

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

Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ:

Декан физического факультета



С.Н. Филимонов

2021 г.

Рабочая программа дисциплины

**Электронная микроскопия**

по направлению подготовки

**03.03.02 Физика**

Направленность (профиль) подготовки:

**«Фундаментальная физика»**

Форма обучения

**Очная**

Квалификация

**Бакалавр**


Год приема

**2021**


Код дисциплины в учебном плане: Б1.В.ДВ.01.07.11

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

 О.Н. Чайковская

Председатель УМК

 О.М. Сюзина

Томск – 2021

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

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ПК-1 Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий;

ОПК-2. Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИПК 1.1. Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования;

ИОПК 2.2. Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования.

## **2. Задачи освоения дисциплины**

– Ознакомиться с теоретическими основами просвечивающей электронной микроскопии.

– Научиться применять теоретические основы просвечивающей электронной микроскопии для решения практических задач профессиональной деятельности.

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

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

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

Семестр 7, дифференцированный зачет.

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

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

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: Математический анализ, Линейная алгебра и аналитическая геометрия, Дифференциальные уравнения, Общая физика, Квантовая механика, Методы математической физики, Кристаллография, Физика твердого тела.

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины (модуля)**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 часов, из которых:

– лекции: 28 ч.;

–практические занятия: 10 ч.;

– в том числе практическая подготовка:10 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

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

Тема 1. Введение.

Предмет электронной микроскопии. Историческая справка. Методические возможности метода и области его применения в современной науке.

## Тема 2. Основы электронной оптики.

Элементы геометрической оптики: преломление, ход лучей в тонкой линзе, апертура, глубина фокуса и глубина поля. Длина волны электрона. Разрешающая способность (формула Аббе). Электронные линзы. Принцип действия электростатической и магнитной линзы. Движение электронов в длинной магнитной линзе. Аберрации электронных линз (сферическая, хроматическая, астигматизм) и разрешающая способность электронных микроскопов. Ход лучей в электронном микроскопе. Устройство электронной пушки. Принцип действия однолинзового и двухлинзового конденсора, устройство наклона и перемещения электронного луча. Ход лучей в объективной линзе. Принципы формирования дифракционного и амплитудно-фазового контраста. Ход лучей в проекционной и промежуточной линзах в режимах изображения и микродифракции. Изображения в темном и светлом поле. Глубина поля и глубина фокуса в электронной микроскопии. Принципы юстировки электронного микроскопа. Основные физические закономерности тепловых явлений. Задача Стефана о фазовом переходе. Распространение теплового возмущения в нелинейной среде от мгновенного точечного источника. Понятие о тепловой волне. Пространственная локализация теплового возмущения. Понятие о режимах с обострением.

## Тема 3. Теория рассеяния электронов.

Электронномикроскопический контраст некристаллических объектов. Резерфордский закон рассеяния электронов. Полное сечение рассеяния и критическая эффективная толщина образца. Волновая функция и волновой вектор электрона. Преломление электронной волны. Рассеяние электронов на атоме. Амплитуда атомного рассеяния. Рассеяние на элементарной ячейке. Структурный фактор элементарной ячейки. Рассеяние на совершенном кристалле. Обратная решетка. Условия Лауэ. Закон Брегга. Сфера отражения. Влияние структурного фактора на дифракционную картину. Влияние размеров и формы кристаллов на форму узлов обратной решетки. Угловые размеры дифракционных максимумов. Геометрия электронограмм. Постоянная прибора. Кольцевые электронограммы (примеры анализа). Принципы анализа электронограмм от монокристаллических объектов. Особенности электронной дифракции на металлических стеклах.

