

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО УМС ЛАПЛАЗ

Протокол № 1/08-577

от 29.08.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 03.04.01 Прикладные математика и физика

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/ В	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
1	3	108	16	32	0		24	0	Э
Итого	3	108	16	32	0	0	24	0	

## АННОТАЦИЯ

Курс преподается с целью ознакомить студентов с основными магнитными явлениями, их физическим описанием и практическими применениями магнитных эффектов, а также научить их оценивать параметры, характеризующие магнетики.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

В курсе даются основные представления о квантовой природе магнетизма, классификации магнетиков – диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики, ферриты, магнитномягкие и магнитножесткие магнитные материалы, рассматривается теория самопроизвольной намагниченности (модель Кюри-Вейсса и обменная теория, о переходе «пара-ферро» как о фазовом переходе второго рода, о спиновых волнах и квазичастицах – магнонах, о параметрах магнетиков – магнитной восприимчивости, теплоемкости, о магнонной, фононной и электронной ветвях энергетического спектра магнетиков,, нейтронографический метод исследования магнитной структуры ферромагнетиков, описываются магниторезонансные эффекты – ЭПР, ЯМР, ферромагнитный и ферроакустический резонанс, исследование фононного и магнонного энергетического спектра ферро- и антиферромагнетиков с помощью неупругого рассеяния нейтронов и фотонов. Изучается термодинамика магнетиков и обсуждается метод магнитного охлаждения для достижения сверхнизких температур, применение эффекта ядерного магнитного резонанса в медицине (ЯМР-томограф).

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Дисциплина логически и содержательно-методически связана со следующими дисциплинами: атомная физика, химия, квантовая механика, статистическая физика, теория поля, физика конденсированного состояния вещества, теоретическая физика твердого тела.

Овладение данной дисциплиной необходимо выпускникам для следующих областей профессиональной деятельности: исследования, разработки и технологии, направленные на создание и применение установок и систем в области конденсированного состояния вещества, методы и установки для исследования кристаллов и материалов, разработки материалов и магнитных систем для применения в физическом эксперименте и медицинских приборах.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	------------------------------------------------------

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной	Код и наименование индикатора
-------------------------	---------------------------	-------------------------------------	-------------------------------

деятельности (ЗПД)		компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	достижения профессиональной компетенции
научно-исследовательский			
Проведение научных и аналитических исследований по отдельным разделам (этапам, заданиям) темы (проекта) в рамках предметной области по профилю специализации в соответствии с утвержденными планами и методиками исследований; участие в проведении наблюдений и измерений, выполнении эксперимента и обработке данных с использованием современных теоретических моделей, экспериментальных данных и компьютерных технологий.	Запланированные этапы исследования; результаты наблюдений и измерений.	<p>ПК-20.1 [1] - Способен пользоваться основными теоретическими моделями физики конденсированного состояния вещества, взаимодействия излучения с веществом в конденсированном состоянии, моделями фазовых переходов и физики сверхпроводимости, экспериментальными методами исследования структурных и электронных свойств, современными достижениями физики сверхпроводимости, полупроводников и гетероструктур.</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 26.003</p>	<p>3-ПК-20.1[1] - знать основные теоретические модели физики конденсированного состояния вещества, модели взаимодействия оптического излучения с веществом, классификацию фазовых переходов, основные экспериментальные факты и применения физики сверхпроводимости и криогенной техники, современные достижения физики полупроводников и гетероструктур; У-ПК-20.1[1] - уметь сформулировать теоретическую и математическую модель для изучаемой задачи физики конденсированного состояния вещества, провести необходимые расчеты величин и оценки параметров; В-ПК-20.1[1] - владеть основными теоретическими моделями физики конденсированного состояния вещества, взаимодействия излучения с веществом, физики фазовых переходов и сверхпроводимости</p>
Проведение научных и аналитических	Запланированные этапы	ПК-2 [1] - Способен критически оценивать	3-ПК-2[1] - Знать методики оценки и

