

А.Г. СЕРГЕЕВ

НАНОМЕТРОЛОГИЯ



Москва • Логос • 2011

УДК 006
ББК 30.10
С32

Рецензенты

С.М. Аракелян, доктор физико-математических наук, профессор
В.Е. Ютт, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель
науки и техники Российской Федерации

Сергеев А.Г.

С32 Нанометрология: монография / А.Г. Сергеев. — М.: Логос, 2011. —
416 с.

ISBN 978-5-98704-494-0

Содержит основные сведения по метрологическому обеспечению
наноиндустрии. Рассмотрены становление нанометрологии в XX—
XXI вв. и концепции ее развития. Подробно изложены современные
основы технического обеспечения нанометрологии. Освещены вопро-
сы нестабильности, точности и неопределенности наноизмерений.
Особое внимание уделено основным метрологическим операциям —
поверке и калибровке. Материал по сканирующей зондовой микро-
скопии изложен на основе семи современных стандартов, введенных
в 2008—2009 гг. Описаны организационные принципы нанометро-
логии, системы Гостехрегулирования через сеть региональных от-
делений вновь созданного Центра метрологического обеспечения
нанотехнологий и отраслевых научно-исследовательских институтов.
Приведен перечень вузов, работающих в сфере наноиндустрии, и
указаны основные направления их исследований в данной области.

Для ученых, инженеров и других специалистов, разрабатываю-
щих проблемы нанометрологии. Может использоваться в учебном
процессе вузов при подготовке кадров в сфере нанотехнологии, ме-
трологии и технического регулирования, а также в магистратуре
и аспирантуре в этих научно-технических областях.

УДК 006
ББК 30.10

ISBN 978-5-98704-494-0

© Сергеев А.Г., 2011
© Логос, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ.....	9
ГЛАВА 1. СТАНОВЛЕНИЕ НАНОИНДУСТРИИ И КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ НАНОМЕТРОЛОГИИ	
1.1. Возникновение нанометрологии	15
1.2. Нанометрология за рубежом.....	22
1.3. Положение России в сфере наноиндустрии	26
1.4. Концепция развития нанометрологии	34
ГЛАВА 2. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАНОМЕТРОЛОГИИ	
2.1. Методы и средства интерференционных измерений	42
2.2. Использование принципов микроскопии в наноизмерениях ..	51
2.2.1. Оптическая микроскопия	51
2.2.2. Электронная микроскопия	59
2.3. Сканирующая зондовая микроскопия	75
2.3.1. Виды сканирующей зондовой микроскопии	75
2.3.2. Сканирующий туннельный микроскоп	77
2.3.3. Атомно-силовой микроскоп	92
2.4. Разновидности ближнепольной микроскопии.....	112
2.5. Спектроскопия в нанометрологии	125
2.5.1. Общие сведения.....	125
2.5.2. Атомный спектральный метод.....	132
2.5.3. Молекулярные методы спектроскопии.....	152
2.5.4. Радиоспектроскопия	162
2.5.5. Ядерные методы спектроскопии	167
2.5.6. Электронная спектроскопия.....	170
2.5.7. Рентгеноспектроскопия	174
2.5.8. Лазерная спектроскопия	180
2.6. Хроматография в наноизмерениях.....	182
2.6.1. История и классификация методов хроматографии	182
2.6.2. Жидкостная хроматография	189
2.6.3. Газовая хроматография	193
2.7. Сравнительный анализ технических средств нанометрологии	197
ГЛАВА 3. НЕСТАБИЛЬНОСТЬ, ТОЧНОСТЬ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ НАНОИЗМЕРЕНИЙ	
3.1. Основные положения.....	213
3.2. Измерение линейных размеров рельефных наноструктур.....	216
3.3. Точность измерения линейных наноразмеров	223
3.4. Погрешности измерения длины волны и частоты лазера.....	230
3.5. Нестабильность мощности излучения лазеров.....	236
3.6. Разрешающая способность растрового электронного микроскопа	238
3.7. Оценка расходимости лазерного излучения	240
3.8. Особенности наноизмерений в АСМ-режиме.....	243

3.9. Введение концепции неопределенности	248
3.10. Погрешность и неопределенность.....	253
3.11. Этапы оценивания погрешностей и неопределенностей.....	257
3.12. Пример вычисления погрешности эталона единицы длины (по данным ВНИИМ).....	263
3.13. Определение содержания элементов методами атомной спектроскопии по ГОСТ Р 51309–99	267
3.14. Оценка неопределенности значений стандартных образцов.....	272
ГЛАВА 4. ПОВЕРКА И КАЛИБРОВКА В СФЕРЕ НАНОМЕТРОЛОГИИ	
4.1. Общие сведения	279
4.2. Рельефные меры для нанометрового диапазона	290
4.2.1. Классификация тест-объектов.....	290
4.2.2. Поверка рельефной меры.....	296
4.2.3. Калибровка рельефной меры.....	307
4.3. Измерительные растровые электронные микроскопы	312
4.3.1. Поверка растровых микроскопов	312
4.3.2. Стандартная калибровка растровых микроскопов.....	316
4.3.3. Калибровка растровых микроскопов по двум координатам	318
4.4. Атомно-силовые измерительные зондовые микроскопы	321
4.4.1. Поверка атомно-силовых микроскопов.....	321
4.4.2. Калибровка атомно-силовых микроскопов	325
4.4.3. Калибровка атомно-силовых микроскопов по трем координатам.....	329
4.5. Обеспечение единства измерений в лазерной технике, спектроскопии и хроматографии.....	334
4.5.1. Обеспечение единства измерений параметров лазерного излучения	334
4.5.2. Поверка и калибровка спектрометров	336
4.5.3. Поверка газовых хроматографов	341
4.5.4. Поверка жидкостных хроматографов.....	348
4.5.5. Контроль качества приготовления проб для химического анализа.....	351
ГЛАВА 5. ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ОСНОВЫ НАНОМЕТРОЛОГИИ	
5.1. Основные положения.....	355
5.2. Стандартизация и сертификация в наноиндустрии	364
5.3. Цели и задачи регионального отделения ЦМО.....	368
5.4. Управление деятельностью регионального отделения ЦМО	369
5.5. Направления работ в области нанометрологии.....	376
5.6. Организация исследований и кадровое обеспечение наноиндустрии	378
5.7. Проблемы и задачи нанометрологии	386
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	397
ЛИТЕРАТУРА	409