

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

Кафедра материаловедения, технологии  
и управления качеством

**СТАНДАРТЫ И АРТЕФАКТЫ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4101 группы  
направления 27.03.02 «Управление качеством»  
института физики

Грачова Семёна Андреевича

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 2023

**Введение.** Одними из самых распространенных методов современной нанометрологии и нанодиагностики являются методы зондовой микроскопии. Методы зондовой микроскопии постоянно развиваются и сейчас в их группу входят такие методы, как: сканирующая туннельная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, электросиловая микроскопия, магнитно-силовая микроскопия и ближнепольная оптическая микроскопия [1]. Оборудование для реализации этих измерений также постоянно совершенствуется – современные зондовые микроскопы – это целые станции, совмещающие несколько зондовых методик [2].

Использование зондовых методов в науке и производстве всё более расширяется. Это можно проследить по увеличению научных публикаций на эту тему, патентованию новейших разработок и внедрению их в производство. Для проведения корректных измерений и их анализа требуется стандартизация как самих методов зондовых измерений, так и отдельных этапов измерения, включающих предварительную подготовку зондового микроскопа, например, таких как калибровка и поверка зондовых микроскопов.

Актуальность выпускной квалификационной работы заключается в том, что она помогает разобраться основные проблемы в нанометрологии и предлагает варианты их решения, что в свою очередь напрямую влияет на всю область зондовой микроскопии. Результаты исследований в данной работе приведут к более точным и обоснованным научным выводам во многих сферах деятельности, которые затрагивают нанотехнологии.

Целью выпускной квалификационной работы является проведение обзора, анализ и классификацию стандартов в области нанотехнологий и зондовой микроскопии, изучить и проанализировать с помощью инструментов управления качеством межгосударственные стандарты в области нанотехнологий и нанометрологии, а также их классифицировать.

На основе поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Изучить проблемы нанометрологии на примере зондовых микроскопов, выделить и обозначить основные артефакты измерений в области атомно-силовой микроскопии;

- Построить диаграмму Исикавы на тему «Метрологические проблемы нанотехнологий»;

- Провести поиск действующих стандартов в области зондовой микроскопии, нанотехнологии и нанометрологии, а также разбить все стандарты на группы по самостоятельно выделенным критериям;

- Дать краткое описание основных стандартов в области зондовой микроскопии и стандартов в области нанотехнологии и нанометрологии;

- Провести анализ областей и тем, охваченных стандартизацией в области зондовой микроскопии;

- Изучить проблемы стандартизации в области нанометрологии.

Выпускная квалификационная работа занимает 65 страниц, имеет 25 рисунков.

Обзор составлен по 46 информационным источникам.

Во введении рассматривается актуальность работы, устанавливается цель и выдвигаются задачи для достижения поставленной цели.

Первый раздел представляет собой описание атомно-силовой микроскопии – как одного из основных методов нанометрологии.

Во втором разделе работы проводится обзор и анализ стандартов в сфере нанотехнологий и нанометрологии.

### **Основное содержание работы**

В первом разделе описывается атомно-силовая микроскопия – как один из основных методов нанометрологии с полным описанием принципом действия атомно-силового микроскопа. Также проводится разбор принципа действия АСМ (рисунок 1) и приводится схема работы первого АСМ (рисунок 2).

В ходе работы были выявлены преимущества и недостатки АСМ.

