

УДК 621.3.049:535.016:537.876.4:681.723

БОРИС ЗАЛМАНОВИЧ БЕЛАШЕВ

доктор технических наук, старший научный сотрудник  
Института геологии, Карельский научный центр РАН  
belashev@krc.karelia.ru

## НАНОМЕТРОЛОГИЯ

В статье по литературным источникам и материалам Интернета описаны современные подходы к нанометрологии. Рассмотрены эталонная система на базе атомно-силового микроскопа и лазерных интерферометрических измерителей наноперемещений, метод терагерцовой спектроскопии диагностики нанообъектов, новые оптические микроскопы, регистрирующие интегральный отклик объекта.

Ключевые слова: нанометрология, измерители наноперемещений, меры длины, терагерцовая спектроскопия, мезооптические микроскопы, аксикон

История науки и техники неразрывно связана с развитием системы, методов и средств измерений. Особенность современного этапа состоит в появлении новых задач, обусловленных малыми размерами элементов и структур.

Основной задачей метрологии является обеспечение единства измерений, то есть достижение состояния, при котором результаты измерений выражены в узаконенных единицах, а погрешности известны с заданной вероятностью. Привязка измерительных приборов к эталонам позволяет разным пользователям разных приборов получать в рамках погрешности одинаковые результаты при измерении одного объекта. Впервые эта идея была выражена французским ученым Лакодемоном во время экспедиции в Перу, цель которой состояла в измерении длины меридиана, соответствующей одному градусу, на экваторе. Неслучайным поэтому оказался и выбор первого эталона длины как одной сорокамиллионной доли Парижского меридиана.

Для устранения затруднений, связанных с междисциплинарным характером нанотехнологий, использованием различной терминологии, разных исследовательских, технологических и измерительных подходов, ведущих к разобщенности и затрудняющих обмен информацией, в 2005 году было инициировано создание Технического комитета Международной организации по стандартизации ИСО/ТК 229. Работа комитета состоит в стандартизации по следующим направлениям:

- 1) термины и определения,
- 2) метрология, методы испытаний и измерений,
- 3) стандартные образцы состава и свойств,
- 4) моделирование процессов,
- 5) медицина и безопасность,
- 6) воздействие на окружающую среду.

Согласно выработанной комитетом терминологии, под нанотехнологиями понимают «знание и управление процессами, как правило, в масштабе нанометра, но не исключающее масштаб менее 100 нм в одном или нескольких измерени-

ях, когда ввод в действие размерного эффекта (явления) приводит к возможности новых применений, использование свойств объектов и материалов, которые отличаются от свойств свободных атомов или молекул, а также от объемных свойств вещества, состоящего из этих атомов или молекул, для создания более совершенных материалов, приборов, систем, реализующих эти новые свойства» [3].

В статье дан обзор источников [1], [2], [3], содержащих основные подходы к нанометрологии и метрологические идеи, которые могут оказаться полезными для развития отрасли.

### МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ

Предмет метрологии касается:

1. Эталонов физических величин, эталонных установок, стандартных образцов состава, структуры, свойств для передачи размера единиц физических величин в нужный диапазон;
2. Аттестованных методик измерений физико-химических параметров и свойств объектов, методики калибровки (поверки) средств измерений;
3. Метрологического сопровождения технологических процессов производства продукции;
4. Мероприятий государственной метрологической службы по техническому регулированию метрологии, испытания вновь произведенных или импортируемых средств измерений, надзора за состоянием и применением эксплуатируемых средств измерений, метрологической экспертизы стандартов, организации службы стандартизации, разработки нормативных документов, участия в работе международных метрологических организаций.

В задачу стандартизации входит определение диапазона параметров и свойств материалов, подлежащих измерениям и отвечающих определенному его качеству. Особое значение стандар-

тизация приобретает в задачах обеспечения здоровья и безопасности операторов технологических процессов и лиц, взаимодействующих с продукцией технологий, а также экологической безопасности окружающей среды.

Сертификация представляет собой подтверждение соответствия параметров и свойств объектов, материалов и структур технологических процессов и инструментальной и измерительной базы требованиям технических регламентов, стандартов и нормативных элементов.

В союзе метрологии, стандартизации, сертификации метрология играет главную роль, является количественным базисом стандартизации и сертификации.

### ЕДИНСТВО ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В НАНОДИАПАЗОНЕ

Метр – естественная единица длины, сопоставимая с размерами человека. Но микроэлектроника уже имеет дело с элементами поверхности, минимальные размеры которых приближаются к десяткам нанометров, а нанотехнологии оперируют объектами от сотен нанометров до десятых долей нанометра. Развитие этих отраслей поставило проблему создания методов и средств линейных измерений в нанометровом диапазоне и обеспечения их единства с абсолютной привязкой к первичному эталону длины – метру.

