для использования в микроэлектронике. Как видно из приведенного ниже материала, стимулом к их созданию и совершенствованию явились те препятствия, с которыми не смогла справиться традиционная микроскопия.

Конфокальная сканирующая микроскопия

Основным отличием конфокальной микроскопии (КМ) от обычной является построение трехмерного изображения исследуемого объекта путем сканирования его горизонтальных сечений.

Одним из способов сканирования в конфокальной микроскопии является использование сканирующего диска — диска Нипкова. Диск Нипкова представляет собой набор точечных диафрагм, расположенных по спирали, таким образом, что за один оборот диска засвечиваются все пиксели матричного фотоприемника и формируется оптический срез. Такая система сканирования называется *тандемной*. Оптическая система микроскопа представлена на рис. 3.2.

I Источник белого света



Микрообъектив

Рис. Структурная схема конфокального микроскопа



Объект

Широкий параллельный пучок от источника белого света (галогеновая лампа) засвечивает участок вращающегося диска с диафрагмами. Этот участок с помощью микрообъектива микроскопа переносится на исследуемый объект. Отраженное от объекта излучение повторно проходит через диафрагмы и, отражаясь от полупрозрачного зеркала, попадает на матричный фотоприемник — камеру. При этом через диафрагмы проходит только та часть излучения, которая отражается от плоскости, оптически сопряженной с плоскостью диска. В результате при сканировании вдоль оси Z сигнал, отраженный от этой плоскости, дает острый максимум. Мощность сигналов от этих точек, не лежащих в этой плоскости, существенно ниже. Записывая сигналы от всех точек фотоприемника при сканировании вдоль Zn затем привязывая координаты максимумов к координатам сканирующей системы, строят профиль поверхности исследуемого объекта.

Таким образом, с помощью конфокального микроскопа возможно построение трехмерного изображения посредством послойного сканирования образца по глубине.

В отличие от традиционного микроскопа, для КМ увеличение числовой апертуры объектива и уменьшение длины волны света приводят к росту вертикального его разрешения и получению большей информации о переходной области на краю элемента. Кроме того, малая глубина резкости в КМ дает возможность исключить фон, создаваемый другими слоями в картине изображения, и таким образом получить контрастное изображение даже для малоконтрастных объектов. Отсутствие интерференции лучей, отраженных от верхнего и нижнего плато, позволяет получить изображение, не зависящее от высоты элемента и оптических характеристик материала слоя. Использование монохроматического источника излучения в КМ исключает наложение нескольких профилей изображения, создаваемых многими световыми пучками с разными длинами волн (как это происходит в обычном микроскопе), что повышает чувствительность измерительного прибора к изменению ширины контролируемого элемента. На основании теоретических исследований делается вывод о более высоком латеральном разрешении КМ по сравнению с обычным микроскопом при одинаковых параметрах используемой в них оптики.

Теоретические выводы относительно более совершенных (по сравнению с традиционным оптическим микроскопом) возможностей КМ получили экспериментальное подтверждение. Так, выявлено, что диапазон линейных размеров, который можно контролировать на конфокальном микроскопе при длине волны света 0,486 мкм, составляет около 0,2 мкм. Вертикальное сканирование

контролирует 3.3. Методики и средства измерений линейных размеров в нанометровом... 225 мого образца позволило измерить его ширину отдельно по верхнему и нижнему плато. В результате оказалось возможным контролировать основание клина травления по фоторезистивной маске с помощью оптического метода.

3.3.4. Сканирующая микроскопия ближнего поля

Данная методика основана на сканировании объекта контроля зондирующим пучком, прошедшим через диафрагму в непрозрачном экране размером менее длины волны света [10].

Электромагнитное поле за такой диафрагмой «провисает» на расстояние, примерно равное половине длины волны света, и взаимодействует с участком поверхности объекта контроля, если он расположен на расстоянии, меньшем указанного значения. Отраженный или прошедший свет регистрируется чувствительным фотоприемником. В случае, если поверхность контролируемого объекта находится на расстоянии, большем половины длины волны света, инициируется процесс вертикального сканирования до появления сигнала от фотоприемника. Как видно, по принципу действия сканирующий микроскоп ближнего поля подобен туннельному или атомно-силовому микроскопу.

Основное достоинство сканирующей микроскопии ближнего поля (СМБП) — высокая разрешающая способность. Наименьший размер элемента, полученного с помощью СМБП, составляет 20 нм при длине волны света 0,486 нм. В изображении контролируемого элемента отсутствуют дифракционные или интерференционные эффекты, затрудняющие определение его границ. Отсутствуют затруднения и в контроле относительно толстых элементов — как и в методе КД СМ, они преодолеваются чисто техническим методом — послойным сканированием образца.

Отличительной особенностью СМБП по сравнению с атомно-силовым микроскопом является чувствительность к оптическим характеристикам поверхности контролируемого образца, длине волны света, люминесценции и др.

Микроскопы ближнего поля уже серийно выпускаются и доступны для промышленного использования при создании интегральных микросхем. К настоящему времени разработаны и другие методы и средства контроля линейных размеров в микроэлектронике: лазерная сканирующая микроскопия, фазово-компьютерная микроскопия, интерференционная микроскопия с использованием зонда когерентности. Однако эти средства измерений пока не получили широкого распространения при создании микросхем.

3.3.5. Лазерная дифрактометрия

Для измерений микрометровых и субмикрометровых размеров разработаны лазерные дифрактометры (ЛД), в которых ширина (период) элемента определяется по параметрам дифракционного спектра, возникающего при освещении одного или группы элементов в виде дифракционной решетки пучком когерентного света. Основная задача в дифракционном методе измерений — восстановление геометрической структуры элементов тест-объектов по дифракционной картине интенсивности. Это требует проведения теоретических исследований по восстановлению профиля периодической структуры по значениям интенсивности главных дифракционных максимумов (ГДМ) с использованием математических моделей, т.е. связано с решением обратной задачи дифракции. Достоинством применения дифракционного метода является простота измерений, возможность определения статистических параметров величин без проведения отдельных наблюдений непосредственно с автоматизированной обработкой результатов измерений с помощью компьютера.

Основная методическая погрешность измерений ширины элемента топологии объекта связана с приближенными расчетами ее значения при использовании скалярной теории дифракции и для размеров 0,4—20 мкм может составлять 0,1—0,3 мкм.

Аттестация ЛД, реализующих косвенный метод измерений, может быть проведена без использования мер сравнения по значениям интенсивности (углового положения ГДМ)

дифрагированного света с использованием аттестованных средств измерений угла и применяемых в оптической радиометрии с абсолютной привязкой к его длине волны. Следует отметить, что для восстановления геометрической структуры измеряемых элементов необходимо знание общего вида и формы элементов топологии, которые априори неизвестны, что, в свою очередь, приводит к некорректности однозначного восстановления топологии поверхности и затрудняет вычисление размеров тест-структур из анализа дифракционной картины.

