

Метрологическое обеспечение нанотехнологий и продукции наноиндустрии

Под редакцией В.Н. Крутикова



Москва
ЛОГОС
2011

УДК 006
ББК 30.10
М54

Авторы:

Анашина О.Д., Андрюшечкин С.Е., Аневский С.И., Бражников В.В., Булыгин Ф.В., Головань Л.А., Горшкова Т.Б., Гусев А.С., Демин А.В., Заботнов С.В., Золотаревский С.Ю., Золотаревский Ю.М., Иванов В.С., Ильин А.П., Качак В.В., Кашкаров П.К., Клековкин И.В., Кононогов С.В., Коршунов А.В., Крутиков В.Н., Котюк А.Ф., Лахов В.М., Левин А.Д., Левин Г.Г., Лысенко В.Г., Ляковский В.Л., Мазуренко С.Н., Минаева О.А., Минаев Р.В., Морозова С.П., Новиков Н.Ю., Окрепилов В.В., Панкина Г.В., Панов В.И., Рукин Е.М., Савченко А.Г., Саприцкий В.И., Тодуа П.А., Толбанова Л.О., Федянин А.А., Хлевной Б.Б., Широков С.С., Шувалов Г.В., Элькин Г.И.

М54 Метрологическое обеспечение нанотехнологий и продукции наноиндустрии: учеб. пособие / под ред. В.Н. Крутикова. — М.: Логос, 2011. — 592 с.

ISBN 978-5-98704-613-5

Освещаются методы и средства метрологического обеспечения нанотехнологий и аналитического контроля наноматериалов. Рассмотрены меры по обеспечению единства измерений в Российской Федерации, ведущие тенденции развития нанотехнологий за рубежом и в России, обосновано формирование инфраструктуры центра метрологического обеспечения и оценки соответствия нанотехнологии и продукции наноиндустрии. Описаны методы и средства метрологического обеспечения исследований нанотехнологий и оценки соответствия продукции наноиндустрии. Раскрыты прикладные вопросы метрологического обеспечения реализованных проектов в отдельных областях наноиндустрии в рамках Федеральной целевой программы «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008–2011 годы».

Для специалистов центров стандартизации и метрологии, метрологических служб предприятий, поверителей, сотрудников санитарно-эпидемиологической службы, проходящих переподготовку и приобретающих дополнительную квалификацию в Академии стандартизации, метрологии и сертификации Росстандарта. Будет полезна студентам вузов, получающим образование в области нанотехнологии и нанометрологии.

УДК 006
ББК 30.10

ISBN 978-5-98704-613-5

© Авторы, указанные на обороте
титального листа, 2011
© Логос, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| Предисловие <i>Г.И. Элькин, В.Н. Крутиков, Г.В. Панкина</i> | 9 |
| Введение <i>Г.И. Элькин, В.Н. Крутиков</i> | 13 |
| Раздел 1. Обеспечение единства измерений в Российской Федерации | 16 |
| 1.1. Законодательство Российской Федерации в области обеспечения единства измерений <i>В.Н. Крутиков, Н.Ю. Новиков</i> | 16 |
| 1.2. Современное состояние системы обеспечения единства измерений в Российской Федерации <i>В.Н. Крутиков, В.М. Лахов</i> | 20 |
| 1.3. Основные положения «Стратегии обеспечения единства измерений в России до 2015 года» <i>Г.И. Элькин, В.Н. Крутиков, С.А. Кононогов, В.М. Лахов</i> | 33 |
| Раздел 2. Обеспечение единства измерений в сфере нанотехнологий, наноматериалов и продукции nanoиндустрии | 45 |
| 2.1. Основные тенденции развития нанотехнологий за рубежом <i>С.Н. Мазуренко, В.Н. Крутиков</i> | 45 |
| 2.2. Основные направления развития нанотехнологий и nanoиндустрии в Российской Федерации <i>С.Н. Мазуренко, В.В. Качак, А.Г. Савченко, О.Д. Анашина</i> | 51 |

