

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:  
Декан физического факультета  
С.Н. Филимонов

Рабочая программа дисциплины

**Физика лучевого воздействия**

по направлению подготовки

**03.04.02 Физика**

Направленность (профиль) подготовки:  
**«Фундаментальная и прикладная физика»**

Форма обучения  
**Очная**

Квалификация  
**Магистр**

Год приема  
**2023**

СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель ОП  
О.Н. Чайковская

Председатель УМК  
О.М. Сюсина

Томск – 2023

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

– ПК-1 – Способен самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИПК-1.1. Знает основные стратегии исследований в выбранной области физики, критерии эффективности, ограничения применимости;

ИПК-1.2. Умеет выделять и систематизировать основные цели исследований в выбранной области физики, извлекать информацию из различных источников, включая периодическую печать и электронные коммуникации, представлять её в понятном виде и эффективно использовать;

## **2. Задачи освоения дисциплины**

– Ознакомиться с основными методами электронно-лучевой и ионно-плазменной обработки поверхности твердых тел.

– Сформировать представления о возможностях и эффективности этих методов для повышении функциональных свойств материалов.

– Узнать о возможностях формирования уникальных структурных состояний, которые не удается получить традиционными методами обработки материалов.

– Ознакомиться с методами ионно-плазменного синтеза тонких покрытий и пленок, в том числе – наноструктурных и нанокompозитных.

– Научиться находить взаимосвязи между элементным составом, условиями модификации поверхности и синтеза покрытий с микроструктурой и функциональными свойствами материалов.

– Познакомиться с основными физическими факторами управления микроструктурой и свойствами при ионно-плазменной обработке поверхности.

## **3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплины (модули)».

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор.

## **4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине**

Семестр 2, экзамен.

## **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для изучения и понимания материала данной дисциплины обучающийся должен владеть основными представлениями и понятиями из курсов: «Кристаллография», «Физика твердого тела», «Дефекты в твердых телах» 3, «Физическое материаловедение». Знать основы современных методов исследования структуры, элементного и фазового состава (рентгеноструктурный анализ, растровая и просвечивающая электронная микроскопия), физических и механических свойств.

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины (модуля)**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 з.е., 144 часов, из которых:

– лекции: 32 ч.;

в том числе практическая подготовка: 12 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

## **8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам**

Тема 1. Физические процессы взаимодействия электронов с твердым телом.

Стационарные и импульсные электронные пучки. Их характеристики. Низкоэнергетические сильноточные электронные (НСЭП). Функция потерь энергии электронов по глубине. Торможение и рассеяние электронов, их распределение в твердом теле. Длина пробега. Тепловые процессы при воздействии электронного пучка. Зона термического влияния. Плавление и испарение. Ударно-волновые процессы при воздействии электронного пучка. Динамические и остаточные поля напряжений в мишени. Гидродинамические и капиллярные явления. Кратерообразование. Перекристаллизация поверхностного слоя. Морфология и рост кристаллов при сверхскоростной закалке. Текстура и аморфизация. Структура быстрозакаленных сплавов

Тема 2. Физические процессы взаимодействия ионов с твердым телом.

Функция потерь энергии ионов по глубине. Феноменологическая оценка и экспериментальный анализ проективного пробега ионов. Торможение и рассеяние ионов. Профили распределения ионов по глубине. Каскады атомных столкновений. Ионная имплантация и ионное перемешивание. Ионно-легированный слой, аномально-пересыщенные твердые растворы. Адсорбция газов остаточного вакуума, артефакты при ИИ. Твердофазная аморфизация под облучением. Эрозия твердых тел ионами. Динамические и квазистатические напряжения. Радиационно-стимулированная диффузия. Формирование пор и кластеров из дефектов. Блистеринг. Физико-химические свойства ионно-легированных материалов.