3.3.6. Растровая электронная микроскопия

Перспектива развития измерений длины в субмикрометровом диапазоне связана с применением растрового электронного микроскопа (РЭМ). Высокая разрешающая способность, большой диапазон увеличений (до 100 000 и выше), большая глубина фокусировки (~ 100 мкм), многообразие режимов работы и возможность получения информации об объекте в виде электрического сигнала дают возможность разработки высокочувствительного средства измерений линейных размеров на основе РЭМ.

Измерения линейных размеров с помощью РЭМ могут проводиться двумя способами. В первом РЭМ используется как средство визуализации и позиционирования микрообъекта, а измерения проводятся независимо с использованием методов лазерной интерферометрии. Второй способ заключается в непосредственном измерении размеров в поле зрения РЭМ по задаваемому увеличению. Следует отметить, что второй способ измерений аналогичен измерению линейных размеров с помощью оптических микроскопов. В этом случае должны быть известны погрешность увеличения РЭМ и методика проведения измерений по задаваемому увеличению. В данной методике РЭМ выступает как компаратор, сравнивающий измеряемый объект с эталонной мерой, по которой градуируется его увеличение. Такое сравнение позволяет избавиться от погрешности определения увеличения РЭМ, которая в диапазоне до 20 000 может достигать 30%.

Для исключения погрешности, обусловленной искажением изображения на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) из-за нелинейности развертки, измерения необходимо проводить без визуализации структуры объектов по профилю детектируемого видеосигнала. Такой способ измерений размеров элементов требует наличия аттестованных периодических эталонных мер малой длины (аттестация этих мер может быть проведена с использованием метода лазерной дифрактометрии).

Более высокую точность и воспроизводимость результатов измерений малых длин дает метод прямых непосредственных измерений с использованием лазерных интерферометрических систем. Эталонной мерой в этом случае служит длина волны лазерного излучения, относительная погрешность измерений которой для He-Ne-лазера составляет 10^{-9} . Кроме того, использование в интерферометрической системе лазерного излучения с высокой пространственно-временной когерентностью, обеспечивающей проведение измерений линейных перемещений в широком динамическом диапазоне, а также фазовых методов обработки информационного сигнала позволяет достигнуть погрешности измерений ~0,1 нм, что существенно выше предела разрешения РЭМ. К числу факторов, ограничивающих точность измерений при таком методе, относятся конечность размеров электронного зонда, его пространственно-временная нестабильность, разрешение интерферометра, неточность установки тест-объекта и вибрации.

В настоящее время современные модели РЭМ выпускаются рядом фирм, среди которых можно назвать Amray, Biorad, Cambridge, Etec, Hitachi, Jeol, Nanometric, Philips. Практически все РЭМ этих

			ди мо- сть, %					
Amray Inc, модель 1700, США	0,1-500	1	1	2	55	80	Погрешность 3 мкм. Воспроизводимость 3 мкм	Лазерный интерферометр. Приставка для анализа профиля интенсивности (снятие профиля в 512 сечениях)
Cambridge Instr. Inc, модель S209, Великобритания	0,1-10	±2	±2		210	210		Лазерный интерферометр
Hitachi Instr. Dev, модель 570, Япония	0,5-100	+5			100	100	Воспроизводимость 0,5 мкм	Лазерный интерферометр. Время измерений 10 с
JEOL, модель JEPAS 1000, Япония	0,1-100	3	1	1,5	100	100	Воспроизводимость 2 мкм	Приставка для анализа профиля интенсивности
Carl Zeiss, модель ZRM-20, Германия	0,5-100	±0,05	±0,03		160	160	Погрешность 0,5 мкм	Двухлучевой интерферометр с

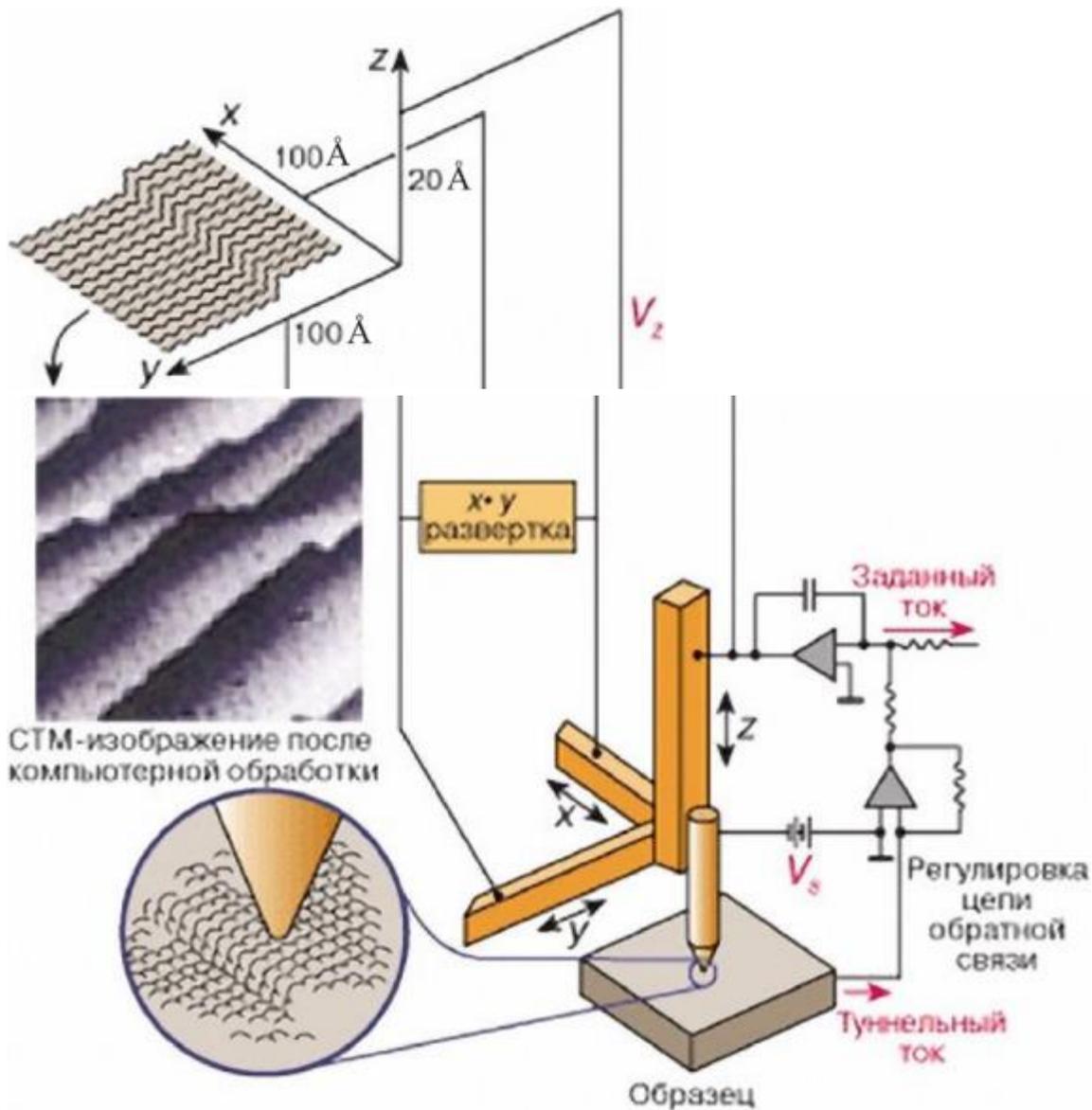


Рис. 3.3. Принцип работы СТМ [39]

На рис. 3.4 и 3.5 представлены СТМ-изображения атомной структуры поверхности графита и никелевой пленки, напыленной на стекло.

