

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**и.о. директора физтех-школы  
физики и исследований им.  
Ландау**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Основы теории сверхпроводимости
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Космические технологии Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра электродинамики сложных систем и нанофотоники
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: А.Л. Рахманов, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры электродинамики сложных систем и нанофотоники 04.06.2020

## Аннотация

В настоящее время изучение явления сверхпроводимости является одной из самых горячих тематик физики конденсированного состояния. Этот интерес связан во многом с открытием новых сверхпроводящих материалов, с рекордно высокими температурами перехода (рекорд минус 13 градусов Цельсия), топологических сверхпроводников, сверхпроводимости в двухслойном графене. Кроме фундаментального интереса, сверхпроводимость важна для приложений, от гигантских лабораторных магнитов и линий электропередач до кубитов для интенсивно разрабатываемых в настоящее время квантовых компьютеров.

Цель данного курса – дать целостное представление о физике сверхпроводимости, начиная с базовых понятий до проблем, которые стоят перед современной физикой этого явления. Курс рассчитан на широкую целевую аудиторию. Он будет полезен, как будущим теоретикам, специализирующимся в области физики конденсированного состояния, так и для тех студентов, которым данный курс позволит расширить свой научный кругозор. В лекциях будет изложена феноменология сверхпроводимости, включающая в себя основы электродинамики сверхпроводников и описание возможных приложений. Заметное внимание будет уделено и микроскопической квантовой теории сверхпроводимости.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Цель курса – дать целостное представление о физике сверхпроводников, начиная с базовых понятий до проблем, которые стоят перед современной физикой этого явления. Студенты должны освоить фундаментальные знания в области теории и приложений сверхпроводимости, основ теории квантовых многочастичных систем, а также основ электродинамики сверхпроводимости.

### Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области физики конденсированного состояния, как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков;
- формирование базовых знаний в области электродинамики нелинейных систем;
- формирование подходов к выполнению исследований студентами в области физики современных материалов в рамках выпускных работ на степень магистра.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)

ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

Основы физики сверхпроводимости и современное состояние проблемы.

уметь:

Пользоваться базовым математическим аппаратом, ориентироваться в современной научной литературе по проблеме.

владеть:

Знаниями основ теории сверхпроводимости и знаниями о современном состоянии проблемы.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение.	2	2		3
2	Теория Бардина-Купера-Шрифера (БКШ).	2	2		3
3	Теория БКШ, продолжение.	2	2		3
4	Теория Гинзбурга-Ландау (ГЛ).	2	2		3
5	Сверхпроводники первого и второго рода.	2	2		3
6	Электродинамика сверхпроводников второго рода.	2	2		3
7	Эффект Джозефсона.	2	2		3
8	Электродинамика эффекта Джозефсона	2	2		3
9	Высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП).	2	2		3
10	Электродинамика слоистых ВТСП.	2	2		3
11	Применения сверхпроводников.	2	2		3
12	Решение задач по электродинамике сверхпроводников второго рода.	2	2		3

13	Решение задач по распространению плазменных волн в слоистых сверхпроводниках.	2	2		3
14	Решение задач по эффекту Джозефсона.	4	4		6
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Введение.

Что такое сверхпроводники. Основные явления – исчезновение сопротивления незатухающий ток, эффект Мейснера. Критическая температура, критическое магнитное поле, критический ток.

##### 2. Теория Бардина-Купера-Шриффера (БКШ).

Феномен Купера, электрон-фононное взаимодействие и природа электрон-электронного притяжения. Метод эффективного поля, основное состояние модели БКШ, щель в спектре, спектр элементарных возбуждений.

##### 3. Теория БКШ, продолжение.

Феномен Купера, электрон-фононное взаимодействие и природа электрон-электронного притяжения. Метод эффективного поля, основное состояние модели БКШ, щель в спектре, спектр элементарных возбуждений.

##### 4. Теория Гинзбурга-Ландау (ГЛ).

Уравнения ГЛ, связь с моделью БКШ. Основные соотношения модели. Граничные условия. Энергия границы раздела сверхпроводник-нормальный металл. Параметр ГЛ, сверхпроводники первого и второго рода.

##### 5. Сверхпроводники первого и второго рода.

Сверхпроводники первого рода. Термодинамическое критическое поле. Промежуточное состояние. Критический ток проволоки. Эффект Литла-Паркса. Сверхпроводники второго рода. Вихри Абрикосова. Критические магнитные поля  $H_{c1}$ ,  $H_c$ ,  $H_{c2}$ ,  $H_{c3}$ .

##### 6. Электродинамика сверхпроводников второго рода.

Взаимодействие вихрей, решетка вихрей Абрикосова, намагниченность сверхпроводника второго рода. Ток в системе вихрей, сила Лоренца, движение вихрей и диссипация энергии. Явление пиннинга и концепция критического состояния. Критический ток магнитного потока

##### 7. Эффект Джозефсона.

Слабая сверхпроводимость. Туннельный гамильтониан, стационарный и нестационарный эффекты Джозефсона.

##### 8. Электродинамика эффекта Джозефсона

Электродинамика эффекта Джозефсона, плазменные волны. Уравнение синуса Гордона, джозефсоновские вихри, критический ток. СКВИДы и измерения малых магнитных полей. Сверхпроводниковые кубиты.

