Приложение 5.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина»

Институт математики, физики и информационных технологий

Кафедра теоретической и экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:

Директор института математики, физики

и информационных технологий

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Королева Н.Л.



«19» марта 2024 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

по дисциплине

**«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

Форма обучения

очная

Год набора

2024

Тамбов 2024

**Автор программы:** Шибков А.А., доктор физико-математических наук, профессор

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 «12» марта 2024 года Протокол № 6

**СОДЕРЖАНИЕ**

|  |
| --- |
| 1. Цели и задачи дисциплины |
| 2. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры |
| 3. Объем и содержание дисциплины |
| 4. Контроль знаний обучающихся |
| 5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины |
| 6. Материально-техническое обеспечение дисциплины, программное обеспечение, профессиональные базы данных и информационные справочные системы |
|  |

**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 является элективной.

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

**3. Объём и содержание дисциплины**

**3.1 Объем дисциплины**

Очная форма обучения: 2 з.е.

| Вид учебной работы | Очная форма обучения  (всего часов) |
| --- | --- |
| **Общая трудоёмкость дисциплины** | **72** |
| *Контактная работа (по учебным занятиям)* | *22* |
| Лекции (Л) | 10 |
| Практические (семинарские) занятия (ПЗ) | 12 |
| Лабораторные занятия (ЛЗ) | - |
| *Самостоятельная работа (СР)* | *50* |
| *Зачет* |  |

**3.2 Содержание дисциплины:**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № темы | Название  раздела/темы | Вид учебной работы, час.  (очная форма) | | | | Формы текущего  контроля |
| Л | ПЗ | ЛЗ | СР |
| 1. | Тема 1. Методы определения твердости | 2 | 2 | - | 10 | собеседование, письменная самостоятельная работа |
| 2. | Тема 2. Принципы и техника наноиндентирования | 2 | 3 | - | 10 | собеседование, письменная самостоятельная работа |
| 3. | Тема 3. Механическое поведение материала в нано- и сбмикрообъемах при индентировании | 2 | 2 | - | 10 | собеседование, письменная самостоятельная работа |
| 4. | Тема 4. Упругопластическая деформация при индентировании | 2 | 3 | - | 10 | собеседование, письменная самостоятельная работа |
| 5. | Тема 5. Разрушение при индентировании | 2 | 2 | - | 10 | 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 АТОМНАЯ**

**МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ МАТЕРИАЛА**

**В НАНО- И СУБМИКРООБЕМАХ ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ**

**Лекция.** 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).

**Практическое занятие.** 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).

**Задания для самостоятельной работы:** Проработка конспектов лекций и вопросов, вынесенных на самостоятельное изучение основной и дополнительной литературы; подготовка к контрольной работе.

**Тема 4 УПРУГОПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ.**

**Лекция.** Определение внутренних напряжений. Времязависимые свойства (ползучесть, скоростная чувствительность твердости, скачкообразная деформация).

**Практическое занятие.** Сообщения и доклады по следующим вопросам: Определение внутренних напряжений. Времязависимые свойства (ползучесть, скоростная

чувствительность твердости, скачкообразная деформация).

**Задания для самостоятельной работы:** Проработка конспектов лекций и вопросов, вынесенных на самостоятельное изучение основной и дополнительной литературы; подготовка к контрольной работе.

**Тема 5 . РАЗРУШЕНИЕ ПРИ ИНДЕНТИРОВНИИ**

**Лекция.** Фазовые переходы при локальном деформировании. Разрушение в окрестности отпечатка. Размерные эффекты. Механические свойства и адгезия тонких пленок и многослойных покрытий.

**Практическое занятие.** Фазовые переходы при локальном деформировании. Разрушение в окрестности отпечатка. Размерные эффекты. Механические свойства и адгезия тонких пленок и многослойных покрытий.

**Задания для самостоятельной работы:** 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

**4.2 Задания текущего контроля**

Вопросы для собеседования

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)

Тематика письменных самостоятельных работ

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.

**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

**4.4 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. 312 с.

2. Головин, Ю.И. Введение в нанотехнологию: Учеб. пособие. М. : Машиностроение-1, 2003. 110 с.

3. Пул Ч.,  Оуэнс Ф. Нанотехнологии: учеб. пособ. для студ.; пер. с англ. под ред. Ю.И. Головина. М. : Техносфера, 2004. 327 с.

**5.2** **Дополнительная литература:**

1. Гаркунов Д. Н. Триботехника (износ и безызносность): Учебник. 4-е изд., перераб. и доп. М.: «Издательство МСХА», 2001. – 616 с.

2. Oliver W.C., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodo-logy // J. Mater. Res. 2004. Vol. 19. № 1. P. 3–20.

3. Domnich V., Gogotsi Yu. Phase Transformations in Silicon under Contact Loading // Rev. Adv. Mater. Sci. 2002. V. 3. P. 1–36.

4. Булычев С.И., Алехин В. П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. – М.: Машиностроение, 1990.

5. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Механическое изнашивание сталей и сплавов: Учебник для ВУЗов. М.: Недра, 1996, 364 с.

6. Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике. Изд. 2-е, испр. Москва: Техносфера, 2014. 174 с.

7. Springer Handbook of Nanotechnology / ed. by B. Bushan. Berlin: Springer, 2004. 1222 p.

**5.3** **Иные источники:**

К рекомендуемым Интернет-ресурсам по данной дисциплине относятся Интернет- ресурсы ведущих российских и зарубежных журналов, а также образовательные порталы и сайты ведущих российских университетов.

Интернет-ресурсы ведущих российских журналов по данной тематике:

[www.journals.ioffe.ni](http://www.journals.ioffe.ni) / ftt − «Физика твёрдого тела»

[www.iournals.ioffe.ru](http://www.iournals.ioffe.ru) / ftp − «Физика и техника полупроводников»

[www.journals.ioffe.m](http://www.journals.ioffe.m) / pjtf − «Письма в журнал технической физики»

[www.iounials.ioffe.nl](http://www.iounials.ioffe.nl) / itf − «Журнал технической физики»

[www.ietp.ac.rn](http://www.ietp.ac.rn) − ЖЭТФ

[www.ietpletters.ac.ru](http://www.ietpletters.ac.ru) − «Письма в ЖЭТФ»

[www.ufn.ru](http://www.ufn.ru) − «Успехи физических наук»

[www.nanom.ru](http://www.nanom.ru) − «Российские нанотехнологии»

[www.quant-electron.ru](http://www.quant-electron.ru) − «Квантовая электроника»

<http://impo.imp.uran.ru/fmm/> − «Физика металлов и металловедение»

Интернет-ресурсы иностранных журналов

[www.aps.org](http://www.aps.org)

[www.springeropen.com](http://www.springeropen.com)

Интернет-порталы: <http://window.edu.ni>.: <https://elibrarv.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.

**Электронная информационно-образовательная среда**

<http://moodle.tsutmb.ru>

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

**Лицензионное программное обеспечение:**

Операционная система «Альт Образование»

Операционная система Microsoft Windows 10 Home

Операционная система Microsoft Windows Vista Business Russian

Microsoft Office Профессиональный плюс 2007

Kaspersky Endpoint Security для бизнеса – Стандартный Russian Edition. 1500-2499 Node 1 year Educational Renewal Licence

Adobe Photoshop CS3

**Информационные справочные системы и профессиональные базы данных:**

|  |  |
| --- | --- |
| Электронный каталог Фундаментальной библиотеки  ТГУ | <https://elib.tsutmb.ru/pwb/> |
| Электронная библиотека ТГУ | [https://elibrary.tsutmb.ru](https://elibrary.tsutmb.ru/) |
| ЭБС «Университетская библиотека онлайн» | [http://www.biblioclub.ru](http://www.biblioclub.ru/) |
| ЭБС «IPRbooks» | [http://iprbookshop.ru](http://iprbookshop.ru/) |
| ЭБС «Юрайт»: (ВО и СПО) | [http://www.urait.ru](http://www.urait.ru/) |
| Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU | [http://elibrary.ru](http://elibrary.ru/) |
| Государственная информационная система «Национальная электронная библиотека» | [https://нэб.рф](https://xn--90ax2c.xn--p1ai/) |
| Президентская библиотека имени Б.Н. Ельцина | [http://www.prlib.ru](http://www.prlib.ru/) |
| Электронный справочник «Информио» | [www.informio.ru](http://www.informio.ru/) |
| Электронный архив публикаций информагентств Polpred.com Обзор СМИ | <http://polpred.com/> |
| Справочная правовая система «Консультант Плюс» | [http://www.consultant.ru](http://www.consultant.ru/) |
| Коллекции журналов Wiley:   * Wiley Journals Database Collection * Wiley Journal Backfiles | [https://onlinelibrary.wiley.com](https://onlinelibrary.wiley.com/)  <https://podpiska.rfbr.ru/news/396/> |
| БД AIPP E-Book Collection I + Collection II | [https://www.scitation.org/ebooks](https://www.scitation.org/ebooks" \t "_blank)  [https://podpiska.rfbr.ru/news/396/](https://podpiska.rfbr.ru/news/396/" \t "_blank) |
| БД Springer Nature 2023 eBook Collections | <https://link.springer.com/>  [https://podpiska.rfbr.ru/news/396/](https://podpiska.rfbr.ru/news/396/" \t "_blank) |
| Коллекции журналов:   * Life Sciences Package и БД Springer Nature, * Social Sciences Package и БД Springer Nature, * Physical Sciences & Engineering Package | [www.nature.com](http://www.nature.com)  https://podpiska.rfbr.ru/news/396 |
| Журналы Российской академии наук – | <https://journals.rcsi.science/>  https://podpiska.rfbr.ru/news/396 |
| Журнал Успехи физических наук | <https://ufn.ru/>  <https://podpiska.rfbr.ru/news/396/> |
| Математические журналы МИАН | [http://www.mathnet.ru](http://www.mathnet.ru/)  <https://podpiska.rfbr.ru/news/396/> |
| Словари ABBYY Lingvo х3 Европейская версия | Установлены стационарно на ПК ТГУ |