Необходимо подчеркнуть следующие достоинства методики измерений линейных размеров с помощью СТМ:

- неразрушающий характер измерений, обусловленный отсутствием механического контакта и низкой энергией туннелирующих электронов;
- возможность проведения измерений как в вакууме, так и при атмосферных условиях, а также в диэлектрических жидкостях;
- возможность работы в широком диапазоне температур;

- • относительно высокая скорость формирования изображения измеряемого объекта с атомным разрешением.

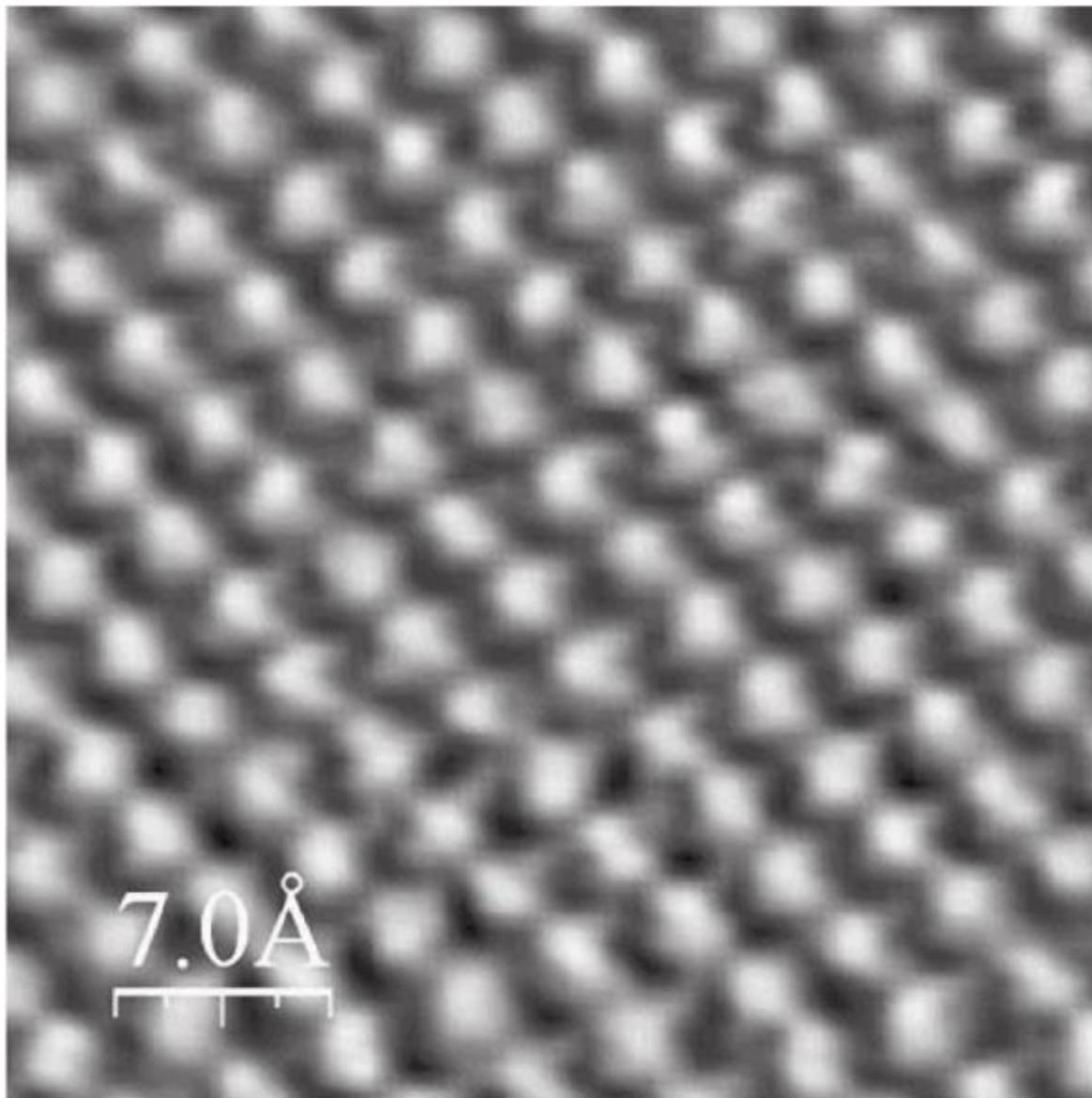


Рис. 3.4. СТМ-изображение атомной структуры поверхности графита

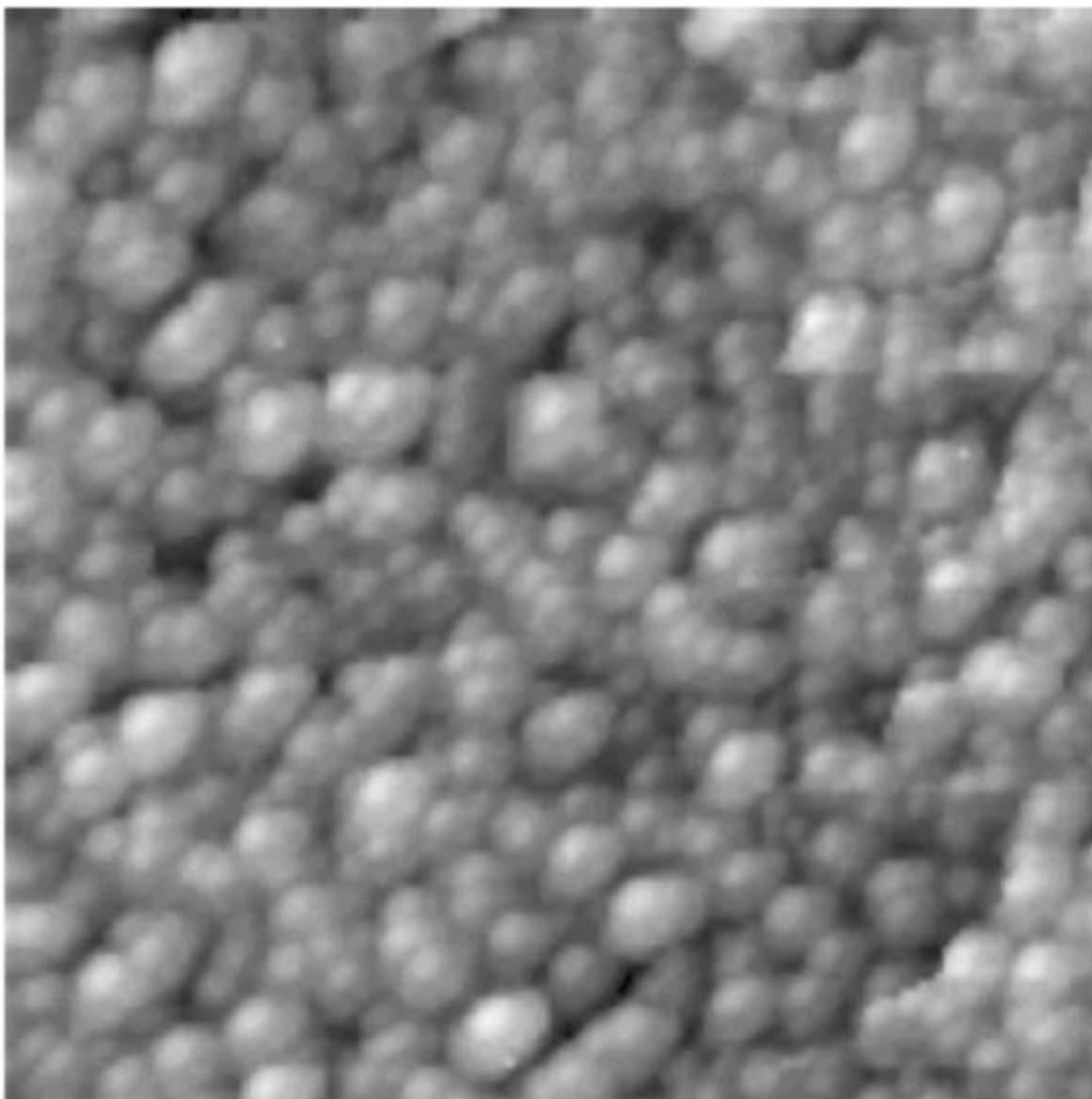


Рис. 3.5. СТМ-изображение поверхности никелевой пленки, напыленной на стекло

Получившая уже достаточно широкое распространение сканирующая туннельная микроскопия, хотя и обладает значительно более высоким разрешением, чем РЭМ, однако не позволяет напрямую получать изображение поверхности непроводящих материалов. Кроме того, на точности отображения рельефа поверхности в СТМ заметно сказываются плотность электронных состояний вблизи поверхности и работа выхода, наличие природных и индуцированных током иглы СТМ адсорбатов.

3.3.8. Атомно-силовая микроскопия

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) поверхности, предложенная в 1986 г., основана на эффекте силового взаимодействия между близко расположенными твердыми телами. В отличие от СТМ, метод АСМ пригоден для проведения измерений как на проводящих, так и на непроводящих

поверхностях не только в вакууме, но и на воздухе и в жидкой среде. Важнейшим элементом АСМ является микрозонд (кантилевер), на конце которого располагается диэлектрическое острие с радиусом кривизны R (рис. 3.6), к которому с помощью трехкоординатного манипулятора подводится поверхность исследуемого образца на расстояние $d = 1,0—10$ нм.