| | |
|--|-----|
| 2.3. Формирование нанотехнологической сети в Российской Федерации <i>С.Н. Мазуренко, В.В. Качак, А.Г. Савченко, О.Д. Анашина</i> | 103 |
| 2.4. Аналитический обзор состояния метрологического обеспечения и стандартизации в области нанотехнологий <i>В.Н. Крутиков, Ю.М. Золотаревский, С.Е. Андрюшечкин</i> | 113 |
| 2.5. О «Концепции обеспечения единства измерений, стандартизации, оценки соответствия и безопасности использования нанотехнологий, наноматериалов и продукции наноиндустрии в Российской Федерации до 2015 года» <i>Г.И. Элькин, В.Н. Крутиков, В.М. Лахов, С.А. Кононогов, Ю.М. Золотаревский</i> | 132 |
| 2.6. Формирование инфраструктуры Центра метрологического обеспечения и оценки соответствия нанотехнологий и продукции наноиндустрии <i>В.Н. Крутиков, В.М. Лахов, В.С. Иванов, В.В. Окрепилов, Ю.М. Золотаревский, Ф.В. Булыгин, В.Л. Ляковский, А.С. Гусев</i> | 147 |
| 2.7. Метрологический центр «РОСНАНО» <i>В.С. Иванов</i> | 170 |

Раздел 3. Методы и средства метрологического обеспечения исследований нанотехнологий и оценки соответствия продукции наноиндустрии

175

| | |
|--|-----|
| 3.1. Термины, определения и классификация объектов нанотехнологии и продукции наноиндустрии <i>В.Н. Крутиков, В.В. Окрепилов, П.А. Тодуа</i> | 175 |
| 3.2. Методы и средства измерений в сфере нанотехнологий <i>В.Н. Крутиков, Ю.М. Золотаревский, А.Ф. Котюк</i> | 197 |
| 3.3. Методики и средства измерений линейных размеров в нанометровом диапазоне <i>В.М. Лахов, П.А. Тодуа</i> | 216 |
| 3.4. Оптико-спектральные методы характеристики наночастиц <i>А.Д. Левин, Е.М. Рукин</i> | 244 |

| | |
|--|-----|
| 3.5. Метрологическое обеспечение нанотехнологий <i>В.Н. Крутиков, В.М. Лахов, В.С. Иванов, А.Ф. Котюк, Ф.В. Булыгин</i> | 272 |
| 3.6. Хроматографические методы анализа и их применение в nanoиндустрии <i>В.В. Бражников</i> | 307 |

Раздел 4. Прикладные вопросы метрологического обеспечения в сфере нанотехнологий и продукции nanoиндустрии.....331

| | |
|---|-----|
| 4.1. Введение <i>В.Н. Крутиков, В.М. Лахов, С.А. Кононогов, В.С. Иванов</i> | 331 |
| 4.2. Метрологическое обеспечение оптических характеристик излучателей на основе полупроводниковых многослойных наноразмерных гетероструктур (светодиодов) <i>Т.Б. Горшкова, С.С. Широков, В.И. Саприцкий</i> | 334 |
| 4.3. Метрологическое обеспечение характеристик солнечных батарей на основе нанотехнологий <i>С.П. Морозова, Б.Б. Хлевной, В.И. Саприцкий, В.С. Иванов, Ю.М. Золотаревский</i> | 359 |
| 4.4. Метрологическое обеспечение технологий формирования многослойных наноструктур на основе использования синхротронного излучения <i>С.И. Аневский, В.С. Иванов, Ю.М. Золотаревский, В.Н. Крутиков, В.М. Лахов, О.А. Минаева, Р.В. Минаев</i> | 428 |
| 4.5. Метрологическое обеспечение нанотехнологий адресной доставки лекарств <i>А.Д. Левин, Е.М. Рукин</i> | 468 |
| 4.6. Метрологическое обеспечение оптических постоянных наноструктурированных материалов <i>Г.Г. Левин, А.В. Демин, П.К. Кашкаров, В.И. Панов, А.А. Федянин, С.В. Заботнов, Л.А. Головань</i> | 483 |