исследований по отдельным разделам (этапам, заданиям) темы (проекта) в рамках предметной области по профилю специализации в соответствии с утвержденными планами и методиками исследований; участие в проведении наблюдений и измерений, выполнении эксперимента и обработке данных с использованием современных теоретических моделей, экспериментальных данных и компьютерных технологий.	исследования; результаты наблюдений и измерений.	применяемые методики и методы исследования  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 26.003	выбора методов исследования.; У-ПК-2[1] - Уметь критически оценивать применяемые методики и методы исследования; В-ПК-2[1] - Владеть навыками оценки методов исследования по выбранным критериям.
экспертно-аналитический			
Изучение и анализ научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования, сбор и обработка научной и аналитической информации с использованием современных программ, средств и методов вычислительной математики, компьютерных и информационных технологий; сбор и обработка научной и аналитической информации с использованием современных программ, средств и	Научная и аналитическая информация, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования; научные и аналитические отчеты, публикации и презентации по результатам исследований.	ПК-20.2 [1] - Способен ориентироваться в современных экспериментальных достижениях физики конденсированного состояния, в возможностях современных пучковых и лазерных технологий в применении к конкретным методам создания, обработки и исследования различных твердотельных материалов и наноструктур, основных экспериментальных фактах физики сверхпроводимости и техники низких температур, их применениях в	3-ПК-20.2[1] - последние теоретические и экспериментальные достижения физики конденсированного состояния, применения современных сверхпроводящих материалов, фазовых переходов в современных материалах, применения современных сверхпроводящих материалов, возможности современных пучковых и лазерных технологий в применении к конкретным методам создания, обработки и исследования различных

методов вычислительной математики, компьютерных и информационных технологий; участие в обобщении полученных данных, формировании выводов, в подготовке научных и аналитических отчетов, публикаций и презентаций результатов научных и аналитических исследований; подготовка данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций, участие во внедрении результатов исследований и разработок.		экспериментальной технике и промышленности.  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.004	твердотельных материалов и наноструктур; У-ПК-20.2[1] - уметь предложить и обосновать схему эксперимента по лазерной обработке материалов, лазерному напылению тонких пленок, исследованию поверхности, твердотельных материалов или наноструктур, для исследования фазовых переходов в современных материалах; В-ПК-20.2[1] - владеть современными экспериментальными данными в области физики взаимодействия излучения оптического диапазона с веществом в конденсированном состоянии, методов исследования структурных и электронных свойств твердых тел
производственно-технологический			
Участие в модернизации существующих, разработке и внедрении новых методов контроля качества материалов, производственно-технологических процессов и готовой продукции в сфере высоких и наукоемких технологий.	Методы контроля качества материалов, процессов и продукции.	ПК-9 [1] - Способен проводить математическое и компьютерное моделирование объектов, систем, процессов и явлений в избранной предметной области  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.004	З-ПК-9[1] - Знать основные методы и принципы математического и компьютерного моделирования объектов, систем, процессов и явлений в избранной предметной области. ; У-ПК-9[1] - Уметь применять методы математического и компьютерного моделирования объектов, систем, процессов и явлений в избранной предметной

			области; В-ПК-9[1] - Владеть навыками математического и компьютерного моделирования объектов, систем, процессов и явлений
--	--	--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практик. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>1 Семестр</i>						
1	Раздел 1	1-8	8/16/0		25	КИ-8	3-ПК-20.1, У-ПК-20.1, В-ПК-20.1, 3-ПК-20.2, У-ПК-20.2, В-ПК-20.2, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9
2	Раздел 2	9-16	8/16/0		25	КИ-16	3-ПК-20.1, У-ПК-20.1, В-ПК-20.1, 3-ПК-20.2, У-ПК-20.2, В-ПК-20.2, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9
	<i>Итого за 1 Семестр</i>		16/32/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 1 Семестр</b>				50	Э	3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9,

							3-ПК-20.1, У-ПК-20.1, В-ПК-20.1, 3-ПК-20.2, У-ПК-20.2, В-ПК-20.2
--	--	--	--	--	--	--	---------------------------------------------------------------------------------

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
КИ	Контроль по итогам
Э	Экзамен