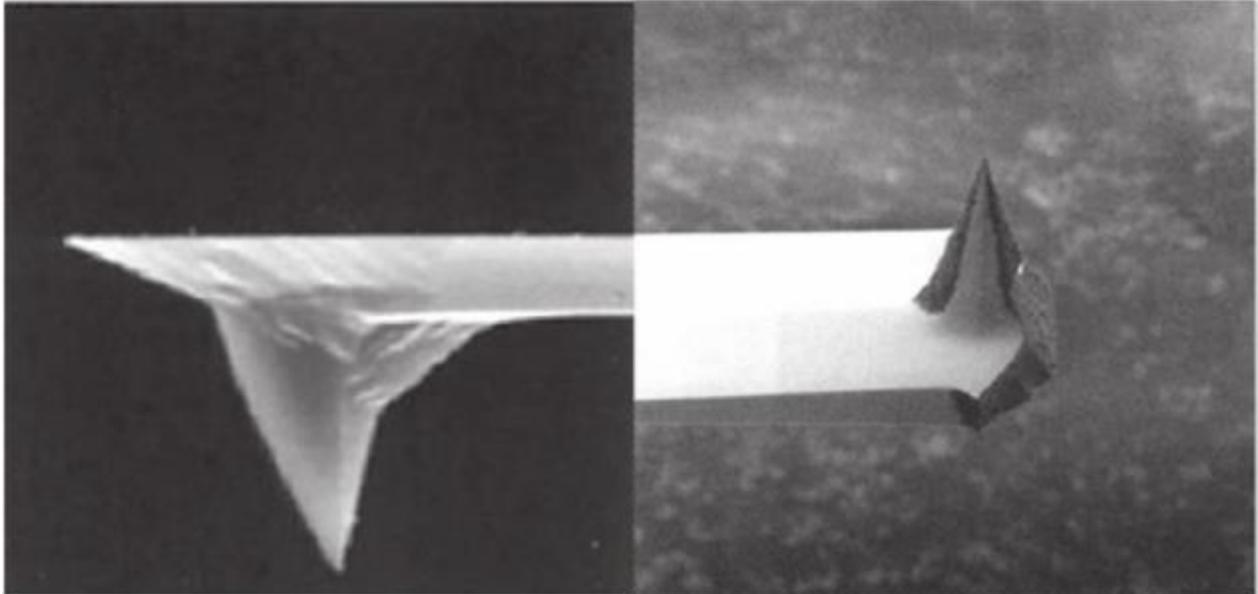


Рис. 3.6. РЭМ-изображение кремниевого кантилевера

Острие кантилевера обычно закрепляют на пружине, изготовленной в виде кронштейна с малой механической жесткостью. В результате межатомного (межмолекулярного) взаимодействия между образцом и острием кантилевера кронштейн отклоняется. Отклонение регистрируется датчиками, преобразующими перемещение в электрический сигнал. Изменение высоты положения кантилевера регистрируется емкостными, оптическими (лазерными) датчиками, а также туннельным датчиком, который выполнен в виде проводящего острия туннельного микроскопа, расположенного над наружной поверхностью кронштейна. Манипулятор с помощью системы обратной связи изменяет положение образца таким образом, что сила $F(d) = 10^{-8}—10^{-12}$ Н, действующая между острием кантилевера и микрообъектом, в процессе сканирования остается постоянной (см. рис. 3.3). При этом регистрируют все три координаты кончика микрозонда, что позволяет получить трехмерное изображение поверхности.

Разрешение АСМ вдоль нормали к поверхности сравнимо с соответствующим разрешением СТМ, а разрешение в горизонтальном направлении (продольное разрешение) зависит от расстояния d и радиуса кривизны острия R . Числовой расчет показывает, что при $R = 0,5$ нм и $d = 0,4$ нм продольное разрешение составляет ~ 1 нм. Следует отметить, что продольное разрешение АСМ повышается при уменьшении R и d . Так, при $d = 0,1$ нм, т.е. в области отталкивающих сил Ван-дер-Ваальса, продольное разрешение АСМ может достигать нескольких десятых долей нанометра. На рис. 3.7 представлено АСМ-изображение атомной структуры слюды.