| | |
|---|------------|
| 4.7. Разработка системы метрологического обеспечения измерений термохимических параметров нанопорошков металлов <i>Г.В. Шувалов, А.П. Ильин, И.В. Клековкин, А.В. Кориунов, Л.О. Толбанова</i> | 537 |
| 4.8. Метрологическое обеспечение параметров рельефа и шероховатости поверхности в нанометровом диапазоне методами интерферометрии высокого разрешения <i>С.А. Кононогов, С.Ю. Золотаревский, В.Г. Лысенко</i> | 567 |
| Заключение | 588 |
| Список основных сокращений | 589 |

ПРЕДИСЛОВИЕ

Актуальность подготовки настоящего учебного пособия обусловлена бурным развитием нанотехнологий в нашей стране и за рубежом, потребовавшим создания и развития инновационной инфраструктуры с системами инструментального, методического и кадрового обеспечения деятельности создаваемой в Российской Федерации нанотехнологической сети. Как известно, развитие нанотехнологий в России было выделено в число приоритетных направлений науки и техники, что нашло отражение в следующих документах:

1. Президентская инициатива «Стратегия развития nanoиндустрии» (№ Пр-688 от 24 апреля 2007 г.)

2. Программа развития nanoиндустрии в Российской Федерации до 2015 года.

3. Концепция обеспечения единства измерений, стандартизации, оценки соответствия и безопасности использования нанотехнологий, наноматериалов и продукции nanoиндустрии в Российской Федерации до 2015 г.

4. Федеральная целевая программа «Развитие инфраструктуры nanoиндустрии в Российской Федерации на 2008–2011 годы» (утверждена постановлением Правительства Российской Федерации № 471 от 21 июня 2010 г.).

Следует отметить, что в приведенных выше нормативных документах одним из важнейших направлений развития nanoиндустрии в России признано создание методической составляющей, включающей обеспечение единства измерений (ОЕИ) параметров изделий nanoиндустрии, стандартизацию, сертификацию, обеспечение безопасности производства и применения изделий nanoиндустрии.

Комплексность и сложность нанотехнологических проблем требуют разработки новых государственных образовательных стандартов, вынуждают искать новые подходы к подготовке специалистов. В этой связи большое внимание уделяется повышению уровня метрологического образования кадров, связанных с производством и применением изделий nanoиндустрии, а также с разработкой,

производством и эксплуатацией соответствующего измерительного и аналитического оборудования. При этом подготовка кадров призвана решать две важнейших задачи:

- 1) подготовку молодых специалистов и аспирантов на базе ведущих высших профессиональных учебных заведений страны;
- 2) повышение квалификации работающих специалистов за счет переподготовки и организации их стажировок в научно-образовательных центрах при ведущих метрологических институтах как у нас в стране, так и за рубежом.

С учетом интересов основного контингента пользователей было решено сформировать структуру учебного пособия в виде четырех разделов, на первый взгляд не зависящих друг от друга, а на самом деле тесно взаимосвязанных.

Раздел 1 посвящен детальному описанию состояния обеспечения единства измерений в Российской Федерации и знакомит читателей с законодательной базой, построенной на концептуально-стратегической основе последних лет.

В разделе 2 наряду с описанием тенденции развития нанотехнологий за рубежом основное внимание уделено детальному рассмотрению отечественной нанотехнологии и nanoиндустрии на базе научных учреждений и производственных предприятий страны, для которых характерно интенсивное и многоплановое развитие особенно в последние годы.

Завершается раздел информацией о формировании инфраструктуры Центра метрологического обеспечения и оценки соответствия нанотехнологий и продукции nanoиндустрии, а также о создании Метрологического центра «РОСНАНО».

