Приложение 5

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина»
Инженерно-технический институт
Кафедра теоретической и экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:
И.о. директора института



Т. В. Пасько
«13» апреля 2026 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по дисциплине 2.1.Э.2 Физические принципы метода наноиндентирования в физике твердого тела

Научная специальность: 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Уровень высшего образования: подготовка кадров высшей квалификации по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре

Формы обучения: очная

год набора: 2026

Тамбов, 2026

Автор программы:
Доктор физико-математических наук, профессор Шибков Александр Анатольевич

Рабочая программа составлена в соответствии с федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов (адъюнктов) (приказ Минобрнауки России от 20 октября 2021 г. № 951).

Рабочая программа принята на заседании Кафедры теоретической и экспериментальной физики «13» апреля 2026 г. Протокол № 6

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цели и задачи дисциплины…… 4

2. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры……. 4

3. Объем и содержание дисциплины…… 4

4. Контроль знаний обучающихся……. 6

5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины…… 8

6. Материально-техническое обеспечение дисциплины, программное обеспечение, профессиональные базы данных и информационные справочные системы……. 9

1. Цели и задачи дисциплины

1.1 Цель дисциплины - заключается в формировании современных представлений о физических принципах тестирования микромеханических свойств материалов и наноматериалов методами наноиндентирования, а также об особенностях поведения материалов на наноуровне.

1.2 Задачи дисциплины:

- развитие теоретических представлений и навыков научно-исследовательской деятельности в области физики конденсированного состояния на различных масштабных уровнях;
- освоение методов научных исследований; освоение теорий и моделей; участие в проведении физических исследований по выбранной тематике с использованием методов исследования нанообъектов, участие в обработке полученных результатов научных исследований на современном уровне, работа с научной литературой;
- освоение методов применения результатов научных исследований в инновационной деятельности.

1.3 Требования к результатам освоения дисциплины

В результате освоения дисциплины аспирант должен:

Знать:

- общие принципы и приемы метода наноиндентирования в физике твердого тела;
- статистические и динамические методы определения твердости.

Уметь:

- учитывать размерные эффекты при измерении механических свойств твердых тел;
- определять влияние различных факторов в инициировании начальной пластичности под индентором.

Владеть:

- основами техники наноиндентирования и методами анализа p-h диаграмм;
- методами определения внутренних напряжений и времязависимых свойств при индентировании.

2. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры:

Дисциплина «Физические принципы метода наноиндентирования в физике твердого тела» относится к образовательному компоненту "Дисциплины (модули)" программы аспирантуры по научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Дисциплина «Физические принципы метода наноиндентирования в физике твердого тела» является элективной.

Дисциплина «Физические принципы метода наноиндентирования в физике твердого тела» изучается в 2 семестре.

3.Объем и содержание дисциплины

3.1.Объем дисциплины: 2 з.е.

Очная: 2 з.е.

Вид учебной работы	Очная (всего часов)
Общая трудоёмкость дисциплины	**72**
Контактная работа	4
Лекции (Лекции)	2
Практические (Практ. раб.)	2
Самостоятельная работа (СР)	68
Зачет	-

3.2.Содержание дисциплины:

№ темы	Название раздела/темы	Вид учебной работы, час.			Формы текущего контроля
		Лекции	Практ. раб.	СР	
		О	О	О	
2 семестр					
1	Методы определения твердости	1	1	10	Собеседование; письменная самостоятельная работа
2	Принципы и техника наноиндентирования	1	1	10	Собеседование; письменная самостоятельная работа
3	Механическое поведение материала в нано- и субмикрообъемах при индентировании	-	-	16	Собеседование; письменная самостоятельная работа
4	Упругопластическая деформация при индентировании	-	-	16	Собеседование; письменная самостоятельная работа
5	Разрушение при индентировании	-	-	16	Собеседование; письменная самостоятельная работа

Тема 1. Методы определения твердости

Лекция.

Статистические методы определения твердости. Твердость по Бринеллю. Твердость по Виккерсу. Микротвердость. Твердость по Роквеллу. Соотношение значений твердости, полученных различными статистическими методами, между собой и с механическими свойствами материалов. Динамические методы определения твердости. Твердость по Шору (метод упругого отскока бойка). Проба на твердость царапанием. Динамическая нанои микротвердость.

