

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра материаловедения, технологии  
и управления качеством

**НАНОМЕТРОЛОГИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
НАНОТЕХНОЛОГИЙ**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 4 курса 431 группы  
направления 27.03.02 «Управление качеством»  
факультета нано- и биомедицинских технологий

Дулумбаджи Вячеслава Николаевича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

С.В. Стецюра

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор,

должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

С.Б. Вениг

инициалы, фамилия

Саратов 2020

**Введение.** Актуальность темы исследования обусловлена развитием нанотехнологий и их воздействием на науку, общество и человека. В этой связи особая роль отводится метрологии и вместе с ней стандартизации, которые становятся ключевыми элементами развития приборно-аналитической, технологической и интеллектуальной составляющих нанотехнологий и nanoиндустрии. Специфика нанотехнологий привела к необходимости появления и быстрого развития уникального направления метрологии – нанометрологии, в котором отражены все теоретические и практические аспекты, связанные с правильностью измерений в нанотехнологиях. Развитие нанометрологии повлекло за собой разработку новых эталонов, стандартных образцов состава, структуры, размера, свойств, разработку методов и средств калибровки в нанометровом диапазоне, реализацию наношкалы и многое другое, направленное в целом на обеспечение единства измерений в нанодиапазоне [1].

Целью настоящего исследования является проведение комплексного анализа нанометрологии и метрологического обеспечения нанотехнологий, а также формирование содержательной части учебной дисциплины «Нанометрология».

Исходя из цели были поставлены следующие задачи:

- 1) установить актуальные цели и задачи развития отрасли «Нанометрология»;
- 2) выявить особенности измерений в нанометровом диапазоне;
- 3) изучить проблемы измерений в нанометрологии;
- 4) исследовать инструментарий для измерения в нанометровом диапазоне;
- 5) изучить разновидности и режимы работы микроскопов, их физические ограничения, преимущества и недостатки;
- 6) исследовать структуры, строения материалов на наноуровне;
- 7) классифицировать существующие артефакты, возникающие при измерении на наноуровне;
- 8) проанализировать нормативную базу нанометрологии;

- 9) провести нанометрологическое измерение на практике;
- 10) проанализировать результаты измерений;
- 11) описать операции компьютерной обработки, устраняющие типичные артефакты АСМ изображений;
- 12) осуществить компьютерную обработку топографических изображений, полученных практическим путем, с помощью Gwyddion;
- 13) провести обзор учебных программ высших учебных заведений Российской Федерации в области нанометрологии;
- 14) сформировать структуру содержательной части учебной программы по дисциплине «Нанометрология»;
- 15) составить тестовые задания для контрольной проверки знаний обучающихся на тему «Нанометрология».

В выпускной квалификационной работе пять глав:

- 1) Нанометрология – актуальные цели и задачи в развитии данной отрасли Инструментарий для измерения в нанометровом диапазоне.
- 2) Инструментарий для измерения в нанометровом диапазоне
- 3) Нормативная база нанометрологии.
- 4) Проведение нанометрологических измерений на практике.
- 5) Формирование содержательной части учебной дисциплины «Нанометрология».

Дипломная работа занимает 65 страниц, имеет 11 рисунков и 1 таблицу.

Обзор составлен по 34 информационным источникам.

### **Основное содержание работы**

*В первой главе* выпускной квалификационной работы «Нанометрология – актуальные цели и задачи в развитии данной отрасли» была изучена научная литература на тему «нанометрология» и «нанотехнологии». Был изучен научный интерес в Российской Федерации к развитию нанометрологии. Были выявлены основные проблемы по тематике «нанометрология» и поставлены основные задачи нанометрологии:

- Реализация нанoshкалы в нанометровом и прилегающем к нему диапазонах.
- Обеспечение единства измерений геометрических параметров нанообъекта, опирающееся на метрологию линейных измерений.
- Измерение механических, электрических, магнитных, оптических и других параметров и свойств объектов нанотехнологий, требующих осуществления позиционирования зонда измерительного устройства в требуемое место с эталонной точностью.

Исходя из перечисленных задач, можно выделить ряд факторов, влияющих на точность измерения в нанодиапазоне. Классификация этих факторов в соответствии с принципами, предложенными Исикава, позволили построить диаграмму Исикавы (рисунок 1), иллюстрирующую проблему искажений результатов измерений и СЗМ-изображений.



