

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ФИЗИКИ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ**

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, экз./зач./КСР/КП
2	4	144	15	15	0	78	0	Э
Итого	4	144	15	15	0	78	0	

## АННОТАЦИЯ

В курсе изучаются физические явления в сверхпроводниках и современные экспериментальные методы их исследования. Рассматриваются методы получения сверхпроводников, сверхпроводящих пленок и тонких слоев, проводов, лент и кабелей. Рассматриваются также методы измерения основных критических параметров сверхпроводников – ширины энергетической щели, критической температуры, критического тока, критических полей. Курс знакомит с основополагающими экспериментами в области сверхпроводимости, обучает технике основных экспериментов на сверхпроводниках. Курс знакомит с последними достижениями в области сверхпроводимости. Значительное внимание в курсе уделено высокотемпературным сверхпроводникам.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Показать и обсудить методы получения сверхпроводников, сверхпроводящих пленок, тонких слоев, проводов, лент и кабелей. Научить методам и технике измерения основных критических параметров сверхпроводников – ширины энергетической щели, критической температуры, критического тока, критических полей. Дать ориентацию в физических явлениях в сверхпроводниках и основополагающих экспериментах в области сверхпроводимости.

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

Дисциплина логически и содержательно-методически связана со следующими дисциплинами: фазовые переходы в конденсированных средах, современные проблемы в физике твердого тела, низкотемпературная техника в физическом эксперименте, сверхпроводниковая электроэнергетика.

### 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 деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
	инновационный;		
сбор и анализ	научно-	ПК-6 [1] - Способен	З-ПК-6[1] - Знать

<p>информационных источников и исходных данных для планирования и разработки исследовательских проектов; подготовка исходных данных для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; участие в разработке и реализации проектов исследовательской и инновационной направленности в команде исполнителей.</p>	<p>технические и организационные решения</p>	<p>разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности научно-производственного коллектива, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 06.022</p>	<p>основы планирования и организации научных инновационных исследований в профессиональной области; правила и принципы научной этики, методики оценки инновационных проектов. ; У-ПК-6[1] - Уметь оценивать и развивать инновационный потенциал новых научных и научно-технологических разработок, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов.; В-ПК-6[1] - Владеть навыками планирования организации инновационной деятельности научно-производственного коллектива и технико-экономической оценки (экспертизы) инновационных проектов</p>
<p>сбор и анализ информационных источников и исходных данных для планирования и разработки исследовательских проектов; подготовка исходных данных для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; участие в разработке и реализации проектов исследовательской и</p>	<p>научно-технические и организационные решения</p>	<p>ПК-22.3 [1] - Способен ориентироваться в основных фазовых переходах, основных теоретических подходах к их описанию и исследованию, основных экспериментальных фактах физики сверхпроводимости и криогенной техники, их применениях в экспериментальной технике и промышленности</p>	<p>З-ПК-22.3[1] - знать классификацию фазовых переходов, основные экспериментальные факты и применения физики сверхпроводимости и криогенной техники ; У-ПК-22.3[1] - уметь предложить схему эксперимента для исследования фазовых переходов в современных материалах, применения современных</p>

инновационной направленности в команде исполнителей.		Основание: Профессиональный стандарт: 06.022	сверхпроводящих материалов ; В-ПК-22.3[1] - владеть основными теоретическими моделями и экспериментальными фактами физики фазовых переходов и сверхпроводимости
--	--	---	--

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (семинары )/ Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>2 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	8/8/0		25	КИ-8	3-ПК-6, У-ПК-6, В-ПК-6, 3-ПК-22.3, У-ПК-22.3, В-ПК-22.3
2	Часть 2	9-15	7/7/0		25	КИ-15	3-ПК-6, У-ПК-6, В-ПК-6, 3-ПК-22.3, У-ПК-22.3, В-ПК-22.3
	<i>Итого за 2 Семестр</i>		15/15/0		50		