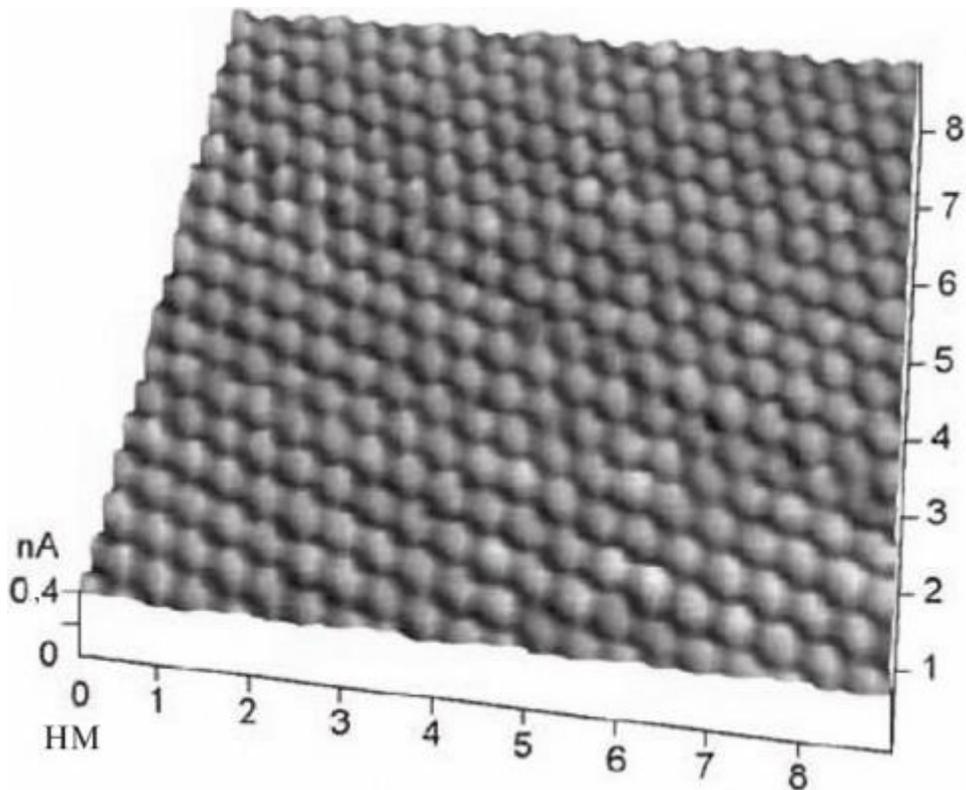


Рис. 3.7. АСМ-изображение атомной структуры слюды

Необходимо подчеркнуть, что зондом АСМ является острое иглы, которое позволяет снимать информацию о профиле элемента рельефа поверхности, имеющего нанометровые размеры, но высота

(глубина) такого элемента не должна превышать 100 нм, а соседний элемент должен быть расположен не ближе чем на расстоянии 100 нм. Эти ограничения указывают на узкие возможности применения техники АСМ для контроля элементов современных СБИС, высота (глубина) которых составляет от 0,1 до 1,0 мкм и даже более. Кроме того, при глубине (высоте) элементов рельефа менее 100 нм регистрируемая кривая сигнала отклика АСМ имеет форму, которая зависит как от геометрии рельефа поверхности твердого тела, так и от геометрии острия зонда (форма острия сферическая, параболическая и др.). Поэтому в измерениях на АСМ требуется эталонная структура с известным профилем элемента рельефа и достаточно точно известным размером этого элемента, по которой возможно определить аппаратную функцию средства измерений. При выполнении некоторых специфических для АСМ условий возможно восстановление профиля элемента без потери информации. Однако эти условия практически неосуществимы в эксперименте.

В настоящее время целый ряд ведущих фирм за рубежом освоили серийное производство средств измерений в микро- и нанометровом диапазонах. Выпуск сканирующих зондовых микроскопов проводится такими фирмами, как Jeal (Япония), WATechnology (Великобритания), Burleigh (Германия), Spiral (Франция), Angstrom Technology (США), Digital Instruments и Hewlett Packard (США). Общее число выпускаемых там средств измерений составляет 1000 и более единиц в год. В России серийное производство СЗМ проводят АОЗТ «НТ-МДТ» и «КПД» (г. Зеленоград). Число выпускаемых приборов — до 100 в год. Качество их отвечает всем современным требованиям к оборудованию,

уже завоевавшему признание как в России, так и за рубежом. Технические характеристики сканирующих зондовых микроскопов приведены в табл. 3.7.

3.3.9. Лазерная интерферометрия

Наиболее разработанной и широко применяемой на практике методикой измерений линейных размеров является оптическая. В этой методике используется лазерное излучение, а регистрация перемещений исследуемого объекта осуществляется либо по интерференционной картине, либо по отклонению отраженного пучка. Известны четыре варианта интерференционной методике: 1) гомадинная; 2) гетеродинная; 3) поляризационная; 4) с лазерно-диодной обратной связью.

Таблица 3.7

Технические характеристики сканирующих зондовых микроскопов

Характеристика	Фирма-изготовитель (страна) СЗМ						
	Jeal (Япония)	WA Technology (Великобритания)	Burleigh (Германия)	Spiral (Франция)	Angstrom Technology (США)	НТ-мтд (Россия)	кпд Company limited (Россия)
Разрешение E :	• 1					• 0	
• в плоскости	, 4				<2	, 5	<5
X Y, нм	• 0	0,1 0,05	<3 <0,1	<2 0,1	0,1	• 0	0,1
• по Z, нм	, 1					, 1	
Обзор:							
• •	• 0					• 5	• 6
по X	, 2			• 8		0	0
Y, м	х			х		х	х
к м ²	0	0,5x0,5	-	8	-	5	6
• •	, 2			• 3		0	0
по Z, м	• 1					• 2	• 1

к м							
Дрейф, Е/с	0,5	300	-	—	—	0,3	0,5
Быстроде йствие, мм/с	60	25	30	30	50	50	30
Кадр, бит	512x x512x x8	256x x256x x26	400x x400x X16	512x x512x X16	256x x256x X16	512x x512x X16	512x x512x X16
Условия на амплитуд у вибраций в помещен ии	< 1 мкм (<2Гц), < 1 мкм (2-9 Гц),	—	—	—	—	—	<3 мкм (> 10 Гц)
Акустичес кий шум, дБ	<45	-	-	—	—	-	—
Образец для калибров ки				Высоко- ориен- тиро- ванный пиролити ческий графит	Высоко- ориен- тиро- ванный пиролити ческий графит	<3 мкм (> 10 Гц)	Высоко- ориен- тиро- ванный пиролити ческий графит

В *гомодинном* оптическом интерферометре пучок лазера отражается от объекта и интерферирует с частью пучка, отраженного от опорной пластинки. Будучи простым и достаточно надежным, гомодинный интерферометр характеризуется относительно высоким уровнем шумов на частотах ниже 100 Гц. Например, в полосе от 0,5 Гц до 3 кГц уровень шумов составляет -0,2 А. В последнее время гомодинная методика была существенно усовершенствована путем использования полностью волоконной схемы с многомодовым диодным GaAlAs-лазером. Применение волоконной оптики позволило сделать интерферометр очень компактным, а также уменьшить выделение тепла. Кроме того, в волоконной системе почти полностью исключаются флуктуации длины оптического пути из-за турбулентности воздуха. В результате шум в полосе частот 0—1 кГц стал меньше 0,1 А.