Рисунок 1 – Диаграмма Исикавы

Были сделаны выводы о том, что для решения научно-технической проблемы обеспечения единства измерений в нанотехнологиях необходимо осуществить ряд научно-методических, технических и организационных мероприятий [2].

*Во второй главе* выпускной квалификационной работы «Инструментарий для измерения в нанометровом диапазоне» был изучен основной инструментарий для измерений в нанометровом диапазоне. Получены теоретические знания о принципах работы каждого из микроскопов, измеряющих в нанометровом диапазоне.

Были изучены основные артефакты, появляющиеся при измерении в нанометровом диапазоне и выделены три группы артефактов:

1. Инструментальные артефакты – это искажения изображений, которые вносятся от составляющих прибора. Два главных конструктивных элементов микроскопа – сканер и зонд – представляют собой основные источники инструментальных артефактов. Вместе с тем, искажают изображения также механические вибрации и акустические шумы. Данные проблемы решаются, как правило, производителями приборов.

2. Артефакты режима – это то, что вносит оператор, то есть ошибки при установке параметров режимов работы. Указанные проблемы решаются производителями приборов и самими исследователями в виде разработки рекомендаций по методике ведения измерений.

3. Артефакты состояния – это то, что привносит сам объект. Данные артефакты появляются в следствии эффектов, которые связаны с особенностью взаимодействия между зондом и поверхностью исследуемых объектов. В указанном случае через АСМ-изображения проявляется специфика каждого исследуемого объекта и состояния окружающей среды. Предотвращение этой проблемы осуществляется самим пользователем микроскопа [3].

*В третьей главе* исследовательской работы «Нормативная база нанометрологии» была изучена нормативная база в нанометрологии. Изучен научный интерес к развитию нормативной базы в России. Было изучено одиннадцать стандартов, которые к настоящему времени разработаны и внедрены. Изучена роль стандартизации – как ключевого элемента приборно-аналитической, технологической и интеллектуальной составляющих нанотехнологий и nanoиндустрии. Анализ литературы показывает, что одна из

первоочередных задач стандартизации в нанотехнологиях – стандартизация параметров и свойств материалов, объектов, элементов и структур нанотехнологий, подлежащих измерениям.

В результате анализа вышеперечисленных ГОСТов в процессе выполнения ВКР была создана их классификация по методам измерения, которая отражена в схеме на рисунок 2.

