

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр  
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»  
(ИОФ РАН)

УТВЕРЖДАЮ



Директор ИОФ РАН,  
чл.-корр. РАН

С.В. Гарнов

«    »    202    г.

**Рабочая программа дисциплины  
МЕТОДЫ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Специальности: 1.3.3. Теоретическая физика  
1.3.4. Радиофизика  
1.3.5. Физическая электроника  
1.3.7. Акустика  
1.3.8. Физика конденсированного состояния  
1.3.9. Физика плазмы  
1.3.11. Физика полупроводников  
1.3.19. Лазерная физика  
2.2.3 Технология и оборудование для производства полупроводников,  
материалов и приборов электронной техники

г. Москва  
2022 год

Рабочая программа дисциплины «Методы физического эксперимента» составлена в соответствии с Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов, утвержденными приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 20 октября 2021 г. № 951.

Программу составили: Гарнов С.В., чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., директор.  
Глушков В.В., д.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе.  
Демишев С.В., д.ф.-м.н., проф., заместитель директора по научной работе.  
Ельцов К.Н., д.ф.-м.н., заведующий отделом.

Программа обсуждена и одобрена на заседании аспирантской комиссией ИОФ РАН  
30.06.2022, протокол №2206-30

Программа утверждена решением Ученого совета ИОФ РАН 05.07.2022 протокол №13

## **Аннотация**

Учебная дисциплина «Методы физического эксперимента» является важной составной частью Учебного плана программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре ИОФ РАН. В рамках дисциплины «Методы физического эксперимента» обучающиеся (далее – аспиранты) получают базовые знания современных экспериментальных методов физики для исследования процессов в вакууме, в твердом теле на атомном уровне, включая поверхность, в плазме, сильных электромагнитных (лазерных) полях; для анализа физических процессов, определяющих электронные, магнитные и оптические свойства конденсированных сред, ознакомятся с прецизионными способами создания объектов исследования, а также с методами практической реализации экспериментальных исследований в физике конденсированного состояния и лазерной физике. В курсе лекций освещены современные экспериментальные методы и инструментарий, используемые для пространственно-временной и спектрально-временной диагностики плазмы, создаваемой импульсным лазерным излучением пико- и фемтосекундной длительности, а также методы генерации и регистрации лазерных импульсов пико- и фемтосекундной длительности.

Дисциплина «Методы физического эксперимента» является важным фактором формирования у аспиранта целостного научного мировоззрения, развития физического мышления, умения использовать базовые физические законы, включая законы квантовой физики, для анализа различных явлений в области физики конденсированного состояния и лазерной физики. Дисциплина направлена на интеграцию общеприродной и общетеоретической подготовки физиков, в том числе, с ознакомлением с технологическими основами современных инновационных сфер деятельности. Освоение дисциплины позволит выработать у аспирантов практические подходы к решению современных проблем в области лазерной физики, физики конденсированного состояния, физики поверхности и смежных областях естественных наук.

Общая трудоемкость учебной дисциплины «Методы физического эксперимента» составляет 3 зачетных единицы (108 часов).

Контроль уровня освоения дисциплины аспирантами проводится в формах текущей и промежуточной аттестации. Текущая аттестация предполагает оценку знаний и умений на лекционных занятиях с помощью устных опросов, оценки различных видов самостоятельной работы аспирантов. Промежуточная аттестация аспирантов проводится в форме зачетов (в 1 и 2 семестрах).

## **1. Цель изучения дисциплины**

Целью изучения дисциплины являются: ознакомление и освоение аспирантами современных экспериментальных методов физики для исследования процессов в вакууме, в твердом теле на атомном уровне, включая поверхность, в плазме, в сильных электромагнитных (лазерных) полях; анализ физических процессов, определяющих электронные, магнитные и оптические свойства конденсированных сред; изучение прецизионных способов создания объектов исследования; понимание способов практической реализации экспериментальных исследований в лазерной физике, физике конденсированного состояния, физике плазмы и смежных областях.