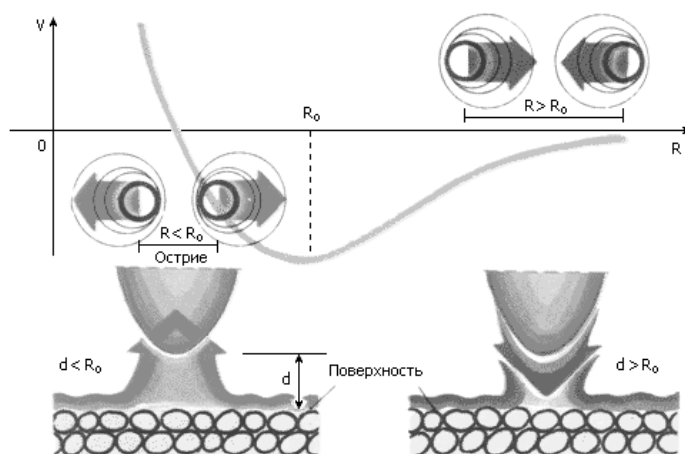


Рисунок 1 – Принцип действия АСМ

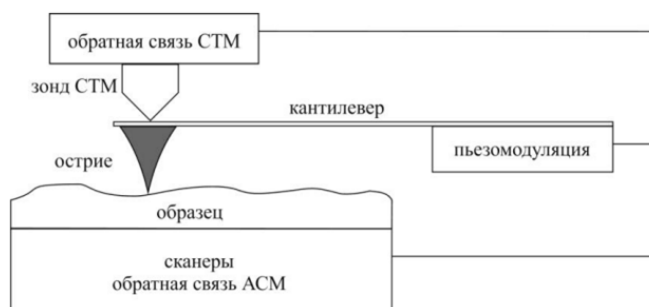


Рисунок 2 – Схема первого АСМ

Преимущества АСМ:

1. Исследование практически любых твердых и мягких материалов. В отличие от сканирующей электронной микроскопии на поверхность диэлектриков не требуется наносить проводящее покрытие.

2. Результаты не ограничиваются получением трехмерного изображения рельефа поверхности. Взаимодействие зонда с образцом открывает возможность исследования самых разнообразных свойств поверхности: локальные механические, электрические, магнитные и другие характеристики.

3. Проведение экспериментов в обычных комнатных условиях. Возможны исследования в вакууме либо жидкой среде, при пониженной или повышенной температуре.

Недостатки АСМ:

1. Относительно низкая скорость получения изображения. Изменения поверхности рельефа при температурных колебаниях или релаксации могут привести к искажению результатов. Последнее поколение АСМ лишено этого

недостатка и позволяет получать изображения практически в реальном времени, однако из-за высокой стоимости пока не имеет широкого распространения.

2. На результаты оказывает влияние геометрия острия. АСМ рельеф всегда является сверткой истинной поверхности образца и рельефа поверхности зонда. Зачастую исследователи закрывают глаза на этот недостаток. Тем не менее существуют методы, позволяющие «вычистить» из полученного изображения геометрию острия, тем самым повысить достоверность результатов.

3. Во время измерений образец должен быть совершенно неподвижен.

4. Небольшие, по сравнению с электронной сканирующей или оптической микроскопией, размеры исследуемой области. Обычно максимальный размер в плоскости не превышает 100x100 мкм, а предельный перепад высот в исследуемой области составляет ~ 10 мкм.

5. Сложность интерпретации результатов. Потеря контакта зонда с образцом или, наоборот, залипание к поверхности, наличие на острие инородных частичек, шумы, неправильная настройка – всё это сказывается на конечном результате.

Главный минус АСМ измерений – артефакты. АСМ измерения основаны на применении физических взаимодействий на атомарном уровне, являются весьма чувствительными к внешним факторам, кроме того, при интерпретации сканов возможны некоторые вариации. Всё это приводит к появлению различных артефактов, которые необходимо учитывать и по возможности устранять при АСМ исследованиях.

В повседневной практике наиболее часто встречаются артефакты, связанные с неправильной настройкой обратной связи, режимом работы, выбором зонда или особенностями его острия.

С учетом вышеизложенного материала была построена диаграмма Исикавы для систематизации и обобщения причин, вызывающих метрологические проблемы нанотехнологий. Для обеспечения развития сферы

нанотехнологий требуется чёткий разбор этих причин и их устранение. Диаграмма Исикавы помогает решить ряд трудностей и является частью в развитии в сфере нанометрологии и нанотехнологий.