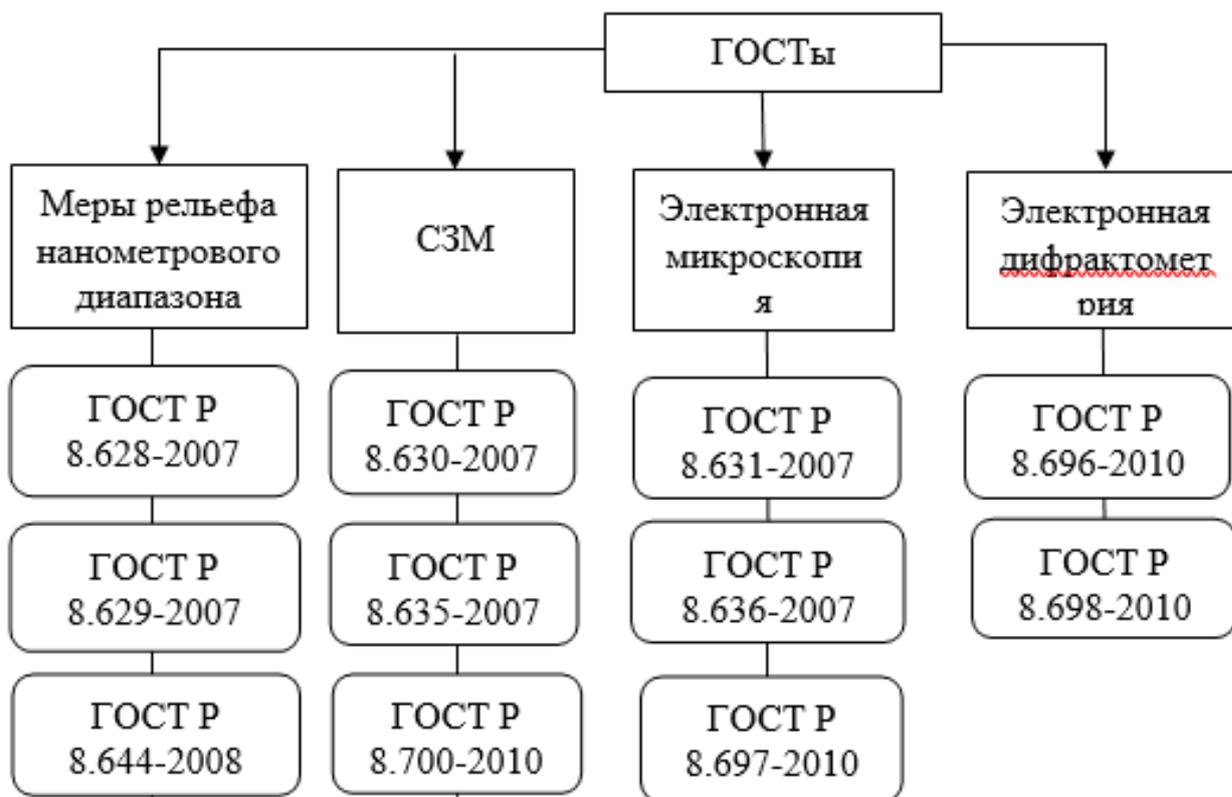


Рисунок 2 – Классификация ГОСТов по методу измерений

Было выявлено, что особый аспект стандартизации – решение задач обеспечения здоровья и безопасности операторов технологических процессов и лиц, взаимодействующих с продукцией нанотехнологий на всех этапах её производства, испытаний, исследований и применений вплоть до утилизации, а также экологической безопасности окружающей среды [4].

**В четвертой главе** «Проведение нанометрологических измерений на практике» были получены практические навыки по работе с микроскопом, измеряющем в нанометровом диапазоне; получен опыт по обработке топографических изображений, полученных практическим путем. Получены

практические знания в работе с зондовой станцией Ntegra Spektra, работающей в полуконтактном режиме атомно-силового микроскопа. Измерен тестовый образец (калибровочная пластина, для которой известны паспортные данные) и образец, полученный в лабораторных условиях нанесением фермента глюкозооксидазы на подложки n-Si/a-Si/PEI и p-Si/a-Si/PEI. Молекулы глюкозооксидазы имеют нанометровые размеры, а исходная поверхность подложек имеет развитую морфологию наноуровня. Были получены топографические изображения обоих образцов и выполнена компьютерная обработка с помощью программного обеспечения «Gwyddion» (использовались стандартные инструменты Gwyddion для обработки) (рисунок 3-5) [5].