В *гетеродинной* методике сдвинутая по частоте часть пучка лазера, сформированного высокочастотным брэгговским модулятором, интерферирует со сдвинутой по фазе частью пучка, отраженного от объекта. Гетеродинная схема требует более сложной электронной аппаратуры, но она по сути своей нечувствительна к флуктуациям интенсивности лазера. Шум гетеродинного интерферометра может быть значительно меньше теплового шума объекта, который составляет $\sim 0,1 \text{ А/Гц}$.

В *поляризационной* методике с выхода лазера формируются два пучка излучения с взаимно перпендикулярной поляризацией, которые являются опорным и измерительным пучками. Относительная фаза этих пучков после отражения служит мерой перемещения объекта. Эта методика заметно уменьшает чувствительность к флуктуациям длины оптического пути и интенсивности лазера. Среднеквадратичное значение общего шума в полосе частот 1 Гц — 20 кГц составляет 0,01 А.

В недавно описанной системе с диодным GaAlAs-лазером и обратной связью перемещение объекта детектируется встроенным фотодиодом, который измеряет изменения интенсивности внутри резонатора, обусловленные взаимодействием отраженной части излучения лазера с активной средой. Чувствительность аппаратуры составляет 0,03 А/Гц.

В методике, основанной на отклонении пучка, с помощью позиционно-чувствительного детектора фиксируется отклонение лазерного пучка, отраженного небольшим зеркалом, установленным на объекте. Порог обнаружения отклонения объекта, определяемый дробовым шумом, составляет $4 \cdot 10^{-4} \text{ А/Гц}$. Было показано, что в установках, используемых на воздухе, основным источником шумов являются отклонения лазерного пучка из-за флуктуации длины оптического пути в воздухе.

Повышение уровня измерений в перспективных наукоемких технологиях достигается в результате проведения фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований в области метрологии, направленных на создание и внедрение методик и высокоточных средств измерений, их более качественного метрологического обеспечения, гарантирующего высокую степень метрологической достоверности и единство измерений.

Проведенный анализ различных методик измерений длины в нанометровом диапазоне, основанных на новых физических принципах, позволяет сделать вывод, что наиболее эффективными в метрологическом отношении методиками измерений линейных размеров в нанометровом диапазоне являются сканирующая зондовая микроскопия (РЭМ, СТМ, АСМ) в сочетании с лазерной интерферометрией, обеспечивающая необходимую разрешающую способность, точность, стабильность и позволяющая обеспечить единство измерений длины в нанометровом диапазоне

3.3.10. Метрологическое обеспечение геометрических параметров нанообъектов

Создание новой техники, наукоемких технологий и новых материалов, обеспечивающих коренные сдвиги в структуре и техническом уровне производства, а также выход отечественного производства на мировой уровень в значительной мере сдерживаются недостаточным уровнем метрологического обеспечения. Из-за отставания техники сверхточных измерений на атомном и молекулярном уровнях, отсутствия специальных исходных методик и средств обеспечения единства прецизионных измерений затянuloсь внедрение высших экологически чистых перспективных технологий в базисных отраслях экономики.

Ранее уже неоднократно акцентировалось внимание на необходимости упреждающего развития нанометрологии. Вместе с тем между нанометрологией в нанонауке, в основном в нанотехнологиях, и нанометрологией в nanoиндустрии есть существенные различия, которые следует иметь в виду (табл. 3.8).

Ориентированной на научные исследования нанометрологией занимаются главным образом научно-исследовательские институты и некоторые промышленные фирмы. Развитие промышленной (индустриальной) нанотехнологии сталкивается с различными проблемами. Основными различиями этих двух направлений развития нанометрологии являются определения необходимых диапазонов точности измерений, соотношения цена/эффективность, совокупность измеряемых параметров и, разумеется, условия выполнения измерений.

Таблица 3.8

Нанометрология в промышленности и научных исследованиях

Научно-ориентированная нанометрология	Промышленная нанометрология
Требует достижения наивысшей точности	Требует наивысшей эффективности измерительных систем
Главным образом базируется на визуальных наблюдениях	Нуждается в количественных определениях параметров
Возможно большее число измеряемых параметров	Минимум необходимых измеряемых параметров
Не имеет значения время измерений и затраты на их проведение	Минимальные время измерений и затраты
Особая важность учета влияния окружающей среды	Измерения в ходе производственного процесса (наличие вибраций, загрязнения воздуха и др.)

Во всех странах, в том числе и в России, развиваются оба направления нанометрологии, но пока преимущественно в области линейных измерений. О нанометрологии линейных измерений в XXI веке соответственно кратко и подробно изложено в [32, 33]. Приводимые далее сведения взяты из статьи [32].

Нанометрология оперирует наноразмерными объектами. Это предопределяет необходимость решения первоочередной проблемы создания методик и средств линейных измерений в нанометровом диапазоне, а также обеспечения единства таких измерений с абсолютной привязкой к первичному эталону метра.

Достижение предельных возможностей при измерениях длины в нанометровом диапазоне связано с использованием высокоразрешающих методик растровой электронной и сканирующей зондовой

микроскопии в сочетании с лазерной интерферометрией и фазометрией при сохранении абсолютной привязки к первичному эталону метра.

В результате длительных исследований в России с мировым приоритетом концептуально решена задача создания основ метрологического обеспечения измерений длины в диапазоне 1 — 1000 нм. При этом созданы:

- методология обеспечения единства измерений в диапазоне длин от 1 нм до 1 мкм, основанная на принципах зондовой микроскопии и лазерной интерферометрии-фазометрии;
 - эталонный комплекс средств измерений, обеспечивающий воспроизведение и передачу единицы длины в диапазоне 1 нм—1 мкм вещественным мерам длины с погрешностью 0,5 нм;
 - новое поколение мер малой длины для калибровки средств измерений в диапазоне 1 нм—1 мкм, в том числе меры нанорельефа поверхности;
 - методология и алгоритмы измерения параметров профиля элементов микро- и наноструктур и пакет компьютерных программ для автоматизации таких измерений.

Следует отметить значительный вклад в теорию и практику метрологического обеспечения линейных измерений геометрических параметров в нанометровом диапазоне, который внесли российские исследователи из Научно-исследовательского центра поверхности и вакуума (НИЦПВ) и Московского физико-технического института под руководством профессора П.А. Тодуа. Информация из их научных публикаций, была бы полезна специалистам предприятий и организаций Российской национальной нанотехнологической сети, стремящихся повысить свою квалификацию в сфере метрологического обеспечения нанотехнологий и продукции нанотехнологий.

