

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

Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ:
Декан физического факультета



С.Н. Филимонов

«15» апреля 2021 г.

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

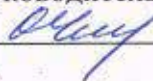
Год приема

2021


Код дисциплины в учебном плане Б1.В.ДВ.01.04.08

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

 О.Н. Чайковская

Председатель УМК

 О.М. Сюсина

Томск – 2021

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

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

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

– Узнать о возможностях достижения структурных состояний, недоступных традиционным методам получения и обработки материалов.

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

– Научится находить взаимосвязи элементного состава и условий лучевой модификации поверхности и создаваемых покрытий с микроструктурой и функциональными свойствами материалов.

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

3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, входит в модуль по выбору "Физика конденсированного состояния вещества".

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, Теория дислокаций, Термодинамика фазовых равновесий, Физическое металловедение. 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 часа, из которых:

– лекции: 32 ч.;

в том числе практическая подготовка: 8 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Тема 1. Физические процессы взаимодействия ионов и электронов с твердым телом.

Стационарные и импульсные электронные и ионные пучки. Их характеристики. Сильноточные электронные (СЭП) и мощные ионные пучки (МИП). Функция потерь энергии электронов по глубине. Торможение и рассеяние ионов, их распределение в твердом теле. Каскады столкновений. Структура, размеры, стадии развития и закалка каскадов. Баллистическое и тепловое перемешивание в каскадах. Радиационные дефекты, их термическая стабильность и радиационно-ускоренная диффузия. Распыление твердых тел. Механизмы и коэффициент распыления.

Тема 2. Методы ионно-плазменного легирования, нанесения тонких пленок и покрытий.

Вакуумно-дуговые и магнетронные генераторы плазмы. Генератор газоразрядной плазмы с термоэмиссионным катодом. Вакуумно-дуговое, магнетронное и плазменно-эммерсионное ионное легирование и нанесение покрытий. Примеры оборудования ионно-плазменной модификации поверхности (Установки «СПРУТ», «ЛЕГЕНДА» - Томск).

Тема 3. Ионная и плазменно-иммерсионная ионная имплантация (ИИ, ПИИИ).

Феноменологическая оценка и экспериментальный анализ проективного пробега ионов. Профили распределения ионов, их зависимость от дозы и условий ИИ. Ионно-легированный слой, аномально-пересыщенные твердые растворы. Правило Суда. Фазово-структурные состояния. Роль диффузионной подвижности ионов. Упруго-напряженное состояние ионно-легированного слоя, эффекты дальнего действия. Фазы высокого давления. Методы управления элементарным составом, дефектной структурой и фазовым составом поверхностного слоя. Адсорбция газов остаточного вакуума, артефакты при ИИ. Ионное перемешивание. Твердофазная аморфизация при ИИ; основные факторы и механизмы твердофазной аморфизации. Физические и механические свойства ионно-легированных материалов.

Тема 4. Физика воздействия и фазово-структурные состояния поверхности в условиях сильноточных электронных и мощных ионных пучков.

Характеристики импульсных МИП, СЭП. Нагрев поверхностного слоя. Численные решения уравнения теплопроводности при воздействии СЭП, МИП. Динамика температурного поля. Оценка скоростей охлаждения на различной глубине мишени. Динамические и квазистатические напряжения. Фазово-структурные состояния, наноструктуризация поверхности, кратеры и градиенты структуры при воздействии МИП.

Тема 5. Механизмы формирования микроструктуры, фазово-структурные и упруго-напряженные состояния, функциональные свойства нанокристаллических и нанокompозитных покрытий.

Ионноплазменные (PVD) и плазмохимические методы нанесения покрытий. Примеры оборудования (ионно-плазменные комплексы «СПРУТ», «ЛЕГЕНДА» - Томск). Механизмы зарождения и роста покрытий. Зависимость механизма роста и структуры покрытий от температуры. Столбчатый рост. Модель Thoruthona структурных зон.

Влияние поверхности субстрата, активация поверхности. Структура и упруго-напряженное состояние поверхности сопряжения «субстрат-покрытие». Адгезия покрытий и методы ее модификации. Совмещение синтеза покрытий с ионным облучением. IBAD (ion beam assisted deposition) технологии. Влияние энергии и плотности ионов. Текстура покрытий. Модель структурных зон: Barna-Adamik. Наноструктуризация покрытия. Сверхтвердые нанокompозитные покрытия типа n-MeN/ф-фаза (n-MeN-нитриды Ti, Zr, V, W, Cr, α-фаза-аморфная фаза Si₃N₄, TiB₂, SiN_x и др.) и типа n-MeN/металл (металл –Ni, Cu, Ag, I). Физический принцип выбора состава и условий получения таких покрытий, особенности их микроструктуры, упруго-напряженного состояния. Термическая стабильность. Природа сверхтвердости. «Кривизна-кручение» кристаллической решетки. Локальные упругие напряжения. Вязкость сверхтвердых нанокompозитных покрытий. Антифрикционные покрытия типа DNG/AM (dispersed nanograin/amorphous matrix на основе аморфного углерода. Прочностные трибологические и пластичные свойства нанокompозитных покрытий.

Тема 6. Физические принципы и критерии конструирования перспективных многофункциональных покрытий.

Идеи многоэлементного легирования; градиентные и слоистые нанокompозитные покрытия; иерархически-совмещенные композиции «субстрат-покрытие».

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится с применением балльно-рейтинговой системы, включающей контроль посещаемости, результаты выполнения заданий по материалам курса (выступление и работа на практических 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 (приведен в разделе 11), 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. Покрытия типа n-Me₂N/a - фаза (Покрытия Вепрека Вергека). Примеры. Особенности структуры и свойств покрытий n-Me₁N/a - фаза.

Дополнительные и/или уточняющие вопросы по основным темам и содержанию курса (разделы 8, 11), 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 (ion mixing).

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 ионом 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 $p\text{-Me}_2\text{N/a}$ - фаза (Покрытия Вепрека Вергека). Примеры. Особенности

структуры и свойств покрытий p-Me1N/a - фаза.

19. Нанокompозитные покрытия типа p-Me1N/Me(2) (покрытия I. Musil'a). Примеры. Внутренние напряжения в нанокompозитных покрытиях и их термическая стабильность.

в) План семинарских / практических 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. Металлургия, 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. Аброян 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 On-eNote, 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.

Аудитории для проведения практических занятий, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

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

Аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешанном формате, оснащенные системой «Актру».

Все виды материально-информационной базы Научной библиотеки ТГУ.

Мультимедийное оборудование физического факультета ТГУ.

Программное обеспечение курсов, предшествующих изучению представленной дисциплины.

15. Информация о разработчиках

Коротаев Александр Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор, кафедры физики металлов физического факультета ТГУ.