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>1 Семестр</i>	16	32	0
<b>1-8</b>	<b>Раздел 1</b>	8	16	0
1 - 2	<b>Тема 1. Строение и магнитный момент электронных оболочек атома.</b> Строение электронной оболочки атома. Приближение Рассела-Саундерса, правила Хунда. Терм основного состояния свободного атома. Полный механический и магнитный момент атома. Фактор Ланде.	Всего аудиторных часов		
		2	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
3 - 4	<b>Тема 2. Ион в кристаллическом поле.</b> Влияние кристаллического поля на состояния d и f оболочек. Перестройка d-оболочки и замораживание ее орбитального момента. Заполнение t <sub>2g</sub> и e <sub>g</sub> состояний в промежуточном и сильном поле.	Всего аудиторных часов		
		2	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
5	<b>Тема 3. Диамагнетизм.</b> Магнитостатика и термодинамика немагнитных веществ. Диа- и парамагнитные диэлектрики и металлы.	Всего аудиторных часов		
		1	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
6	<b>Тема 4. Парамагнетизм.</b> Свойства веществ, содержащих невзаимодействующие магнитные ионы. Зависимость намагниченности от температуры и поля.	Всего аудиторных часов		
		1	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
7 - 8	<b>Тема 5. Обменное взаимодействие и магнитоупорядоченные среды.</b> Природа обменного взаимодействия. Ферро- и антиферромагнетики. Температура фазового перехода в магнитоупорядоченное состояние. Спонтанная намагниченность. Критерий Стонера, РККИ взаимодействие в металлах.	Всего аудиторных часов		
		2	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
<b>9-16</b>	<b>Раздел 2</b>	8	16	0
9 - 12	<b>Тема 6. Ферромагнетизм и антиферромагнетизм.</b>	Всего аудиторных часов		

	Основные параметры ферромагнитного состояния. Феноменологическая теория ферромагнетизма и антиферромагнетизма - модели Кюри - Вейсса-Нееля. Обменная теория самопроизвольной намагниченности. Ферромагнитные металлы. Переход «пара – ферро» - фазовый переход второго рода.	4	8	0
		Онлайн		
		0	0	0
13 - 16	<b>Тема 7. Доменная структура ферромагнетика.</b> Энергия магнитной анизотропии и направление намагниченности в домене. Доменные стенки. Гистерезисная кривая намагничивания ферромагнетика: коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, насыщение, парапроцесс.. Техническая кривая намагниченности. Магнитный гистерезис. Мягкие магнитные материалы. Магнитножесткие материалы.	Всего аудиторных часов		
		4	8	0
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При освоении данной дисциплины основную роль играют аудиторные занятия в виде лекций и семинаров, а также самостоятельная работа студентов, заключающаяся в выполнении домашнего задания, изучении пройденного материала, подготовке к письменным тестам. Для того чтобы показать современное физическое состояние физики магнитных свойств твердых тел, предусмотрено широкое использование современных научных работ и публикаций по данной теме, посещение лабораторий НИЯУ МИФИ. Рекомендуется посещение студентами научных семинаров и конференций, в том числе, проводимых в рамках Научной сессии НИЯУ МИФИ, а также в других московских университетах и институтах

## 6. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
-------------	---------------------	-----------------------------------



ПК-2	З-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-16
ПК-20.1	З-ПК-20.1	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-20.1	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-20.1	Э, КИ-8, КИ-16
ПК-20.2	З-ПК-20.2	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-20.2	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-20.2	Э, КИ-8, КИ-16
ПК-9	З-ПК-9	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-9	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-9	Э, КИ-8, КИ-16

### Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-х балльной шкале	Отметка о зачете	Оценка ECTS
90-100	5 – «отлично»	«Зачтено»	A
85-89	4 – «хорошо»		B
75-84			C
70-74			D
65-69	3 – «удовлетворительно»		E
60-64			
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	«Не зачтено»	F

Оценка «отлично» соответствует глубокому и прочному освоению материала программы обучающимся, который последовательно, четко и логически стройно излагает свои ответы, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответах материалы монографической литературы.

Оценка «хорошо» соответствует твердым знаниям материала обучающимся, который грамотно и, по существу, излагает свои ответы, не допуская существенных неточностей.