#### 9. Высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП).

Сверхпроводящие купраты и пниктиды. Особенности ВТСП, анизотропные сверхпроводники, s, d, p, типы спаривания, многозонные сверхпроводники. Псевдощель. Слоистые сверхпроводники, модель Лоренца-Дониаха, вихри-пенкейки.

#### 10. Электродинамика слоистых ВТСП.

Плазменные волны в слоистых ВТСП. Фазовые переходы в вихревой системе ВТСП, гигантский крип потока и проблема критического тока в ВТСП.

#### 11. Применения сверхпроводников.

Обзор последних достижений в области сверхпроводящих материалов. Где сегодня применяются сверхпроводники. Сверхпроводящие магнитные системы. Линии передач. Томография. Токоограничители. Магнитные экраны. СВИД-магнетометры. Сверхпроводящие болометры. Сверхпроводящие кубиты – элементы квантового компьютера.

#### 12. Решение задач по электродинамике сверхпроводников второго рода.

Задачи о колебаниях решетки вихрей. Задачи о взаимодействии вихрей с дефектами.

#### 13. Решение задач по распространению плазменных волн в слоистых сверхпроводниках.

Расчет коэффициентов прохождения и отражения плазменных волн в слоистых сверхпроводниках. Поверхностные волны.

#### 14. Решение задач по эффекту Джозефсона.

Расчет электрических цепей, содержащих джозефсоновские контакты. Задачи о джозефсоновском контакте в магнитном поле.

### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Персональный компьютер, проектор и экран.

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 9, Ч. 2 : Статистическая физика. Теория конденсированного состояния : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц .— М. : Физматлит, 2000-2005 .— 496 с.

#### Дополнительная литература

1. Введение в теорию необычной сверхпроводимости [Текст] / В. П. Минеев, К. В. Самохин ; Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) - М.МФТИ, 1998

### 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Не используются

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Не предусмотрено.

**9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

Литература для самостоятельного изучения:

1. В.В. Шмидт «Введение в физику сверхпроводников»
2. П. Де Жен «Сверхпроводимость металлов и сплавов»
3. Tinkham M. Introduction to superconductivity. 2nd edition, McGraw-Hill, 1996

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Космические технологии Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра электродинамики сложных систем и нанофотоники
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	А.Л. Рахманов, д-р физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Основы теории сверхпроводимости» обучающийся должен:

### знать:

Основы физики сверхпроводимости и современное состояние проблемы.

### уметь:

Пользоваться базовым математическим аппаратом, ориентироваться в современной научной литературе по проблеме.

### владеть:

Знаниями основ теории сверхпроводимости и знаниями о современном состоянии проблемы.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Примеры контрольных заданий

1. Рассчитать цепь постоянного тока, состоящую из нормального сопротивления и пары параллельно расположенных джозефсоновских контактов. Рассмотреть различные соотношения между транспортным и критическим током.



2. Оценить силу пиннинга вихря, захваченного параллельным ему цилиндрическим несверхпроводящим дефектом радиуса порядка длины когерентности.
3. Найти коэффициент отражения плоской электромагнитной волны от поверхности слоистого ВТСП (падение на плоскость параллельную кристаллографическому направлению  $c$ ).
4. Найти коэффициент отражения плоской электромагнитной волны от поверхности слоистого ВТСП (падение на плоскость параллельную кристаллографическому направлению  $ab$ ).
5. Какая энергия выделится при аннигиляции вихря и «антивихря»?

#### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

##### Перечень контрольных вопросов

1. В чем отличие сверхпроводника от металла с нулевым сопротивлением.
2. Качественно опишите зависимость от температуры и частоты коэффициента поглощения электромагнитного излучения сверхпроводником.
3. В каких перспективных направлениях техники возможно применение сверхпроводимости? В чем преимущество сверхпроводников?
4. Почему магнитные примеси разрушают сверхпроводимость в  $s$ -канале? Что будет в  $p$ -канале?
5. В чем заключается необычность купратных и железосодержащих?

##### Примеры экзаменационных билетов

###### Билет 1

1. Что такое сверхпроводники. Основные явления – исчезновение сопротивления незатухающий ток, эффект Мейснера. Сверхпроводимость – новое фазовое состояние системы. Отличие сверхпроводника от металла с нулевым сопротивлением.
2. Теория БКШ. Метод эффективного поля, основное состояние модели БКШ, щель в спектре, спектр элементарных возбуждений.

###### Билет 2

1. Критическая температура, критическое магнитное поле, критический ток. Какие бывают сверхпроводники. Низкотемпературные сверхпроводники и ВТСП.
2. Теория БКШ. Конечные температуры, термодинамические соотношения, критическая температура.

###### Билет 3

1. Феномен Купера, электрон-фононное взаимодействие и природа электрон-электронного притяжения.
2. ВТСП:  $s$  и  $d$  типы спаривания. Псевдощель.

###### Билет 4

1. Особенности ВТСП. Кристаллическая решетка ВТСП, анизотропные сверхпроводники.
2. Уравнения ГЛ. Связь с моделью БКШ. Основные соотношения модели. Граничные условия.

###### Билет 5

1. Энергия границы раздела сверхпроводник-нормальный металл. Параметр ГЛ, сверхпроводники первого и второго рода.
2. Эффект Джозефсона. Туннельный гамильтониан, стационарный и нестационарный эффекты Джозефсона.

##### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.