Для нанометрологии измерение геометрических линейных размеров объектов является первоочередной задачей. Необходимость обеспечения единства линейных измерений в нанометровом диапазоне связана с тем, что линейные измерения в неявном виде присутствуют в большинстве методов и средств измерений механических, оптических, магнитных, электрических, акустических и других параметров объектов. Другая причина заключается в прецизионном пространственном позиционировании зонда измерительного устройства в место съема информации. При этом диапазон линейного сканирования по каждой координате может простирается от единиц нанометра до сотен и более микрометров, а требуемая точность выставления координаты должна составлять десятые доли нанометра. Помимо привязки средства измерения к эталону, воспроизводящему единицу физической величины, в нанотехнологии обязательна привязка к базисному эталону единицы длины, обеспечивающая точность попадания в цель. Сложность состоит в том, что диапазон измерений длины от единиц нанометров до сотен микрометров перекрывает пять порядков при точности измерений в десятые доли нанометра.

Из всех физических эффектов только интерференция способна осуществить передачу эталона длины в нанодиапазон. Эталонная система в нанодиапазоне состоит из атомно-силового микроскопа (АСМ) и лазерных интерферометрических измерителей наноперемещений (ЛИ-

ИН) по трем координатам (рис. 1). Диапазон измерения перемещений – 1 нм – 10 мм, дискретность – 0,1 нм, максимальная скорость перемещения – 3 мм/с, абсолютная погрешность измерений – 0,5–3 нм. Эталон используют для калибровки измерительных систем потребителей.

Существуют вещественные меры длины с программно заданным рельефом (рис. 2), аттестуемые эталонной системой перемещений. Вещественные меры длины используют для калибровки растровых электронных микроскопов. Они позволяют по одному изображению меры в растровом микроскопе определить его увеличение, линейность шкал, диаметр электронного зонда.

### ТЕРАГЕРЦОВАЯ КОГЕРЕНТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДИАГНОСТИКИ НАНООБЪЕКТОВ

Область терагерцовых волн находится между инфракрасными и миллиметровыми волнами. Диапазон 0,3–100 ТГц соответствует длинам волн 1 мм – 3 мкм. Освоение диапазона содержит отсутствие надежного, достаточно мощного и компактного источника излучения и качественных детекторов, хотя часть его используется ИК-спектроскопией и спектроскопией комбинационного рассеяния.