Во втором разделе работы был проведён обзор и анализ стандартов в сфере нанометрологии. Представленные стандарты разделены на 12 частей, которые содержат в себе основные определения и термины, методы применения современных нанотехнологий, а также нанобъекты и их применение.

Сфера нанотехнологий охватывает огромный класс наук, которые имеют много аспектов их развития. Государственные стандарты серии «Нанотехнологии» имеют большое количество частей и для облегчения работы с ними была проведена их классификация.

Классификация ГОСТов серии «Нанотехнологии» по принадлежности к группам: «Термины и определения», «Современные нанотехнологии», «Нанобъекты, наноматериалы и их характеристики» и «Методы измерений нанобъектов» представлена на рисунке 3.

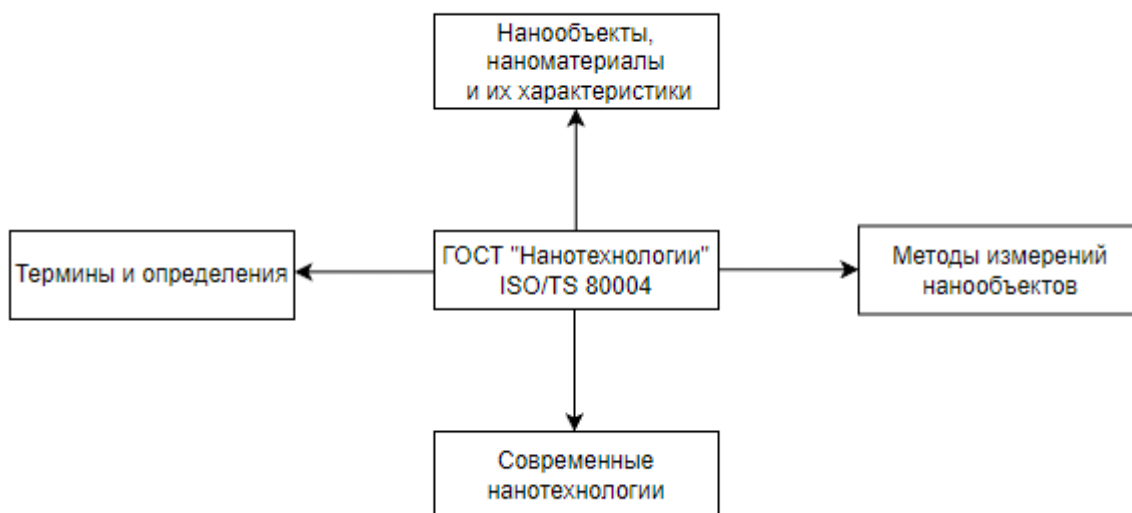


Рисунок 3 – Классификация ГОСТов серии «Нанотехнологии» по принадлежности к группам

В каждую группу входят один и более стандартов, которые непосредственно входят в класс «нанотехнологии». На рисунке 4 представлены стандарты и их классификация к группам.