## **2. Задачи дисциплины**

1) обучение основным подходам к экспериментальному исследованию объектов физики, включающим современные методы физических исследований в условиях высокого вакуума, при низких и сверхнизких температурах и в сильных магнитных полях; современные методы исследований сверхбыстрых динамических процессов и механизмов плазмообразования в различных средах при воздействии на них лазерных импульсов, принципы генерации ультракоротких лазерных импульсов (УКИ) пикосекундного ( $\sim 10^{-11}$ -

$10^{-12}$  с) и фемтосекундного ( $\sim 10^{-13}$ - $10^{-14}$  с) диапазонов, методы измерения их длительности и спектрального состава;

2) формирование базовых знаний в области лазерной физики, физики конденсированного состояния, физики плазмы и физики поверхности как дисциплин, интегрирующих общезначимую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающих технологические основы современных инновационных сфер деятельности;

3) выявление естественнонаучной сущности проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности в лазерной физике, физике конденсированного состояния, физике плазмы и смежных областях;

4) формирование практических навыков, необходимых для организации и реализации экспериментальных исследований в физике конденсированного состояния и лазерной физике.

### **3. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры**

Дисциплина «Методы физического эксперимента» относится к элективным дисциплинам Образовательного компонента «Дисциплины (модули)» программы аспирантуры по следующим специальностям:

1.3.3. Теоретическая физика

1.3.4. Радиофизика

1.3.5. Физическая электроника

1.3.7. Акустика

1.3.8. Физика конденсированного состояния

1.3.9. Физика плазмы

1.3.11. Физика полупроводников

1.3.19. Лазерная физика

2.2.3 Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

Дисциплина «Методы физического эксперимента» реализуется в соответствии с ФГТ, ОПОП ВО и Учебного плана аспирантуры ИОФ РАН по специальностям:

1.3.3. Теоретическая физика

1.3.4. Радиофизика

1.3.5. Физическая электроника

1.3.7. Акустика

1.3.8. Физика конденсированного состояния

1.3.9. Физика плазмы

1.3.11. Физика полупроводников

1.3.19. Лазерная физика

2.2.3 Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

Изучение дисциплины «Методы физического эксперимента» опирается на знания базовых разделов общей физики, квантовой механики, а также начальных знаний по теоретической физике, приобретенных аспирантами в рамках освоения программ магистратуры или специалитета по естественнонаучным и техническим специальностям.

### **4. Требования к результатам освоения дисциплины**

Изучение дисциплины «Методы физического эксперимента» направлено на формирование у аспирантов следующих когнитивных умений и навыков:

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач в области лазерной физики, физики конденсированного состояния, физики плазмы и физики поверхности, а также в смежных и междисциплинарных областях;

- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области лазерной физики, физики конденсированного состояния, физики плазмы и физики поверхности.

В результате изучения дисциплины аспирант должен:

**Знать:**

- место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях; естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности в областях лазерной физики, физики конденсированного состояния, физики плазмы и физики поверхности;

- современные экспериментальные методы исследования объектов лазерной физики, физики конденсированного состояния, физики плазмы и физики поверхности;

- основные теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях применительно к лазерной физике, физике конденсированного состояния, физике плазмы и физике поверхности;

- новейшие открытия естествознания в экспериментальной лазерной физике, физике конденсированного состояния, физике плазмы и физике поверхности;

- современные проблемы лазерной физики, физики конденсированного состояния, физики плазмы и физики поверхности;

- представление о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

**Уметь:**

- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы, а также фундаментальные знания для понимания сущностных явлений окружающего мира;

- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания в области лазерной физики, физики конденсированного состояния, физики плазмы и физики поверхности;

- планировать оптимальный выбор экспериментов в области лазерной физики, физики конденсированного состояния, физики плазмы и физики поверхности;

- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;

- работать с информацией в области лазерной физики, физики конденсированного состояния, физики плазмы и физики поверхности, полученной из различных источников: научной периодической литературы, монографий и учебников, электронных ресурсов сети Интернет;

- активно и целенаправленно применять полученные знания, навыки и умения для выбора тематики выполнения индивидуальной научно-исследовательской работы, планирования оптимального проведения эксперимента в лазерной физике, физике конденсированного состояния, физики плазмы и физики поверхности;

- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций в лазерной физике, физике конденсированного состояния, физики плазмы и физики поверхности;

- выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности при анализе свойств объектов лазерной физики, физики конденсированного состояния, физики плазмы и физики поверхности;

- обосновывать применение математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов, относящихся к лазерной физике, физике конденсированного состояния, физике плазмы и физике поверхности;

- применять на практике умения и навыки в организации исследовательских работ и проводить научные исследования, готовность к участию в инновационной деятельности.