Оценка «удовлетворительно» соответствует базовому уровню освоения материала обучающимся, при котором освоен основной материал, но не усвоены его детали, в ответах присутствуют неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности.

Отметка «зачтено» соответствует, как минимум, базовому уровню освоения материала программы, при котором обучающийся владеет необходимыми знаниями, умениями и

навыками, умеет применять теоретические положения для решения типовых практических задач.

Оценку «неудовлетворительно» / отметку «не зачтено» получает обучающийся, который не знает значительной части материала программы, допускает в ответах существенные ошибки, не выполнил все обязательные задания, предусмотренные программой. Как правило, такие обучающиеся не могут продолжить обучение без дополнительных занятий.

## **7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:**

1. ЭИ Y91 Fundamentals of Semiconductors : Physics and Materials Properties, Yu, Peter Y. , Cardona, Manuel. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010
2. ЭИ H99 Solid-State Physics : An Introduction to Principles of Materials Science, Luth, Hans. , Ibach, Harald. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009
3. ЭИ К31 Современные проблемы физики конденсированного состояния : , Красавин А.В., Кашурников В.А., Москва: МИФИ, 2008
4. 539.2 К31 Современные проблемы физики твердого тела Ч.1 Целый и дробный квантовые эффекты Холла, Кашурников В.А., Москва: НИЯУ МИФИ, 2011
5. ЭИ К12 Теоретическая физика твердого тела : , Собакин В.Н., Каган Ю.М., Ивлиев С.В., М.: МИФИ, 2009
6. ЭИ Б 18 Физика конденсированного состояния : учебное пособие, Байков Ю. А., Кузнецов В. М., Москва: Лаборатория знаний, 2020

### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:**

1. 539.2 К45 Введение в физику твердого тела : , Киттель Ч., М.: МедиаСтар, 2006
2. 53 И83 Квантовая физика : основные законы, Иродов И.Е., М.: Бином. Лаборатория знаний, 2004
3. 538.9 П30 Основы физики конденсированного состояния : учебное пособие, Петров Ю.В., Долгопрудный: Интеллект, 2013
4. 539.2 Г95 Физика твердого тела : учеб. пособие для техн. ун-тов, Гуревич А.Г., СПб: Невский диалект; БХВ-Петербург, 2004

### **ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:**

Специальное программное обеспечение не требуется

### **LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:**

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

## **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

## **9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

Одно из самых ярких проявлений макроскопических квантово-механических свойств магнетиков - ферромагнетизм. В современной физике твёрдого тела, в частности ферромагнетика (сюда же отнесём антиферромагнетики и ферриты) широко используется концепция квазичастиц, квантов коллективных осцилляторных движений атомов и ионов и магнитных моментов, связанных с ними. Эти квазичастицы - фононы и магноны.

Вы должны представлять себе ферромагнетик как идеальный строго периодический кристалл, наполненный идеальными или слабонеидеальными газами квазичастиц - фононов и магнонов. Отсюда и следует необходимость знания свойств газов при изучении физики твердого тела.

Студенты должны быть готовы участвовать во время лекции в работе по получению того или иного результата в интерактивном режиме при поддержке преподавателя, опираясь на свои знания.

Используемая система единиц – СГС (Гауссова). Желательно как следует её вспомнить, особенно электрические и магнитные единицы.

## **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

Предполагается, что студенты знакомы с содержанием основных разделов курсов «Высшая математика», «Общая физика», «Квантовая механика», «Атомная физика».

Необходимо подчёркивать, что освоение курса подразумевает знания квантовой механики и статистической физики (классической и квантовой). Напоминать, что такое квантовая статистическая функция распределения Ферми – Дирака и Бозе – Эйнштейна.

Обращать внимание, что магнетизм – это сугубо квантово-механическое явление, поэтому необходимо хорошо знать квантовую механику.

Используемая система единиц – СГС (Гауссова).

Автор(ы):

Маслов Владимир Алексеевич, к.ф.-м.н., доцент

Кузнецов Алексей Владимирович, к.ф.-м.н.