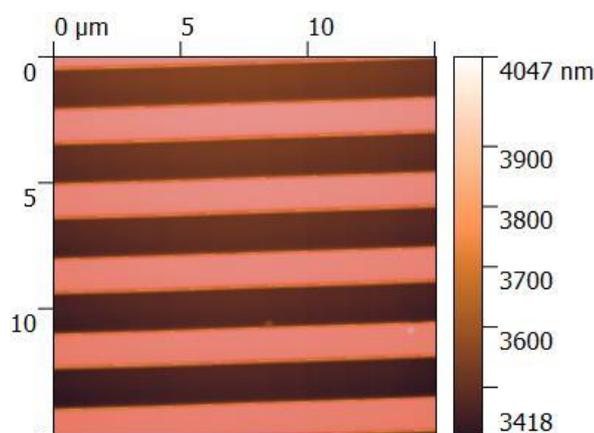


Рисунок 3 – АСМ изображение тестового образца после обработки

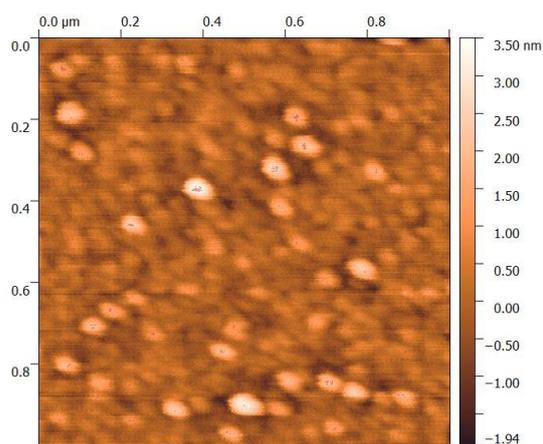


Рисунок 4 – Образец n-Si/a-Si/PEI  
после обработки

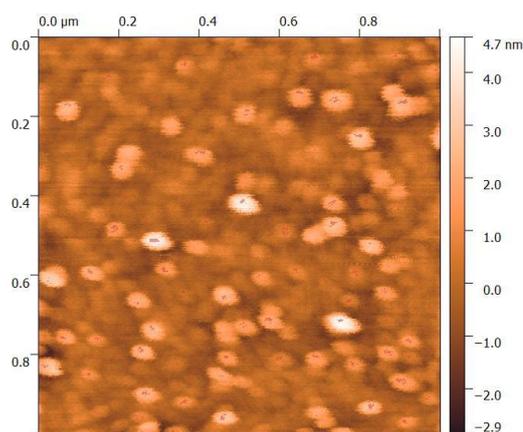


Рисунок 5 – Образец p-Si/a-Si/PEI  
после обработки

В конце работы были получены данные о поверхности обработанного образца n-Si/a-Si/PEI.

**В пятой главе** выпускной квалификационной работы «Формирование

содержательной части учебной дисциплины «Нанометрология» был изучен уровень развития «Нанометрология» как отдельной дисциплины в ВУЗах России. Изучены основные документы в области нанометрологии; изучены основные направления развития нанометрологии. Изучены рабочие программы разных ВУЗов России, в которых преподается нанометрология, как отдельная дисциплина и как часть других дисциплин [6]. Сформирована примерная структура рабочей программы «Нанометрология» для изучения бакалаврами и магистрами:

1 Нанометрология – история создания, значимые лица в развитии, основные даты. Перспективы развития нанометрологии. Взаимосвязь нанометрологии с другими дисциплинами.

1.1 Развитие нанометрологии в 20 – начале 21 века.

1.2 Перспективы развития нанометрологии.

1.3 Специфика и основные задачи нанометрологии.

1.4 Способ передачи размера единиц от эталонных к рабочим.

1.5 Принципы, положенные в основу создания измерительно-технологических комплексов для обеспечения единства измерений.

2. Наноматериалы – понятие и виды. Области использования наноматериалов.

2.1 Использование наноматериалов в nanoиндустрии.

2.2 Свойства наноструктурированных материалов в зависимости от размерности структурных элементов.

2.3 Использование наноматериалов в авиации и космонавтике.

2.4 Наноматериалы в нефтяной промышленности.

2.5 Наноматериалы в агропромышленности и в биотехнологиях.

2.6 Наноматериалы в медицине и фармацевтике.

2.7 Строительные и отделочные наноструктурированные материалы.

3 Инструментарий для измерения в нанометровом диапазоне. Принцип работы. Микроскопия. Дифрактометрия. Проблемы измерений в нанометрологии.

3.1 Принцип работы СЗМ. Отличия АСМ от СТМ.  
3.2 Принцип работы электронных микроскопов. Отличия ПЭМ и РЭМ.  
3.3 Проблемы, приводящие к искажению результатов измерений на нано-уровне.

3.4 Основные факторы, влияющие на точность измерений.

3.5 Виды дифрактометров зависящие от источника излучения.

3.6 Виды дифрактометров в зависимости от исследуемых образцов.

3.7 Разрешающая способность основных методов исследования на нано-уровне.

4 Нормативная база в нанометрологии. Хронология развития ГОСТов.

4.1 Развитие метрологической базы в нанометровом диапазоне в России.

4.2 Хронология ГОСТов. Классификация ГОСТов.

5 Артефакты зондовой микроскопии.

5.1 Виды артефактов по источникам их возникновения.

5.2 Причины возникновения артефактов.

5.3 Решение проблем и устранение артефактов.

6 Способы обработки изображений, полученных в результате исследования наноматериалов.

6.1 Возможности обработки топографических изображений в приложения Gwyddion.

6.2 Возможности программного обеспечения Gwyddion в улучшении качества СЗМ-сканов.

Составлены тестовые задания по каждой главе для оценки знаний по дисциплине «Нанометрология».