Тема 3. Вакуумные и ионно-плазменные методы осаждения покрытий. Механизмы формирования микроструктуры

Ионно-плазменные и плазмохимические методы нанесения покрытий. Основы физики катодных процессов. Магнетронные распылительные системы. Зарождение и рост покрытий. Столбчатый рост и текстура. Модель зон Торнтона. Температурная зависимость структуры покрытий. Адгезия покрытий к подложке и способы повышения адгезионной прочности. Упруго-напряженное состояние системы «покрытие/подложка». Физические принципы выбора состава и условий осаждения покрытий. Адгезия покрытий и методы ее модификации. Совмещение синтеза покрытий с ионным облучением. Текстура покрытий. Прочностные, коррозионные и функциональные свойства синтезированных покрытий. Градиентные и слоистые нанокompозитные покрытия

## **9. Текущий контроль по дисциплине**

Текущий контроль по дисциплине проводится с применением балльно-рейтинговой системы, включающей контроль посещаемости, результаты выполнения заданий по материалам курса (работа на лекционных занятиях), и фиксируется в форме баллов (нарастающим итогом): посещаемость – максимальный балл 10, выполнение заданий по материалам курса – 40. Контрольная точка проводится не менее одного раза в семестр.

## **10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации**

**Экзамен** во втором семестре проводится в письменной форме по билетам. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

На промежуточную аттестацию планируется не более 50 баллов.

Итоговая оценка по дисциплине складывается из суммы баллов, полученных по итогам текущего контроля и промежуточной аттестации.

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Экзаменационная оценка определяется исходя из результатов экзамена и текущей аттестации в течение семестра и согласуется с принятым соответствием с 5-ти балльной шкалой оценивания: 100-86 – «отлично»; 85-66 – «хорошо»; 65-50 – «удовлетворительно», менее 50 – «неудовлетворительно».

Экзаменационный билет включает 2 вопроса из списка контрольных вопросов по курсу, проверяющих сформированность компетенции ПК-1 в соответствии с индикаторами ИПК-1.1 и ИПК-1.2. Ответы даются в развернутой форме.

Пример экзаменационного билета:

### **БИЛЕТ № 1**

Вопрос 1. Функция потерь энергии электронов по глубине решетки. Оценка пробега электронов. Низкоэнергетические сильноточные электронные пучки.

Вопрос 2. Нанокompозитные. Примеры. Особенности структуры и свойств данных покрытий.

Дополнительные и/или уточняющие вопросы по основным темам и содержанию курса, позволяющие оценить уровень освоения всей программы. Ответ на уровне формулировки основных определений и/или краткого изложения физики явления и соответствующих представлений.

Например:

Вопрос 1. Дать определение каскадам столкновений.

Вопрос 2. Ионное перемешивание.

Вопрос 3. Механизмы зарождения покрытий.

Вопрос 4. Влияние легирования на структуру покрытий.

И т.д.

### **11. Учебно-методическое обеспечение**

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» – <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=24595>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

Перечень вопросов, выносимых на экзамен.

1. Торможение и рассеяние ионов в твердых телах. Упругое взаимодействие ионов с частицами кристаллической решетки в металлических материалах. Проективный пробег ионов.
2. Функция потерь энергии электронов по глубине решетки. Оценка пробега электронов. Низкоэнергетические сильноточные электронные пучки.
3. Каскады столкновений. Линейные и нелинейные каскады. Стадии развития каскадов. Оценка температуры каскадной области. Закалка каскадов.
4. Типы радиационных дефектов при взаимодействии ионного пучка с твердым телом. Возврат радиационных дефектов. Радиационно-ускоренная диффузия.
5. Ионная имплантация. Профили распределения имплантированных ионов. Зависимость профилей от дозы имплантированных ионов.
6. Особенность фазово-структурных состояний в твердых телах при ионной имплантации. Условия формирования аномально-пересыщенных твердых растворов при ИИ.
7. Формирование вторичных фаз при ИИ. Дисперсность и объемная доля частиц вторичных фаз.
8. Твердофазная аморфизация ионно-легированного слоя. Твердофазная аморфизация