**Владеть:**

- планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента в области лазерной физики, физики конденсированного состояния, физики плазмы и физики поверхности;
- математическим моделированием физических задач в области лазерной физики, физики конденсированного состояния, физики плазмы и физики поверхности.
- научной картиной мира в лазерной физике, физике конденсированного состояния, физике плазмы, физике поверхности и смежных областях естествознания;
- творческим подходом в реализации научно-технических задач, основанному на систематическом обновлении полученных знаний, навыков и умений и использовании последних достижений в области лазерной физики, физики конденсированного состояния, физики плазмы и физики поверхности.

## 5. Объем и вид учебной работы

Общая трудоёмкость дисциплины «Методы физического эксперимента» составляет 3 зач. ед. (108 часов), их распределение по видам работ представлено в таблице 1.

Таблица 1

Распределение трудоёмкости дисциплины по видам работ

Вид учебной работы	Трудоёмкость			
	зач. ед.	час.	в т.ч. по семестрам	
			3	4
<b>Общая трудоёмкость</b> дисциплины по учебному плану	<b>3</b>	<b>108</b>	<b>54</b>	<b>54</b>
<b>Аудиторная работа:</b>		<b>46</b>	<b>28</b>	<b>18</b>
лекции (Л)		46	28	18
семинары (С)		0	0	0
<b>Самостоятельная работа:</b>		<b>62</b>	<b>26</b>	<b>36</b>
самоподготовка (проработка и повторение лекционного материала, освоение материала учебников и учебных пособий, подготовка к семинарам и т.д.)		50	18	32
Подготовка к зачёту		12	8	4
Подготовка к экзамену		0	0	0
<b>Вид контроля</b> (З – зачет, Э – кандидатский экзамен)			<b>3</b>	<b>3</b>

## 6. Содержание дисциплины

Таблица 2

Тематический план учебной дисциплины

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего	Аудиторная работа		Внеаудиторная работа СР
		Л	С	
<b>Раздел 1. Экспериментальные методы физики поверхности</b>				
Тема 1.1. Сверхвысокий и экстремально высокий вакуум (СВВ/ЭВВ)	3	2	0	1
Тема 1.2. Электронная спектроскопия и микроскопия	3	2	0	1

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего	Аудиторная работа		Внеаудиторная работа СР
		Л	С	
Тема 1.3. Зондовая микроскопия и спектроскопия	3	2	0	1
Тема 1.4. Экспериментальные методы зондовой микроскопии и спектроскопия	3	2	0	1
<b>Раздел 2. Экспериментальные методы физики низких температур и криогеника</b>				
Тема 2.1. Основы термодинамики	3	2	0	1
Тема 2.2. Криогеника и низкие температуры	3	2	0	1
Тема 2.3. Криогенные жидкости	3	2	0	1
Тема 2.4. Методы получения сверхнизких температур	3	2	0	1
Тема 2.5. Термометрия и вакуумная техника	3	2	0	1
<b>Раздел 3. Экспериментальные методы физики сильных магнитных полей</b>				
Тема 3.1. Сильные магнитные поля	3	2	0	1
Тема 3.2. Магнитные поля в физическом эксперименте	6	4	0	2
Тема 3.3. Магнитный резонанс	3	2	0	1
Тема 3.4. Экспериментальные методы физики низких температур и сильных магнитных полей	3	2	0	1
Подготовка к зачету	3	2	0	8
<b>Всего за 1 семестр</b>	<b>54</b>	<b>28</b>	<b>0</b>	<b>26</b>
<b>Раздел 4. Экспериментальные методы диагностики лазерной плазмы</b>				
Тема 4.1. Основные понятия: объекты и методы исследования лазерной плазмы	6	2	0	4
Тема 4.2. Лазерная интерферометрия	12	4	0	8
Тема 4.3. Спектроскопия лазерной плазмы: спектральные приборы - призма, дифракционная решетка. Сверхскоростная электронно-оптическая спектроскопия плазмы.	8	4	0	4
<b>Раздел 5. Методы генерации и регистрации ультракоротких лазерных импульсов</b>				
Тема 5.1. Введение в физику ультракоротких лазерных импульсов (УКИ).	6	2	0	4
Тема 5.2. Методы синхронизация мод	6	2	0	4
Тема 5.3. Спектрально-временная компрессия и принципы усиления УКИ	6	2	0	4
Тема 5.4. Измерение длительности УКИ и их применения	6	2	0	4
Подготовка к зачету	4	0	0	4
<b>Всего за 2 семестр</b>	<b>54</b>	<b>18</b>	<b>0</b>	<b>36</b>
<b>Итого по дисциплине</b>	<b>108</b>	<b>46</b>	<b>0</b>	<b>62</b>