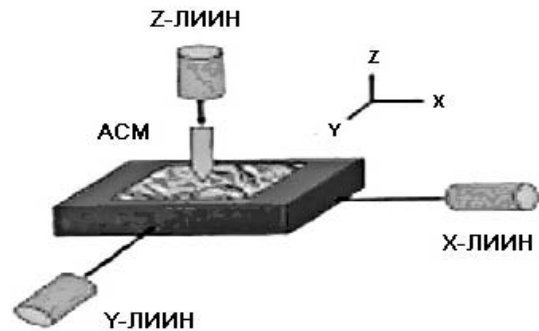


Рис. 1. Схематическое изображение эталонной системы наноперемещений

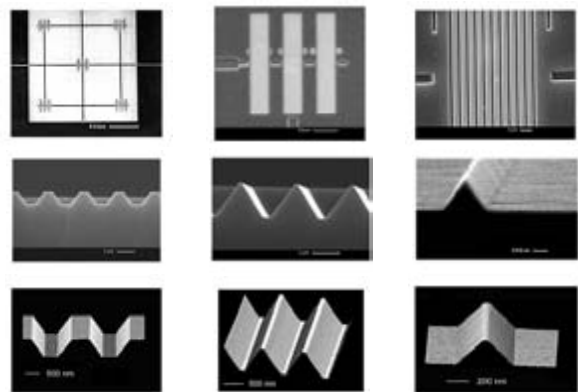


Рис. 2. Вещественные меры длины с программируемым рельефом в нанодиапазоне

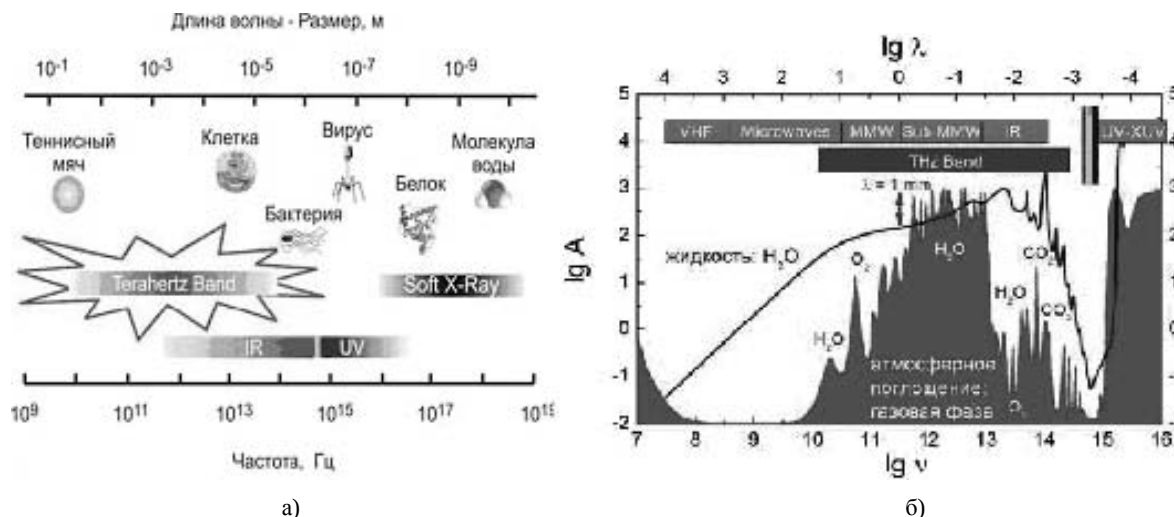


Рис. 3. Терагерцовый диапазон по частоте, длине волны и размеры объектов (а), попадающих в диапазон полосы поглощения некоторых соединений (б)



Рис. 4. Схема совмещения ТГц-спектроскопии с атомно-силовым микроскопом

Большинство спектральных особенностей атомов и многоатомных молекул, обусловленных структурой, химической композицией и типами молекулярных связей, находятся в этом диапазоне (рис. 3).

ТГц-излучение сравнительно хорошо проникает в конденсированные среды, исключая металлы и некоторые растворы. В отличие от микроволновых видеосистем, ТГц-приборы имеют лучшее разрешение. Однако из-за дифракционного предела даже коротковолновые волны диапазона невозможно использовать для визуализации нанообъектов.

Существенным дополнением в арсенал нанотехнологий может явиться синтез ТГц-когерентной спектроскопии со сканирующим полемым и атомно-силовым микроскопами (рис. 4).

Такое совмещение позволяет зарегистрировать спектральный отклик нанообъекта благодаря гигантскому усилению Раман-эффекта на острие зонда.

Спектральные данные несут информацию об интегральных характеристиках нанообъекта. При этом оценка пространственного разрешения, определяемого картиной остаточного электромагнитного поля вблизи острия зонда, дает величину порядка 100 нм.

Терагерцовую спектроскопию предполагают использовать в метрологии для полупроводниковой промышленности при производстве интегральных схем для анализа дефектов в подложках, межэлементных соединений, контроля толщин и материальных различий в элементах. В области биофизики, биологии и медицины ТГц-технологии могут быть использованы для анализа особенностей ДНК, неразрушающего контроля оболочек лекарственных капсул, диагностики полиморфизма лекарств, диагностики рака кожи.

## НОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МИКРОСКОПЫ

Принципы, составляющие основу новых оптических микроскопов для просмотра фотоэмульсий в физике высоких энергий, могут быть использованы при разработке наноскопа.

Развитие метода ядерной фотоэмульсии для регистрации треков частиц закончилось к 1945 году, когда размер зерна бромистого серебра был уменьшен до 80 нм, а плотность зерен серебра в следе релятивистской частицы повышена до 40 зерен на 100 мкм. С помощью этого метода были открыты заряженные пи-мезоны, исследованы распады и обнаружена их перезарядка на ядрах фотоэмульсии. В настоящее время метод фотоэмульсии используют в экспериментах по регистрации нейтрино. Существенными проблемами при этом являются поиск треков в объеме фотоэмульсии 200 л и обмер этих следов под оптическим микроскопом с перефокусировкой по глубине, требующие колоссального объема времени.

Для преодоления этих трудностей применен подход мезооптики, согласно которому регистрация рассеянных объектом конических волн позволяет получить информацию об объекте в целом. Тем самым обеспечивается быстрдействие и высокая степень сжатия информации.

На рис. 5 показаны оптические схемы микроскопов горизонтальных (а) и вертикальных (б) следов.