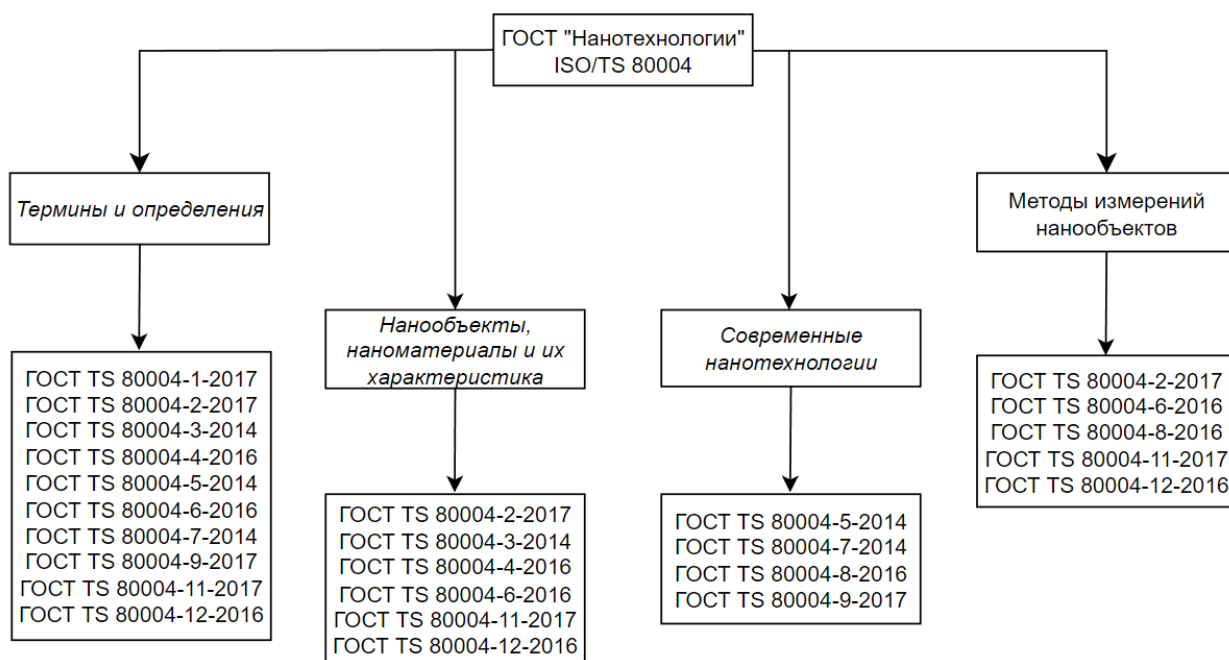


Рисунок 4 – Классификация стандартов по подгруппам

В третьем разделе описывается стандартизация в области зондовой микроскопии, где первым этапом выступает обзор сайтов производителей аппаратуры для зондовой микроскопии. Для анализа были найдены 6 сайтов производителей зондовых микроскопов (3 российских и 3 зарубежных).

Группа компаний NT-MDT SPECTRUM INSTRUMENTS (г. Зеленоград, Россия) является самой крупной российской компанией, которая специализируется в разработке и производстве научного оборудования, предназначенного для нанотехнологических измерений. Компания выпускает полный ряд СЗМ начиная с обучающих и заканчивая научными.

Сеть центров AFM Workshop является небольшой фирмой, которая выпускает сканирующие зондовые микроскопы бюджетного сегмента, а также комплекты СЗМ для самостоятельной ручной сборки. AFMWorkshop имеет широкую сеть центров обслуживания клиентов и партнеров по распространению по всему миру, главный офис находится в Южной Каролин,

США.

AIST-NT является отделившимся от более крупной российской компании NT-MDT, приборы которой имеют самый быстрый сканер, настройка приборов полностью автоматизирована, а также есть возможность объединения СЗМ с рамановской спектроскопией.

Производственная компания DME (Danish Micro Engineering) является датской фирмой, которая специализируется на производстве сканирующих зондовых микроскопов, а также производит системы под заказ, что представляет из себя встраивание СЗМ компании в другие системы.

Интернациональная корпорация Bruker является изначально немецкой компанией, которая на сегодняшний день является огромной интернациональной корпорацией. Bruker купила подразделение СЗМ компании Veeco и продолжила выпускать приборы, которые до сих пор являются наиболее популярными и наиболее распространенными по всему миру.

Центр перспективных технологий АТС (Москва, МГУ) является российской компанией, оборудование которой похоже на старый DI MultiMode, но представляющее из себя более бюджетную версию. Компания АТС специализируется на разработке и производстве высокоточного измерительного оборудования для исследований в микро- и нанометровых масштабах.

Вторым пунктом является разбор межгосударственных стандартов, созданных для стандартизации зондовой микроскопии, количество которых за последние 15 лет превышает 20 единиц, часть из которых неоднократно переиздавалась или дополнялась ввиду актуальности данной тематики.