Практическое занятие.

Сообщения и доклады по следующим вопросам: Статистические методы определения твердости. Твердость по Бринеллю. Твердость по Виккерсу. Микротвердость. Твердость по Роквеллу. Соотношение значений твердости, полученных различными статистическими методами, между собой и с механическими свойствами материалов. Динамические методы определения твердости. Твердость по Шору (метод упругого отскока бойка). Проба на твердость царапанием. Динамическая нанои микротвердость.

Задания для самостоятельной работы.

Проработка конспектов лекций и вопросов, вынесенных на самостоятельное изучение основной и дополнительной литературы; подготовка к контрольной работе.

Тема 2. Принципы и техника наноиндентирования

Лекция.

Основы техники наноиндентирования. Информационные возможности наноиндентирования. Методы анализа P-h-диаграмм. Склерометрия. Перспективы развития техники наноиндентирования.

Практическое занятие.

Сообщения и доклады по следующим вопросам: Основы техники наноиндентирования. Информационные возможности наноиндентирования. Методы анализа P-h-диаграмм. Склерометрия. Перспективы развития техники наноиндентирования.

Задания для самостоятельной работы.

Проработка конспектов лекций и вопросов, вынесенных на самостоятельное изучение основной и дополнительной литературы; подготовка к контрольной работе.

Тема 3. Механическое поведение материала в нано- и субмикрообъемах при индентировании

Задания для самостоятельной работы.

Упругий контакт. Контактная жесткость и модуль Юнга. Феноменология упругопластического перехода в наноконтакте. Гомогенное зарождение дислокаций под индентором. Роль различных факторов в инициировании начальной пластичности (состояние поверхности, примесные атомы, границы зерен, точечные дефекты). Сообщения и доклады по следующим вопросам: Упругий контакт. Контактная жесткость и модуль Юнга. Феноменология упругопластического перехода в наноконтакте. Гомогенное зарождение дислокаций под индентором. Роль различных факторов в инициировании начальной пластичности (состояние поверхности, примесные атомы, границы зерен, точечные дефекты). Проработка конспектов лекций и вопросов, вынесенных на самостоятельное изучение основной и дополнительной литературы; подготовка к контрольной работе.

Тема 4. Упругопластическая деформация при индентировании

Задания для самостоятельной работы.

Определение внутренних напряжений. Времязависимые свойства (ползучесть, скоростная чувствительность твердости, скачкообразная деформация). Сообщения и доклады по следующим вопросам: Определение внутренних напряжений. Времязависимые свойства (ползучесть, скоростная чувствительность твердости, скачкообразная деформация). Проработка конспектов лекций и вопросов, вынесенных на самостоятельное изучение основной и дополнительной литературы; подготовка к контрольной работе.

Тема 5. Разрушение при индентировании

Задания для самостоятельной работы.

Фазовые переходы при локальном деформировании. Разрушение в окрестности отпечатка. Размерные эффекты. Механические свойства и адгезия тонких пленок и многослойных покрытий. Проработка конспектов лекций и вопросов, вынесенных на самостоятельное изучение основной и дополнительной литературы; подготовка к контрольной работе.

4. Контроль знаний обучающихся

4.1. Формы текущего контроля работы аспирантов: Собеседование, письменная самостоятельная работа

4. Контроль знаний обучающихся и оценочные средства

4.1 Оценочные средства текущего контроля

письменная самостоятельная работа

1. Упругий контакт.
2. Контактная жесткость и модуль Юнга.
3. Феноменология упругопластического перехода в наноконтакте.
4. Гомогенное зарождение дислокаций под индентором.

5. Роль различных факторов в инициировании начальной пластичности (состояние поверхности, примесные атомы, границы зерен, точечные дефекты).

6. Механические свойства и адгезия тонких пленок и многослойных покрытий.