**Заключение.** В ходе выполнения работы получены следующие основные выводы:

1. На основании анализа научной литературы, научных статей и нормативной базы установлено, что опережающее развитие метрологического обеспечения нанотехнологий и, в первую очередь, обеспечение единства линейных измерений в нано- и прилегающих к нему диапазонах – основа

нанометрологии, один из основных факторов успешного развития нанотехнологии. Именно сканирующие зондовые микроскопы полезны не только при изучении атомно-молекулярной структуры вещества.

2. В связи с этим были изучены режимы работы зондовых микроскопов СТМ и АСМ. Осуществлена работа с ними в лабораторных условиях, закреплены полученные результаты, позволившие в наибольшей степени повысить уровень моей научно-исследовательской деятельности – в процессе научного исследования был ознакомлен с устройством микроскопов производства компании NT-MDT Ntegra Spektra (режим АСМ) и Nanoeducator (режим СТМ).

3. Проведено измерение калибровочного образца и лабораторного образца с нанесенными молекулами фермента глюкозооксидазы на кремниевые подложки в режиме АСМ. Последующая обработка АСМ изображений позволила максимально устранить артефакты изображения и осуществить анализ цифровых изображений на наноуровне.

4. По окончанию работы с микроскопами проведена классификация артефактов топографических изображений, полученных с помощью АСМ. Выделены три группы артефактов по основным независимым источникам их возникновения: прибор, оператор, объект.

5. Изучена и проанализирована нормативная и научная база нанометрологии. Построена классификация ГОСТов в области нанометрологии, критериями построения которой являлся метод измерения на наноуровне.

6. Были выделены основные задачи нанометрологии, а также причины, влияющие на точность измерения в нанодиапазоне. Исходя из этих данных была построена диаграмма Исикавы по проблеме «Искажение измерений и изображений на наноуровне».

7. Были проанализированы рабочие программы высших учебных заведений Российской Федерации, которые содержали хотя бы один раздел, связанный с нанометрологией и стандартизацией наноизмерений: «Метрология наноструктур и наноматериалов», «Материаловедение и технологии наноматериалов и наносистем», «Органические и неорганические

наноматериалы», «Технологии нанокomпонентов и энергонасыщенных наноматериалов», «Метрология наноструктурированных материалов» и многие другие. Выявлено, что «Нанометрология» не преподается в виде отдельной дисциплины в большинстве вузов, а является лишь темой (разделом) для изучения внутри таких дисциплин, как «Метрология и стандартизация» и «Нанотехнологии».

8. Итогом исследования найденных рабочих программ стало формирование собственной структуры программы дисциплины «Нанометрология». – и разработка тестовых заданий по всем разделам этой программы. Анализируя примеры тестовых заданий, предлагаемые другими ВУЗами по дисциплинам, связанным с нанотехнологиями, нанобъектами и нанометрологией, и, учитывая специфику и материал данных дисциплин, сделан вывод, что в учебную программу дисциплины «Нанометрология» следует включать в большей степени тестовые задания закрытого типа, не исключая при этом полностью задания открытого типа. В целом сформированная структура рабочей программы «Нанометрология» раскрывает основные элементы содержания дисциплины.

#### **Список использованных источников**

1 Тодуа, П. Нанометрология и стандартизация в нанотехнологиях / П. Тодуа // Наноиндустрия. Научно-технический журнал. – 2010. – Т. 1, № 5. – С. 42-52.

2 Ишмуратов, Ф. Г. Наноматериалы в современной России / Ф. Г. Ишмуратов, М. П. Яковлева // Вестник Башкирского университета. – 2013. – № 2. – С. 334-336.

3 Толстихина, А. Л. Артефакты при АСМ-измерениях в воздушной среде: их источники и способы устранения / А. Л. Толстихина // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии : сборник докладов IX Международной конференции (Беларусь 12 октября 2010). – Беларусь : Национальная академия наук Беларуси, Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова, 2010. – С. 46-49.

4 Хохлявин, С. А. Стандарты для измерений и характеристики свойств нанообъектов / С. А. Хохлявин // Наноиндустрия. – 2011. – № 8. – С. 46-49.

5 Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [Электронный ресурс] // СТ Р 8.000-2015 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Основные положения [Электронный ресурс] : [сайт]. – URL : <http://docs.cntd.ru/document/1200124116> (дата обращения: 20.04.2020). – Загл. с экрана. – Яз. англ.

6 Тестирование в современном образовании: учебное пособие / Т. А. Кабанова [и др]. – М. : Высшая школа, 2010. – 384 с.