Прогресс в области метрологического обеспечения оптико-физических и физико-химических измерений, используемых в nanoиндустрии, в значительной степени определяется возможностями новых высокоточных методов и средств анализа, позволяющих выполнять измерения с предельной чувствительностью на уровне счета отдельных квантов с энергией 10 эВ и менее, с порогом обнаружения характеристических масс вещества порядка фемто- и аттограммов, с временным разрешением до нескольких аттосекунд, в спектральном диапазоне от гамма- и рентгеновского излучения до радиочастотных длин волн.

Приборы, используемые в nanoиндустрии, представляют собой наиболее современные и высокотехнологичные средства измерений (СИ), основанные на последних достижениях в области технических наук. К ним относятся просвечивающие и сканирующие электронные микроскопы, различные виды сканирующих зондовых

микроскопов, в том числе и оптические ближнепольные, оптические конфокальные двухфотонные микроспектрометры, лазерные микроинтерферометры, микроспектрофотометры и ряд других высокочувствительных СИ.

Постоянно разрабатываются и внедряются в практику новые законодательные и нормативные требования, методики измерений упомянутыми выше и другими высокотехнологичными приборами, основанными на сложных физико-химических явлениях и квантовых взаимодействиях. Совершенствуются технологии аналитического приборостроения, средства автоматизации и математического программного обеспечения. Поэтому для поддержания квалификации, соответствующей современному научно-техническому уровню, даже специалистам, получившим высшее образование и ученую степень всего несколько лет назад, необходимо постоянное обновление научно-технических знаний и методической информации.

Этим вопросам посвящена обширная совокупность монографий, статей, обзоров и докладов практически по всем направлениям развивающейся нанометрологии. В связи со сказанным выше, раздел 3, посвященный методам и средствам метрологического обеспечения исследований нанотехнологий и оценки соответствия продукции nanoиндустрии, было решено построить на основе обобщения информации, содержащейся в трудах ряда отечественных и зарубежных ученых, сумевших в доступной форме структурировать многочисленные сведения по вопросам, рассматриваемым в данном разделе. К ним относятся:

1. Публикации академика Ж.И. Алферова, неоднократно появляющиеся в журнале «Успехи физических наук» и других изданиях (например, Ж.И. Алферов и др. «Нанотехнология и зондовая микроскопия» и «Микросистемная техника»).

2. «Нанотехнологии, метрология, стандартизация и сертификация в терминах и определениях» / под ред. М.В. Ковальчука, П.А. Тодуа — М.: Техносфера, 2009. — 136 с.

3. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. — М.: Техносфера, 2001. — 328 с.

4. Leach R.K. and oth. Fundamental Principles of Engineering Nanometrology, 2007. — 288 p.

5. Czichos H. Metrology and Materials Science and Technology, Measure, 2009. V. 4. № 4. December. — 48 p. (Review).

Некоторые отрывки из этих работ цитируются, поскольку содержат наиболее простые и четкие формулировки или краткие описания процессов, явлений и наиболее характерных особенностей методов

и средств метрологического обеспечения нанотехнологий, производства наноматериалов и продукции nanoиндустрии.

Последний раздел подготовлен преимущественно метрологами ФГУП «ВНИИОФИ», ФГУП «ВНИИМС» и ФГУП «СНИИМ» при участии специалистов МГУ им. М.В. Ломоносова и НИЦ «Курчатовский институт», специализирующимися в основном в области метрологического обеспечения проектов по проблемам наноэлектроники, нанофотоники, нанодиагностики, нанобиотехнологии и контроля параметров порошковых наноматериалов.

Авторы пособия будут весьма признательны всем пользователям, приславшим свои критические замечания в адрес издательства или непосредственно во ФГУП «ВНИИОФИ» по адресу: г. Москва, 119361, ул. Озерная, 46, дирекция.

Авторский коллектив выражает искреннюю благодарность и глубокую признательность специалистам метрологических институтов, организаций и центров Росстандарта за помощь и содействие при формировании материалов этого учебного пособия.