## Тема 4. Основы электронно-микроскопического контраста.

Эффект двух пучков, формирующих изображение. Амплитудно-фазовый контраст и прямое разрешение решетки. Влияние качества фольги (упругого изгиба, изменения толщины) на закономерности формирования амплитудно-фазового контраста. Влияние ускоряющего напряжения на разрешающую способность при прямом разрешении решетки. Кинематическая теория электронномикроскопического контраста. Суть кинематического приближения. Колонковое приближение. Экстинкционная длина. Амплитуда рассеяния на идеальном кристалле. Толщинные и изгибные контуры экстинкции. Измерение толщины фольги. Контраст от несовершенных кристаллов. Контраст смещения на плоских дефектах: дефекты упаковки, границы разориентации, межфазные границы. Муаровый узор. Электронномикроскопический контраст от дислокаций. Контраст от винтовой дислокации, параллельной плоскости фольги. Особенности контраста от краевых и смешанных дислокаций; дислокаций, наклонных поверхности фольги; парных дислокаций и дислокационных диполей. Определение векторов Бюргерса дислокаций. Типы электронномикроскопического контраста на частицах вторичных фаз: абсорбционный, деформационный, ориентационный, по структурному фактору, различные типы контраста на межфазных границах. Приближения и некоторые следствия динамической теории контраста.

## 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

**Дифференцированный зачет в 7 семестре** проводится в письменной форме по экзаменационным билетам.

Продолжительность зачета 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 зачета определяются оценками «зачтено» («отлично», «хорошо», «удовлетворительно»), «не зачтено» («неудовлетворительно»).

Оценка (дифференцированного зачета) определяется исходя из результатов зачета 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 компетенций ПК-1 и ОПК-2 в соответствии с индикаторами ИПК-1.1 и ИОПК 2.2. Ответы даются в развернутой форме.

Пример экзаменационного билета:

### БИЛЕТ № 1

Вопрос 1. Формула Аббе, сферическая аберрация и разрешающая способность электронного микроскопа.

Вопрос 2. Электронно-микроскопический контраст некристаллических объектов. Резерфордский закон рассеяния электронов. Полное сечение рассеяния и критическая эффективная толщина образца.

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. Принцип действия магнитной линзы.

Вопрос 2. Обратное пространство.

Вопрос 3. Муаров узор.

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=22062>

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

Перечень вопросов, выносимых на дифференцированный зачет.

1. Формула Аббе, сферическая аберрация и разрешающая способность электронного

микроскопа.

2. Электронно-микроскопический контраст некристаллических объектов. Резерфордский закон рассеяния электронов. Полное сечение рассеяния и критическая эффективная толщина образца.
3. Принцип действия электростатической и магнитной линзы. Движение электронов в длинной магнитной линзе – условие фокусировки и его связь со сферической аберрацией.
4. Рассеяние электронов на атоме. Амплитуда атомного рассеяния.
5. Ход лучей в электронном микроскопе. Устройство электронной пушки.
6. Рассеяние электронов на элементарной ячейке. Структурный фактор элементарной ячейки.
7. Ход лучей в объективной линзе. Принципы формирования дифракционного и амплитудно-фазового контраста.
8. Обратная решетка. Условия Лауэ. Закон Брегга.
9. Принцип действия однолинзового и двухлинзового конденсора.
10. Волновая функция и волновой вектор электрона. Преломление электронной волны.
11. Влияние размеров и формы кристаллов на форму узлов обратной решетки. Угловые размеры дифракционных максимумов.
12. Кинематическая теория электронно-микроскопического контраста. Суть кинематического приближения. Колонковое приближение.
13. Геометрия электронограмм. Постоянная прибора. Анализ электронограмм (кольцевых и от монокристаллических объектов).
14. Амплитуда рассеяния на идеальном кристалле. Толщинные и изгибные контуры экстинкции.
15. Контраст от несовершенных кристаллов, общее выражение.
16. Контраст от винтовой дислокации, параллельной плоскости фольги – анализ контраста методом амплитудно-фазовых диаграмм и результаты расчета профиля изображения.
17. Экстинкционная длина, ее оценка для случая точного Брегговского отражения.
18. Электронно-микроскопический контраст (полосы смещения) от плоских дефектов.
19. Типы электронно-микроскопического контраста на частицах вторичных фаз.
20. Амплитудно-фазовый контраст – прямое разрешение кристаллической решетки.

в) План семинарских / практических занятий по дисциплине.

1. Основы электронной оптики.
2. Устройство и принцип работы просвечивающего электронного микроскопа.
3. Обратная решетка. Условия Лауэ. Закон Брегга.
4. Электронно-микроскопический контраст некристаллических и кристаллических объектов.

5. Методы и подходы при анализе электронно-микроскопических изображений.

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 зачету.