В соответствии с Концепцией обеспечения единства измерений, передача единицы длины от первичного эталона в нанометровый диапазон осуществляется эталонной трехмерной лазерной интерферометрической системой измерений наноперемещений. Эталонная система, созданная на основе АСМ оригинальной конструкции и лазерных интерферометрических измерителей наноперемещений (ЛИИН) (схема эталонной системы показана на рис. 3.8), предназначена для измерения линейных перемещений по трем координатам и калибровки мер и стандартных образцов, используемых, в свою очередь, для калибровки измерительных систем потребителей. Диапазон области перемещений по осям X и Y составляет 1—3000 нм, по оси Z — от 1 до 1000 нм. Погрешность измерений перемещений по X и Y составляет 0,5 нм, по Z — от 0,5 до 3 нм. Диапазон смещений в области перемещений — до 100 мм.

Непосредственное измерение наноперемещений в эталонной системе осуществляет лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений (рис. 3.9). В его конструкции заложена комбинация методов интерферометрии и фазометрии. Три таких устройства, встроенные в эталонную трехмерную ЛИИН, выполняют измерения перемещений по трем координатам (см. рис. 3.8).

Однако ЛИИН имеет и самостоятельное назначение, заключающееся в измерении линейных перемещений в реальном масштабе времени, заключающееся в измерении линейных перемещений в реальном масштабе времени, в том числе в калибровке систем сканирования и позиционирования в нанотехнологии, точном машиностроении, микромеханике, робототехнике, растровой электронной и сканирующей зондовой микроскопии. Диапазон измерений

перемещений составляет 1 нм—10 мм, дискретность отсчета 0,1 нм. Абсолютная погрешность измерений лежит в диапазоне 0,5—3 нм при максимальном значении скорости перемещения 3 мм/с.

Z-ЛИИН

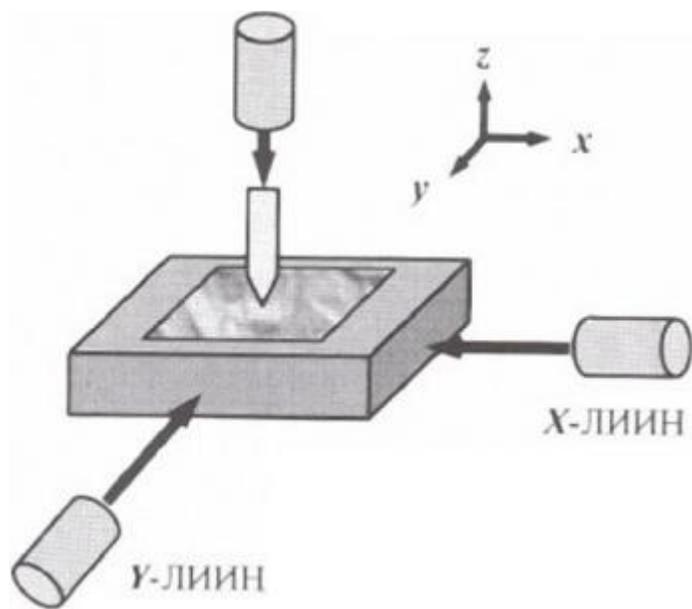


Рис. 3.8. Схема трехмерной лазерной интерференционной системы перемещений

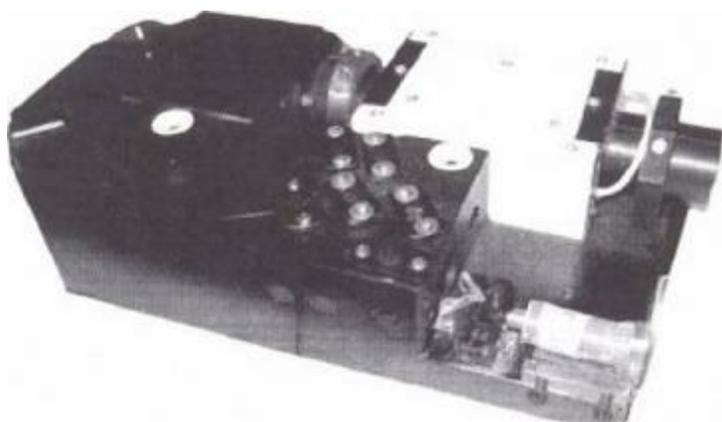
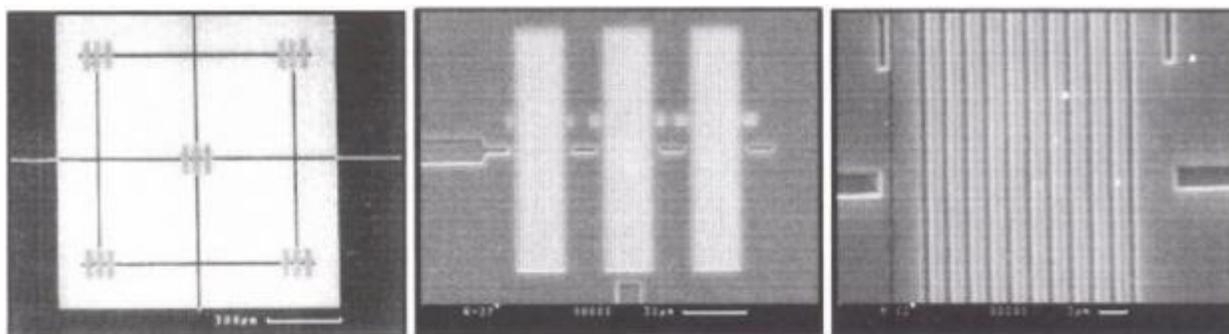


Рис. 3.9. Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений

В реальной практике измерения геометрических параметров объектов в нанометровой области проводятся с помощью РЭМ и СЗМ, расположенных у потребителя. Для обеспечения единства измерений необходимо проводить калибровку этих сложных измерительных устройств по эталонным образцам — мерам малой длины, выполненным в виде рельефных шаговых структур с заданными шириной, высотой (глубиной) и формой профиля.