- интерметаллидов при ИИ.
9. Ионное перемешивание (ion mixing). Баллистическое и тепловое перемешивание в каскадах. Эффекты «диффузионного» ионного перемешивания.
  10. Мощные ионные пучки (МИП). Анализ динамики температурного поля при воздействии МИП.
  11. Особенности фазово-структурных состояний при воздействии МИП. Кратерообразование. Эффекты дальнего действия при воздействии МИП.
  12. Достоинство и недостатки модификации поверхности твердого тела при ИИ и ионном перемешивании.
  13. Ионно-плазменные методы нанесения тонких пленок и покрытий. Механизмы зарождения покрытий.
  14. Адгезия покрытий. Основные структурные и технологические факторы, определяющие адгезию.
  15. Схема Торнтонна - зависимость микроструктуры покрытий от температуры их получения. Особенности границ от температуры  $T_s$ .
  16. Совмещение ионно-плазменного синтеза покрытий с ионным облучением. Внутренние напряжения в покрытиях. Адгезия и текстура покрытий.
  17. Влияние легирования на структуру покрытий. Синтез покрытий в условиях их расслоения по составу. Нанокompозитные покрытия.
  18. Покрытия типа  $\text{p-Me}_2\text{N/a}$  - фаза (Покрытия Вепрека Вергека). Примеры. Особенности структуры и свойств покрытий  $\text{p-Me}_1\text{N/a}$  - фаза.
  19. Нанокompозитные покрытия типа  $\text{p-Me}_1\text{N/Me}(2)$  (покрытия I. Musil'a). Примеры. Внутренние напряжения в нанокompозитных покрытиях и их термическая стабильность.

в) План семинарских занятий по дисциплине.

1. Торможение и рассеяние ионов, их распределение в твердом теле. Каскады столкновений
2. Вакуумно-дуговое, магнетронное и плазменно-эммерсионное ионное легирование и нанесение покрытий
3. Физические и механические свойства ионно-легированных материалов
4. Фазово-структурные состояния, наноструктуризация поверхности, кратеры и градиенты структуры при воздействии МИП.
5. Ионноплазменные (PVD) и плазмохимические методы нанесения покрытий.
6. Идеи многоэлементного легирования; градиентные и слоистые нанокompозитные покрытия; иерархически-совмещенные композиции «субстрат-покрытие».

г) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

Самостоятельная работа студента включает:

- углубленное теоретическое изучение разделов курса при подготовке к лекционным и практическим занятиям;
- подготовку к обсуждению материала, в том числе самостоятельный поиск необходимых источников информации, включая научно-образовательные ресурсы сети Интернет;
- подготовку к экзамену.

## **12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет**

а) основная литература:

1. Комаров Ф. Ф. «Ионная имплантация в металлах». Гл. 1-4, М. Metallургия, 1990, с. 216.
2. Грибков А. В., Григорьев Ф. И., Калинин Б. А., Якушин В. Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов гл. 2, 3, 6, 7, 11.
3. Наноинженерия поверхности. Формирование неравновесных состояний в поверхностных слоях материалов методами электронно-ионно-плазменных технологий. Гл.