	<b>Контрольные мероприятия за 2 Семестр</b>				50	Э	3-ПК-6, У-ПК-6, В-ПК-6, 3-ПК-22.3, У-ПК-22.3, В-ПК-22.3
--	---	--	--	--	----	---	--

\* – 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:

<b>Обозначение</b>	<b>Полное наименование</b>
КИ	Контроль по итогам
Э	Экзамен

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

<b>Недели</b>	<b>Темы занятий / Содержание</b>	<b>Лек., час.</b>	<b>Пр./сем., час.</b>	<b>Лаб., час.</b>
	<i>2 Семестр</i>	15	15	0
<b>1-8</b>	<b>Часть 1</b>	8	8	0
1	<b>Тема 1</b> Основные явления в области сверхпроводимости, критические параметры.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
2	<b>Тема 2</b> Классы сверхпроводников, высокотемпературные сверхпроводники.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
3	<b>Тема 3</b> Методы получения сверхпроводящих материалов. Получение сверхпроводящих пленок и тонких слоев.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
4	<b>Тема 4</b> Нетрадиционные методы получения сверхпроводников. Изготовление сверхпроводящих проводов, лент и кабелей.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
5 - 6	<b>Тема 5</b> Основные методики измерений критических магнитных	Всего аудиторных часов		
		2	2	0

	полей и токов. Измерение критических температур.	Онлайн			
		0	0	0	
7 - 8	<b>Тема 6</b> Основные представления о сверхпроводящем состоянии. Электрон-фононное взаимодействие и куперовские пары. Энергетическая щель в спектре возбуждений. Теория БКШ.	Всего аудиторных часов			
		2	2	0	
		Онлайн			
		0	0	0	
9-15	<b>Часть 2</b>	7	7	0	
9	<b>Тема 7</b> Эксперименты, подтверждающие основные представления о сверхпроводящем состоянии. Изотопический эффект. Квантование потока. Измерение энергетической щели. Другие эксперименты.	Всего аудиторных часов			
		1	1	0	
		Онлайн			
		0	0	0	
10	<b>Тема 8</b> Сверхпроводники в магнитном поле. Эффект Мейснера-Оксенфельда (идеальный диамагнетизм). Глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник. Промежуточное состояние. Граничная энергия и длина когерентности.	Всего аудиторных часов			
		1	1	0	
		Онлайн			
		0	0	0	
11 - 12	<b>Тема 9</b> Сверхпроводники 2го рода. Отрицательная поверхностная энергия. Вихри Абрикосова. Смешанное состояние. Кривые намагничивания. Фазовая диаграмма.	Всего аудиторных часов			
		2	2	0	
		Онлайн			
		0	0	0	
13	<b>Тема 10</b> Критические токи в сверхпроводниках 1го и 2го рода. Ток распаривания Гинзбурга-Ландау. Пиннинг вихревых нитей. Центры пиннинга. Движение магнитного потока в сверхпроводниках.	Всего аудиторных часов			
		1	1	0	
		Онлайн			
		0	0	0	
14	<b>Тема 11</b> Туннелирование в сверхпроводниках. Туннельный ток. Схемы измерений. Туннельная спектроскопия.	Всего аудиторных часов			
		1	1	0	
		Онлайн			
		0	0	0	
15	<b>Тема 12</b> Применения сверхпроводников. Высокотемпературная сверхпроводимость и перспективы.	Всего аудиторных часов			
		1	1	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

ТЕМЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

<b>Недели</b>	<b>Темы занятий / Содержание</b>
	<i>2 Семестр</i>
1 - 2	<b>Тема 1</b> Техника безопасности при выполнении лабораторных работ.
3 - 4	<b>Тема 2</b> Лабораторная работа "Свойства жидкого азота".
5 - 6	<b>Тема 3</b> Лабораторная работа "Методы измерения критического тока."
7 - 8	<b>Тема 4</b> Лабораторная работа "Сверхпроводники в магнитном поле. Критическое поле."
9 - 10	<b>Тема 5</b> Лабораторная работа "Методы измерения критической температуры сверхпроводников."
11 - 12	<b>Тема 6</b> Лабораторные работы "Измерение критической температуры высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) при температурах выше 77,4 К", "Измерение критического тока ВТСП при температурах выше 77,4 К".
13 - 14	<b>Тема 7</b> Лабораторная работа "Сканирующая холловская магнитометрия".
15 - 16	<b>Тема 8</b> Лабораторная работа "Охлаждение сверхпроводников с помощью криокулерной техники".