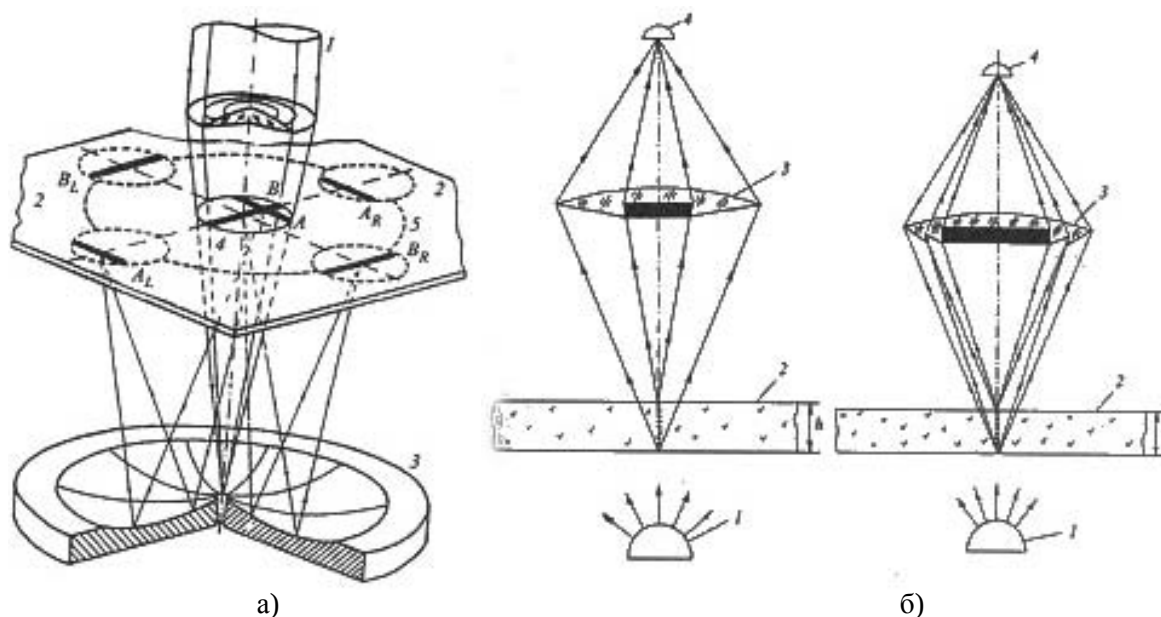


Рис. 5. Микроскопы для регистрации треков в ядерной фотоэмульсии:

а – микроскоп горизонтальных следов: 1 – сходящийся пучок света, 2 – слой ядерной фотоэмульсии, 3 – мезооптическое зеркало с кольцевым откликом, 4 – поле зрения микроскопа с двумя следами частиц, 5 – фокальное кольцо; б – микроскоп вертикальных следов с одним и двумя кольцевыми аксиконами: 1 – источник света, 2 – слой ядерной фотоэмульсии, 3 – аксикон, 4 – точечный фотоприемник

Главным элементом мезооптического фурие-микроскопа (5а) является тороидальное зеркало, удваивающее изображение горизонтального трека. Расстояние между изображениями зависит от глубины залегания трека в эмульсии. В микроскопе вертикальных следов использован аксикон, преобразующий точку на оптической оси в отрезок, лежащий на этой оси. Обращение хода лучей в схеме (5б) позволяет поставить в соответствие точечному детектору вертикальный отрезок фотоэмульсии. По этой причине при сканировании фотоэмульсии рассеивающий свет вертикальный трек даст резкое уменьшение показаний детектора. При сканировании фото-

эмульсии этими микроскопами, в отличие от обычного микроскопа, операции перефокусировки микроскопа по глубине не требуется. Изображения наклонных треков могут быть преобразованы в изображения горизонтальных треков с помощью мультиплексных отражательных элементов.

Появление новых идей является принципиально важным для опережающего развития нанометрологии, стимулирующей прогресс всей nanoиндустрии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 08-01-98804.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зиновьев Н. Н., Андрианов А. В., Трухин В. Н. Терагерцовая когерентная спектроскопия для диагностики нанообъектов [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://rusnanjtech08.rusnanoforum.ru/sadm\\_files/disk/Docs/2/3/3%20\(22\)](http://rusnanjtech08.rusnanoforum.ru/sadm_files/disk/Docs/2/3/3%20(22)).
2. Сороко Л. М. Новые оптические микроскопы / ОИЯИ. Дубна, 2006. 88 с.
3. Тодуа П. А. Метрология в нанотехнологии // Российские нанотехнологии. 2007. Т. 2. № 1–2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.nanorfu.ru/](http://www.nanorfu.ru/).