- 2, 4, 5. Новосибирск, Изд. Сибирского отделения РАН, 2008 г.
4. Валяев А. Н., Погребняк А. Д., Кишимото Н, Ладысев В. С. Модификация свойств материалов и синтез тонких пленок при облучении интенсивными электронными и ионными пучками. Казахстан, Усть-Каменогорск, 2000.
5. Зеленский В. Ф., Неклюдов И. М., Черняева Т. П. Радиационные дефекты и разрушение металлов, гл. 2, 3, 4, 7. Киев, Наукова Думка, 1988.
6. Риссел Х., Руге И. Ионная имплантация. Гл. 1, 2, 4. М.: Наука 1983 -с 360
7. Быковский Ю. А., Неволин В. Н., Фоминский В. Ю. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов. Гл. 1, 2, 3. Москва. Энергоатомиздат. 1991.-с. 232.
8. Абрян И. А., Андронов А. А., Титов А. И. Физические основы электронной и ионной технологии. Гл. 1, 2, 3, 5, 6. М.: Изд. Высшая школа. 1984. С. 254.
9. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками. Гл. 1, 2,7, 8,9, 10 (Под ред. Дж. М. Поута, Г. Фоти, Д. К. Джекобсона) М.: Машиностроение. 1987. – с.424.
10. Верещака А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение. 1993. – с.363.
11. Коротаев А. Д., Тюменцев А. Н., Почивалов Ю. И. и др. ФММ, т. 81. №5. – с. 118-129. 1996; ФММ, т. 89. №1. – с. 54-61. 2000.
12. Иванов Ю. Ф., Итин В. И., Лыков С. В. и др. Изв. РАН. Металлы. №3. – с.130-145. 1993.
13. Анисимов С. И., Иманс Я. А., Романов Г. С., Ходыко Ю. В. Действие излучений большой мощности на металлы. М.: Наука. 1970. – с. 272.
14. Изв. Вузов, Физика №5, 1994. Тематический выпуск.- с. 5 – 140.

б) дополнительная литература:

1. Диденко А. И., Лигачев А. Е., Куракин И. Б. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. М.: Энергоатомиздат. 1987. – с. 184.
2. Арутюнян Р. В., Баранов В. Ю., Большов Л. А. и др. Воздействие лазерного излучения на материалы. М.: Наука. 1989. – с. 368.
3. Блейхер Г. А., Кривобоков В. П., Пашенко О. В. Тепломассоперенос в твердом теле под действием мощных пучков заряженных частиц. Новосибирск. Наука. 1999. – с.176.
4. Верещака А. С., Третьяков И. П. Режущий инструмент с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение. 1986. – с. 217.
5. Диденко А. Н., Шаркеев Ю. П., Козлов Э.В. Рябчиков А. И. Эффекты дальнего действия в ионно-имплантированных металлических материалах. Гл. 2, 3, 4,5. Издательство научно-технической литературы. Томск. – с.323.
6. Коротаев А. Д., Тюменцев А. Н. Амorfизация металлов методами ионной имплантации и ионного перемешивания. Изв. Вузов Физика №8. – с. 3-30. 1994.
7. Коротаев А.Д., Овчинников С. В., Тюменцев А. Н., Пинжин Ю. П. Наноструктурные и нанокompозитные покрытия. Методы синтеза, особенности структуры и свойства. Учебное пособие, Томск 2007. – с.95.
8. Кавалейро А., де Хоссон Д. Наноструктурные покрытия // М.: Техносфера. – 2011. – С. 792.

### 13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

- Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office OneNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook); системы компьютерной вёрстки LaTeX; системы компьютерной алгебры Wolfram Mathematica, Waterloo Maple;
- публично доступные облачные технологии (GoogleDocs, Яндекс диск и т.п.).

- б) информационные справочные системы:
- Электронный каталог [Электронный ресурс] / НИ ТГУ, Научная библиотека ТГУ. – Электрон. дан. – Томск, 2008-2016. – URL: <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?theme=system>
  - Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ [Электронный ресурс] . – Электрон. дан. – Томск, 2011. – URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>
  - ЭБС Издательство «Лань» [Электронный ресурс]:/ – Электрон. дан. – СПб., 2010. – URL: <http://e.lanbook.com/>
  - ЭБС Консультант студента [Электронный ресурс] / ООО «Политехресурс». – М, 2012. – URL: <http://www.studentlibrary.ru/>
  - Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>
  - ЭБС Znanium.com [Электронный ресурс] / Научно-издательский центр Инфра-М. – Электрон. дан. – М., 2012. – URL: <http://znanium.com/>
  - ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

#### **14. Материально-техническое обеспечение**

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Аудитории, оборудованные соответствующей техникой (в том числе «Актру»), для реализации учебного процесса в смешанном формате.

#### **15. Информация о разработчиках**

Семина Виктор Олегович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики металлов ФФ НИ ТГУ.