Собеседование

1. Общие принципы статистических методов определения твердости.
2. Определение твердости по Бринеллю, по Виккерсу, по Роквеллу.
3. Соотношение значений твердости, полученных различными статистическими методами, между собой и с механическими свойствами материалов.
4. Общие принципы динамических методов определения твердости.
5. Перспективы развития техники наноиндентирования.
6. Контактная жесткость и модуль Юнга.
7. Определение внутренних напряжений.
8. Фазовые переходы при локальном деформировании.
9. Разрушение в окрестности отпечатка.
10. Времязависимые свойства (ползучесть, скоростная чувствительность твердости, скачкообразная деформация)

4.3 Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме зачета

Вопросы зачета

1. Статистические методы определения твердости.
2. Твердость по Бринеллю. Твердость по Виккерсу. Микротвердость. Твердость по Роквеллу.
3. Соотношение значений твердости, полученных различными статистическими методами, между собой и с механическими свойствами материалов.
4. Динамические методы определения твердости. Твердость по Шору (метод упругого отскока бойка).
5. Проба на твердость царапанием.
6. Динамическая нано- и микротвердость.
7. Основы техники наноиндентирования. Информационные возможности наноиндентирования.
8. Методы анализа P-h-диаграмм.
9. Склерометрия.
10. Перспективы развития техники наноиндентирования.
11. Феноменология упругопластического перехода в наноконтакте.
12. Гомогенное зарождение дислокаций под индентором.
13. Фазовые переходы при локальном деформировании.
14. Разрушение в окрестности отпечатка. Размерные эффекты.
15. Механические свойства и адгезия тонких пленок и многослойных покрытий.

Задания для зачета

1. Определить микротвердость по Виккерсу. Масса груза 100 гр. Диагональ отпечатка 120 мкм.
2. Найти твердость методом Бринелля. Нагрузка 4 Н. Диаметр отпечатка 1,3 мм, диаметр шарика 1 мм.

4.3. Шкала оценивания промежуточной аттестации

Оценка	Основные показатели достижения результата

«зачтено»	Знает общие принципы и приемы метода наноиндентирования в физике твердого тела, статистические и динамические методы определения твердости. Умеет определять влияние различных факторов в инициировании начальной пластичности под индентором и учитывать размерные эффекты при измерении механических свойств твердых тел. Владеет основами техники наноиндентирования и методами анализа p-H диаграмм, а также методами определения внутренних напряжений и времязависимых свойств при индентировании.
«не зачтено»	Демонстрирует незнание общих принципов и приемов метода наноиндентирования в физике твердого тела, статистические и динамические методы определения твердости. Не умеет определять влияние различных факторов в инициировании начальной пластичности под индентором и учитывать размерные эффекты при измерении механических свойств твердых тел. Не владеет техникой наноиндентирования и методами анализа p-H диаграмм, методами определения внутренних напряжений и времязависимых свойств при индентировании.

5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

5.1 Основная литература:

1. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. - М.: Машиностроение, 2009. - 311 с.

2. Марголин В. И., Жабрев В. А., Лукьянов Г. Н., Тупик В. А. Введение в нанотехнологию : учебное пособие. - Санкт-Петербург: Лань, 2022. - 464 с. - Текст : электронный // ЭБС "ЛАНЬ" [сайт]. - URL: https://e.lanbook.com/book/209636

3. Головин Ю.И. Зондовые нанотехнологии. - [Тамбов]: Изд-во ТГУ, 2008. - 1 электрон. опт. диск (CD).

4. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии : учеб. пособ. для студ.. - М.: Техносфера, 2004. - 327 с.

5.2 Дополнительная литература:

1. Асеев А. Л. Полупроводники и нанотехнологии : учебник для вузов. - Москва: Юрайт, 2025. - 152 с. - Текст : электронный // ЭБС «ЮРАЙТ» [сайт]. - URL: https://urait.ru/bcode/568929

2. Головин Ю.И. Нанотехнологии в современной жизни. - [Тамбов]: [б.и.], [200. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Текст : электронный // АБИС "Руслан" ТГУ им. Г.Р. Державина [сайт]

3. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии : монография. - 2-е изд., испр.. - Москва: Физматлит, 2009. - 416 с. - Текст : электронный // ЭБС «Университетская библиотека онлайн» [сайт]. - URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68859