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

а) основная литература:

1. Фульц Б. Просвечивающая электронная микроскопия и дифрактометрия материалов / Б. Фульц, М. Хау Дж. – Москва: Техносфера, 2011. – 904 с.

2. Электронная микроскопия : учеб. пособие / А.И. Власов, К.А. Елсуков, И.А. Косолапов. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 168 с.
3. Хирш П., Хови А., Николсон Р., Пэшли Д., Уэлан М. Электронная микроскопия тонких кристаллов. - Изд. “Мир”. - Москва, 1968. - 576 с. Главы 1-7.
4. Утевский Л. М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. - Изд. “Металлургия. - Москва, 1973. - 584 с.
5. Бушнев Л.С., Колобов Ю.Р., Мышляев М.М. Основы электронной микроскопии. - Изд. Томского университета. - Томск, 1990. - 220 с.
6. Шиммель Г. Методика электронной микроскопии. - Изд. “Мир”. - Москва, 1972. - 300 с.

б) дополнительная литература:

1. Утевский Л. М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. - Изд. “Металлургия. - Москва, 1973. - 584 с.
2. Томас Г., Гориндж М. Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. - Изд. “Наука”. - Москва, 1983. - 320 с.
3. Спенс Дж. Экспериментальная электронная микроскопия высокого разрешения. - Изд. “Наука”. - Москва, 1983. - 320 с.
4. Основы аналитической электронной микроскопии / Под. ред. Грена Дж. Дж., Гольдштейна Дж. И., Джоя Д.К., Ромига А.Д.: Пер. с англ. под ред. Усикова М.П. — М.: Metallurgy, 1990. 584 с.

в) ресурсы сети Интернет:

1. Издательство «Юрайт» [Электронный ресурс] : электрон.-библиотечная система. – Электрон. дан. – М., 2013- . URL: <http://www.biblio-online.ru/>
2. Электронно-библиотечная система Znanium.com [Электронный ресурс] / Научно-издательский центр Инфра-М. – Электрон. дан. – М., 2012- . URL: <http://znanium.com/>
3. Электронно-библиотечная система Консультант студента [Электронный ресурс] / ООО «Политехресурс». - М, 2012- . – URL: <http://www.studentlibrary.ru/>
4. Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ [Электронный ресурс] . – Электрон. дан. – Томск, 2011-. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>
5. Электронный каталог [Электронный ресурс] / НИ ТГУ, Научная библиотека ТГУ. – Электрон. дан. – Томск, 2008-2016. – URL: <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?theme=system>
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., 2000- . – URL: <http://elibrary.ru/defaultx.asp?>
7. КонсультантПлюс [Электронный ресурс]: справ. правовая система. – Электрон. дан. – М., 1992- . – Доступ из локальной сети Науч. б-ки Том. гос. ун-та.
8. Гарант [Электронный ресурс] : информ.-правовое обеспечение / НПП «Гарант-Сервис». – Электрон. дан. – М., 2016. – Доступ из локальной сети Науч. б-ки Том. гос. ун-та.
9. ScienceDirect [Electronic resource] / Elsevier B.V. – Electronic data. – Amsterdam, Netherlands, 2016. – URL: <http://www.sciencedirect.com/>
10. SpringerLink [Electronic resource] / Springer International Publishing AG, Part of Springer Science+Business Media. – Electronic data. – Cham, Switzerland, [s. n.]. – URL: <http://link.springer.com/>
11. ProQuest Ebook Central [Electronic resource] / ProQuest LLC. – Electronic data. – Ann Arbor, MI, USA, [s. n.]. – URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tomskuniv-ebooks/home.action>
12. [www.matter.org.uk/tem/](http://www.matter.org.uk/tem/)
13. [https://www.jic.ac.uk/microscopy/intro\\_EM.html](https://www.jic.ac.uk/microscopy/intro_EM.html)
14. [www.doitpoms.ac.uk](http://www.doitpoms.ac.uk) › TLP Library

### 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;

– публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ – <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>

– ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>

– ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>

– Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>

– ЭБС ZNANIUM.com – <https://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

Дитенберг Иван Александрович, доктор физико-математических наук, доцент, кафедра физики металлов физического факультета ТГУ, заведующий кафедрой.

Пинжин Юрий Павлович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, кафедра физики металлов физического факультета ТГУ, доцент.