Для стратификации на группы стандартов в области зондовой микроскопии были выделены несколько тематик межгосударственных стандартов внутри найденной совокупности. Это следующие тематики, которые выполнили роль критериев при разделении всех стандартов на группы:

- Меры рельефные для зондовой микроскопии;
- Шероховатость поверхности и методы её измерения;
- Разные типы микроскопов: сканирующие зондовые атомно-силовые;



электронные растровые, просвечивающий электронный, ближнепольный оптический и др., включая стандартизацию процедур поверки и калибровки;

- Дополнительные возможности и функции микроскопов: химический анализ поверхности, измерение межплоскостных расстояний в кристаллах, Микроанализ электронно-зондовый, энергодисперсионный анализ и т.д.;

- Стандартизация и подготовка объектов исследования для зондовой микроскопии.

**Заключение.** Зондовая микроскопия и нанотехнологии в современных реалиях являются двумя тесно взаимосвязанными элементами в науке, без которых тяжело представить продвижение научной деятельности в дальнейшем.

Нанотехнологии – это важная и точная наука, включающая в себя совокупность технологических методов, которые применяются для изучения, а также проектирования, производства материалов, различных систем и устройств, а также применяется непосредственно в области зондовой микроскопии.

На данный момент производители зондовых микроскопов в России по ассортименту и качеству продукции могут напрямую конкурировать с зарубежными производственными компаниями. Актуальными в этой связи являются работы по созданию и совершенствованию программного обеспечения и нормативной базы, регламентирующей большинство этапов жизненного цикла зондовых микроскопов – от их производства, производства стандартных мер, до обслуживания и эксплуатации микроскопов. Нормативная база данных должна постоянно обновляться в связи с расширением ассортимента, функций и возможностей современных зондовых микроскопов. Актуализация баз ГОСТов в области зондовой микроскопии важна для корректного использования инструментов зондовой микроскопии в нанометрологии и нанодиагностике.

Для стратификации на группы в области зондовой микроскопии были выделены несколько тематик межгосударственных стандартов внутри

найденной совокупности. Это следующие тематики, которые выполнили роль критериев при разделении всех стандартов на группы:

- Меры рельефные для зондовой микроскопии;
- Шероховатость поверхности и методы её измерения;
- Разные типы микроскопов: сканирующие зондовые атомно-силовые; электронные растровые, просвечивающий электронный, ближнепольный оптический и др., включая стандартизацию процедур поверки и калибровки;
- Дополнительные возможности и функции микроскопов: химический анализ поверхности, измерение межплоскостных расстояний в кристаллах, Микроанализ электронно-зондовый, энергодисперсионный анализ и т.д.;
- Стандартизация и подготовка объектов исследования для зондовой микроскопии.

Для классификации стандартов в области нанотехнологии были выделены 4 подгруппы:

- Основные термины и определения;
- Нанообъекты, наноматериалы и их характеристики;
- Современные нанотехнологии;
- Методы измерений нанообъектов;

В ходе выполнения практики были получены следующие результаты:

- Изучены межгосударственные стандарты серии «Нанотехнологии», произведён их анализ и классификация;
- Построена диаграмма Исикавы на тему «Метрологические проблемы нанотехнологий»;
- Произведён обзор сайтов производителей аппаратуры для зондовой микроскопии;
- Произведена стратификация стандартов на группы в области зондовой микроскопии.

#### **Список использованных источников**

1 Сканирующая туннельная микроскопия и атомарно-силовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур : учебное

пособие / С.А. Рыков. – СПб. : изд-во СПбПУ, 2022. – 75 с.

2 5 разных типов микроскопов и их применение [Электронный ресурс] // Новая наука [Электронный ресурс] : [сайт]. – URL: <https://new-science.ru/5-raznyh-tipov-mikroskopov-i-ih-primeneniye/> (дата обращения: 05.04.2023). – Загл. с экрана. – Яз. рус.