4. Григорьев Б. В., Зайцев Е. В. Метрология и физико-технические измерения: учебно-методическое пособие к лабораторным работам для студентов II курса направлений 16.03.01 «Техническая физика», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника», 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» : учебно-методическое пособие. - Тюмень: Тюменский государственный университет, 2017. - 52 с. - Текст : электронный // ЭБС «Университетская библиотека онлайн» [сайт]. - URL: https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=572407

5. Неволин В. К. Зондовые нанотехнологии в электронике : монография. - Изд. 2-е, испр.. - Москва: Техносфера, 2014. - 174 с. - Текст : электронный // ЭБС «Университетская библиотека онлайн» [сайт]. - URL: https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=260697

6. Рогов В. А. Наноматериалы и нанотехнологии : учебник для вузов. - пер. и доп; 3-е изд.. - Москва: Юрайт, 2025. - 174 с. - Текст : электронный // ЭБС «ЮРАЙТ» [сайт]. - URL: https://urait.ru/bcode/559157

5.3 Иные источники:

1. БД издательства SpringerNature: Databases (БД Nano) - URL: - https://goo.gl/PdhJdo

2. БД издательства SpringerNature: Home - Springer - URL: - https://link.springer.com/

3. БД издательства SpringerNature: SpringerMaterials - свойства материалов. - URL: - https://materials.springer.com/

4. Библиотека РАН - http://www.rasl.ru/

5. Научная электронная библиотека Российской академии естествознания - www.monographies.ru

6. Российская национальная библиотека - http://www.nlr.ru/

7. Электронная библиотека учебников для вузов - http://4du.ru/

6. Материально-техническое обеспечение дисциплины, программное обеспечение, профессиональные базы данных и информационные справочные системы

Для проведения занятий по дисциплине необходимо следующее материально-техническое обеспечение: помещения для проведения занятий лекционного и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, помещения для самостоятельной работы.

Помещения укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Для проведения занятий лекционного типа используются наборы демонстрационного оборудования, обеспечивающие тематические иллюстрации (проектор, ноутбук, экран/ интерактивная доска).

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду Университета.

Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

ABBYY FineReader 8.0 Professional Edition

Adobe Reader X (10.1.0) - Russian Adobe Systems Incorporated 25.07.2017 117,00 MB 10.1.0

Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows "Лаборатория Касперского"

Libre Office 3.3

Microsoft Office Профессиональный плюс 2007

Операционная система "Альт Образование"

Операционная система Microsoft Windows 10

Профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

1. Scopus: база данных . – URL: https://www.scopus.com

2. Springer Journal – база данных журналов коллекции Springer Journal изд-ва Springer Nature (1997-2015 гг.). – URL: https://link.springer.com

3. Springer Open (ресурсы Springer открытого доступа): база данных. – URL: https://www.springeropen.com

4. Web of Science: политематическая реферативно-библиографическая и наукометрическая база данных . – URL: https://apps.webofknowledge.com

5. Архив научных журналов зарубежных издательств. – URL: https://arch.neicon.ru

6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.ru. – URL: https://elibrary.ru

7. Научная электронная библиотека Российской академии естествознания. – URL: https://www.monographies.ru

8. Электронная библиотека ТГУ. – URL: https://elibrary.tsutmb.ru/

9. Электронная библиотека РФФИ. – URL: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/library

10. Электронная библиотека. Образовательная платформа «Юрайт». – URL: https://biblio-online.ru/book/sud-prisyazhnyh-442275

11. ЭБС "Лань" - консорциум Сетевых электронных библиотек вузов, коллекция учебников для СПО и учебников для 10-11 кл.. – URL: https://e.lanbook.com/books

12. Юрайт: образовательная платформа, электронно-библиотечная система. – URL: https://urait.ru

Электронная информационно-образовательная среда

https://auth.tsutmb.ru/authorize?response_type=code&client_id=moodle&state=xyz

Взаимодействие преподавателя и аспиранта в процессе обучения осуществляется посредством мультимедийных, гипертекстовых, сетевых, телекоммуникационных технологий, используемых в электронной информационно-образовательной среде университета.