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При освоении данной дисциплины основную роль играют аудиторные занятия с использованием компьютерных технологий и самостоятельная работа студентов. Для того чтобы дать современное состояние физики сверхпроводимости, 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 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:

<b>Компетенция</b>	<b>Индикаторы освоения</b>	<b>Аттестационное мероприятие (КП 1)</b>
ПК-22.3	3-ПК-22.3	Э, КИ-8, КИ-15

	У-ПК-22.3	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-22.3	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-6	З-ПК-6	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-6	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-6	Э, КИ-8, КИ-15

### 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-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – «хорошо»	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69	3 – «удовлетворительно»	E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	F	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

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

### **ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:**

1. ЭИ М 34 Материаловедение сверхпроводников на основе соединений А-15 : Учебное пособие, М.: НИЯУ МИФИ, 2019
2. ЭИ Р83 Основы построения криогенных устройств : , Москва: МИФИ, 2008
3. ЭИ С 76 Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем : монография, Москва: МЭИ, 2016
4. ЭИ С 76 Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем : учебник, Москва: МЭИ, 2019
5. ЭИ К 88 Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для вузов, Москва: Юрайт, 2022
6. 538.9 К12 Физика макроскопических квантовых систем : курс лекций; семинары, Москва: Издательский дом МЭИ, 2014
7. 538.9 С24 Сверхтекучесть и бозе-конденсация : учебное пособие для вузов, В. А. Кашурников [и др.], Москва: МИФИ, 2008
8. 621.5 В29 Искусство криогеники. Низкотемпературная техника в физическом эксперименте, промышленных и аэрокосмических приложениях : , Г. Вентура, Л. Ризегари, Долгопрудный: Интеллект, 2011
9. 538.9 Б40 Физические основы сверхпроводимости : лабораторный практикум: учебное пособие для вузов, И. Ю. Безотосный , И. А. Руднев, Москва: МИФИ, 2008
10. ЭИ Б40 Физические основы сверхпроводимости : лабораторный практикум: учебное пособие для вузов, И. Ю. Безотосный, И. А. Руднев, Москва: МИФИ, 2008
11. 539.2 А72 Технология тонких пленок : учебное пособие для вузов, С. В. Антоненко, Москва: МИФИ, 2008
12. ЭИ А72 Технология тонких пленок : учебное пособие для вузов, С. В. Антоненко, Москва: МИФИ, 2008

### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:**

1. ЭИ М 34 Материаловедение сверхпроводников на основе ВТСП, диборида магния и пниктидов : Учебное пособие, М.: НИЯУ МИФИ, 2019
2. 538.9 Л12 Лабораторный практикум "Квантовые когерентные системы: сверхпроводники и наноструктуры" : , М.: МИФИ, 1999
3. 539.2 К31 Современные проблемы физики твердого тела Ч.2 Высокотемпературная сверхпроводимость, , Москва: МИФИ, 2002

4. 537 Б90 Сверхпроводимость : Основы и приложения, В. Буккель, М.: Мир, 1975
5. 621.5 Р83 Основы расчета низкотемпературных устройств : учеб. пособие для вузов, И. А. Руднев, М.: МИФИ, 2006
6. 621.5 Р83 Принципы конструирования криогенных устройств : учебное пособие для вузов, И. А. Руднев, Москва: МИФИ, 2007
7. 537 Т42 Введение в сверхпроводимость : , Тинкхам М.;Пер. с англ., М.: Атомиздат, 1980

#### 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**

Цель данного курса – Показать методы получения сверхпроводников, сверхпроводящих пленок, тонких слоев, проводов, лент и кабелей. Научить методам и технике измерения основных критических параметров сверхпроводников – ширины энергетической щели, критической температуры, критического тока, критических полей. Дать ориентацию в физических явлениях в сверхпроводниках и основополагающих экспериментах в области сверхпроводимости.