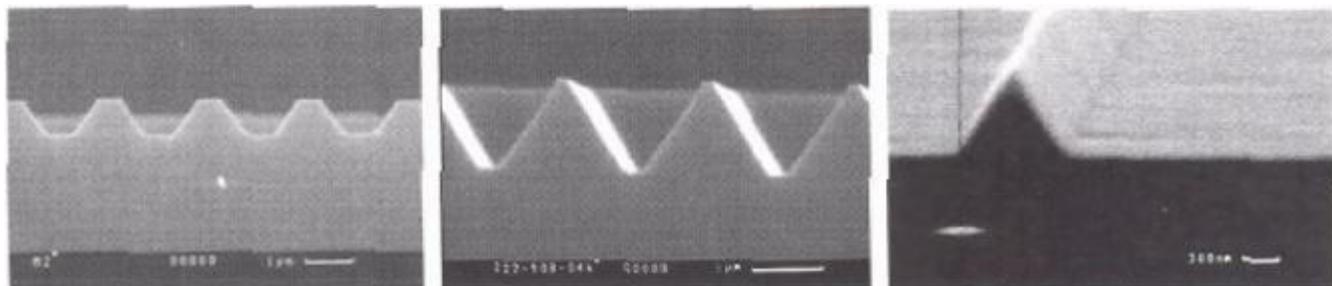
Важнейшей задачей метрологического обеспечения линейных измерений в нанометровом диапазоне является создание вещественных носителей размера — мер с программируемо заданным нанорельефом поверхности, обеспечивающих калибровку средств измерений с наивысшей точностью. В настоящее время в разных странах используются различные линейные меры. Все они применяются для калибровки РЭМ и АСМ. Однако только одна из них, разработанная в Научно-исследовательском центре по изучению свойств поверхности и вакуума, имеет в качестве аттестуемого элемента ширину линии, и только с помощью этой меры возможно осуществлять, наряду с калибровкой, увеличение и измерение диаметра электронного зонда РЭМ, а в случае АСМ еще и радиусов острий зондов (кантилеверов), линейности шкал и неортогональности сканеров. Именно такие трехмерные меры малой длины — материальные носители размера, позволяющие производить комплексную калибровку и контроль основных параметров РЭМ и СЗМ, предназначены для перевода этих сложных устройств из разряда устройств для визуализации исследуемого объекта в разряд средств измерений, т.е. в разряд приборов для измерений линейных размеров объектов исследования, обеспечивающих привязку измеряемых величин в нанометровой области к первичному эталону единицы длины — метру.

Общий вид меры представлен на рис. 3.10, а. Мера состоит из пяти групп шаговых структур по три структуры в каждой (рис. 3.10, б). На рис. 3.10, в приведено изображение одной из шаговых структур. Структура состоит из 11 канавок с трапецевидным профилем в кремнии. Боковые стенки канавок соответствуют кристаллографическим плоскостям кремния {111}, а дно канавки и верх выступа — плоскостям {100}. Высокое качество меры демонстрируют изображения сколов шаговой структуры в РЭМ (рис. 3.11) и трехмерные изображения элементов структуры в АСМ (рис. 3.12).



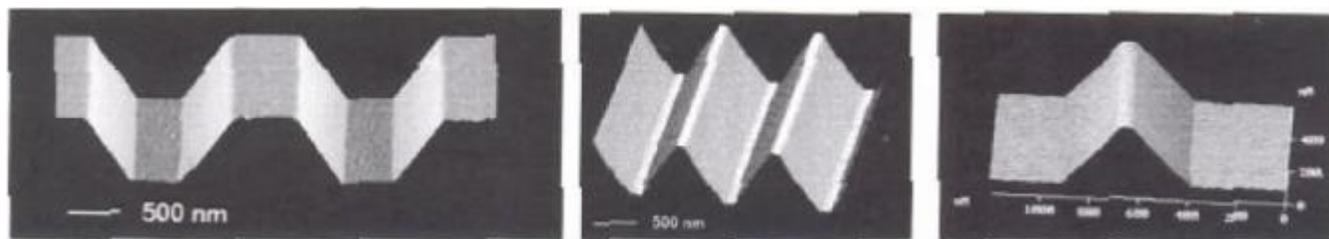
а) б) в)

Рис. 3.10. Микрофотографии меры, выполненные на РЭМ при разных увеличениях



а) б) в)

Рис. 3.11. Изображения в РЭМ сколов меры с разными высотой и шириной выступов: *а* — верх выступа 520 нм, низ канавки 560 нм, высота структуры 650 нм; *б* — верх выступа 110 нм, низ канавки 260 нм, высота структуры 1150 нм; *в* — верх выступа 30 нм, высота структуры 320 нм



а) б) в)

Рис. 3.12. Изображения отдельных элементов меры с разными шириной и высотой выступов, полученные на АСМ: *а* — верх выступа 520 нм, низ канавки 560 нм, высота структуры 650 нм; *б* — верх выступа 110 нм, низ канавки 260 нм, высота структуры 1150 нм; *в* — верх выступа 30 нм, высота структуры 320 нм

Аттестация меры осуществляется на эталонной трехмерной интерферометрической системе измерений наноперемещений, представленной выше. Аттестуется мера по шагу и размерам верхних и нижних оснований выступов и канавок (ширина линии), а также по высоте (глубине) рельефа. Отметим, что аттестация по ширине линии проводится впервые в мире. При одном и том же шаге структуры могут быть изготовлены меры с шириной линии в диапазоне 30— 1500 нм и высотой рельефа 100— 1500 нм.

Меры позволяют по одному изображению в растровом РЭМ (даже по одному сигналу), что очень важно для технологии, осуществить калибровку микроскопа (определить его увеличение, линейность шкал и диаметр электронного зонда). Кроме того, при необходимости подтверждения правильности измерений возможен контроль параметров РЭМ непосредственно в процессе проведения измерений размеров исследуемого объекта, что является дополнительной гарантией высокого качества измерений.

Мера позволяет легко автоматизировать линейные измерения и создавать на основе РЭМ автоматизированные измерительные комплексы. Ряд таких комплексов уже существует. В частности, такой комплекс линейных измерений в области размеров 30 нм—100 мкм создан в НИЦПВ на базе РЭМ JSM-6460LV.

Аналогичным образом по заданным параметрам меры производятся калибровка и контроль таких характеристик АСМ, как цена деления и линейность шкал по всем трем координатам, ортогональность систем сканирования, радиус острия зонда (кантилевера), настройка параметров и выход микроскопа в рабочий режим.

Системы калибровки и аттестации АСМ успешно внедряются на предприятиях Москвы и Зеленограда, специализирующихся на создании аппаратуры для нанотехнологии. Развитие нанотехнологии ужесточает требования к измерительным системам, погрешности измерений которых должны быть сравнимы с межатомными расстояниями. Все это требует серьезного отношения к вопросу обеспечения единства линейных измерений в нанометровом диапазоне.

Растровый электронный и сканирующий зондовый микроскопы только тогда могут считаться средствами измерений, когда будут соответствующим образом аттестовываться, калиброваться и контролироваться, причем последнее непосредственно в процессе измерений. Трехмерные меры — материальные носители размера являются своеобразным мостом между объектом измерений и эталоном метра и представляют собой идеальное средство для выполнения таких операций.

Непреложно одно — культура измерений требует того, чтобы любой РЭМ или СЗМ, независимо от того, где он находится — в научной или промышленной лаборатории, в учебном заведении или участвует в технологическом процессе, должен быть укомплектован мерами, обеспечивающими калибровку и контроль параметров этого сложного устройства. Только тогда измерения, производимые на нем, могут претендовать на достоверность. Кроме того, использование методов и средств калибровки и аттестации РЭМ и СЗМ производителями соответствующих приборов позволит им создавать новые приборы с лучшими характеристиками, которые в свою очередь позволят продвинуться дальше на пути развития нанотехнологии.

Все это создает предпосылки и закладывает основы ускоренного развития высоких технологий в России, в том числе нанотехнологии.