Курс опирается на материал следующих дисциплин, читаемых студентам физико-математических специальностей: квантовая механика, макроэлектродинамика, статистическая физика и термодинамика, физика конденсированного состояния вещества.

Для успешного освоения дисциплины необходимы знания по курсам общей физики и университетскому курсу математики. Необходимо уметь работать с операторами, знать дифференциальное и интегральное исчисление, тензорный и векторный анализ, статистику и термодинамику, электричество и магнетизм, в том числе в материальных средах. Необходимо ориентироваться в задачах квантовой механики и статистической физики, основные квантовые и классические распределения, элементы квантовой статистики.

В результате освоения данной дисциплины студент должен:

1) Знать: понятие критических параметров, основные экспериментальные факты, характеризующие сверхпроводимость; классы сверхпроводников, методы получения сверхпроводящих материалов, основные методики измерений критических магнитных полей и токов; понятия сверхпроводящего состояния, электрон-фононное взаимодействие и куперовские пары, основы теории БКШ, квантование потока, сверхпроводники 2го рода,

смешанное состояние, кривые намагничивания сверхпроводников 1го и 2го рода, применения сверхпроводников.

2) Уметь: применять фундаментальные законы в области физики сверхпроводимости для самостоятельного комбинирования и синтеза реальных идей, применять теоретические и компьютерные методы исследований в области физики сверхпроводимости; производить поиск нужной информации в специальной научно-технической и патентной литературе по тематике исследований и разработок, применять экспериментальные методы электрофизических, оптических и структурных исследования сверхпроводников.

3) Владеть современными методами измерения вольтамперных, магнитных, оптических и др. характеристик сверхпроводников.

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

При чтении курса следует придерживаться следующей последовательности изложения. Сначала рассматриваются основные явления в области сверхпроводимости, критические параметры, классы сверхпроводников. Изучаются методы получения сверхпроводящих материалов, в том числе изготовление сверхпроводящих проводов, лент и кабелей. Затем обсуждаются основные методики измерений критических магнитных полей и токов, измерение критических температур. Подробно рассматриваются основные представления о сверхпроводящем состоянии, электрон-фононное взаимодействие и куперовские пары, энергетическая щель в спектре возбуждений. После этого требуется уделить внимание экспериментам, подтверждающим основные представления о сверхпроводящем состоянии. А именно, изотопический эффект, квантование потока, измерение энергетической щели. Важной темой является сверхпроводники в магнитном поле, эффект Мейснера-Оксенфельда (идеальный диамагнетизм), глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник, промежуточное состояние, граничная энергия и длина когерентности. Особое внимание следует обратить на изучение сверхпроводников 2го рода, отрицательная поверхностная энергия, вихри Абрикосова, смешанное состояние, кривые намагничивания, фазовая диаграмма. Из этой темы следует следующая - критические токи в сверхпроводниках 1го и 2го рода, ток распаривания Гинзбурга-Ландау, пиннинг вихревых нитей, центры пиннинга, движение магнитного потока в сверхпроводниках. В конце курса следует изучить туннелирование в сверхпроводниках, туннельный ток, схемы измерений, туннельная спектроскопия. Также рассмотреть применения сверхпроводников.

Во время проведения лекция желательно использовать проекционную технику, а также инициировать обсуждение материала методом «вопросов в аудиторию».

В помощь лектору, а также преподавателям, ведущим лабораторные занятия по курсу «Экспериментальные методы физики сверхпроводимости», рекомендуется использовать книги :

1. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. М.: Наука, 2000.
2. Тинкхам М. Введение в физику сверхпроводимости М.: Наука, 1980.
3. А.Роуз-Инс, Е.Родерик. Введение в физику сверхпроводимости. М.: Мир, 1972.

Автор(ы):

Руднев Игорь Анатольевич, к.ф.-м.н., доцент