## **Раздел 1. Экспериментальные методы физики поверхности**

### **Тема 1.1. Сверхвысокий и экстремально высокий вакуум (СВВ/ЭВВ).**

Сферы использования сверхвысокого и экстремально высокого вакуума. Методы создания вакуума. Материалы и конструктив. Физические способы измерения СВВ/ЭВВ. Базовые принципы масс-спектрометрии. Типы приборов. Поиски течей.

### **Тема 1.2. Электронная спектроскопия и микроскопия.**

Электронный спектр твердого тела при возбуждении электронами и электромагнитным излучением. Фотоэлектронная спектроскопия. Электронная оже-спектроскопия. EXAFS - методы. Фотоэлектронная и электронная дифракция. Электронные микроскопы.

### **Тема 1.3. Зондовая микроскопия и спектроскопия.**

Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия упругого туннелирования электронов. Спектроскопия неупругого туннелирования электронов. Атомно-силовая микроскопия, включая режим притяжения с частотной модуляцией. Характерные объекты исследования и задачи.

### **Тема 1.4. Экспериментальные методы зондовой микроскопии и спектроскопия.**

Экспериментальные установки ИОФ РАН (ознакомительная лекция с экскурсией в отдел «Технологии и измерения атомного масштаба» ЦЕНИ ИОФ РАН). Демонстрация получения атомного разрешения поверхности графита методом СТМ в условиях сверхвысокого вакуума.

## **Раздел 2. Экспериментальные методы физики низких температур и криогеника.**

### **Тема 2.1. Основы термодинамики.**

Основные термодинамические величины. Идеальный газ. Различные процессы (изотермический, изохорный, изобарический, адиабатический). Первое начало термодинамики. Внутренняя энергия. Работа газа. Энтропия. Эквивалентность плоскостей P-V и T-S. Термодинамические потенциалы и их дифференциалы. Цикл Карно.

### **Тема 2.2. Криогеника и низкие температуры.**

Абсолютная шкала температур в термодинамике. Основные этапы «продвижения» к абсолютному нулю температур. Низкие температуры и квантовые эффекты (сверхпроводимость, сверхтекучесть).

### **Тема 2.3. Криогенные жидкости.**

Криогенные жидкости: жидкие азот, водород, гелий и их основные свойства. Фазовая диаграмма  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ . Методы ожижения газов. Эффект Джоуля-Томсона (дросселирование). Поршневой и турбинный детандеры. Схема ожижения гелия по методу Капицы. Сосуды для хранения криогенных жидкостей. Криостаты для физических исследований.

### **Тема 2.4. Методы получения сверхнизких температур.**

Сверхнизкие температуры. Рефрижератор  $^3\text{He}$ . Адиабатическое размагничивание. Принцип работы рефрижератора растворения. Методы охлаждения до температур субмикрокельвинного диапазона.

### **Тема 2.5. Термометрия и вакуумная техника.**



Вакуум в криогенных установках. Методы измерения температуры. Основные виды термометров: газовый, резистивный, полупроводниковый, термопарный, магнитный, ядерный ориентационный.

### **Раздел 3. Экспериментальные методы физики сильных магнитных полей**

#### **Тема 3.1. Сильные магнитные поля.**

Шкала и единицы измерения магнитного поля и намагниченности. Источники стационарного магнитного поля. Резистивные магниты. Биттеровские магниты. Сверхпроводящие магнитные системы. Гибридные магниты. Системы Cryo-free. Импульсные магнитные поля. Методы получения магнитного поля мегагауссного диапазона.

#### **Тема 3.2. Магнитные поля в физическом эксперименте.**

Методы измерения физических величин. Применение магнитных полей в физическом эксперименте. Магнитные измерения. Электрические измерения. Магнитосопротивление. Эффект Холла. Циклотронный резонанс.

Квантовые осцилляционные эффекты (эффект де Гааза - ван Альфвена, эффект Шубникова - де Гааза). Квантовый эффект Холла.

#### **Тема 3.3. Магнитный резонанс.**

Магнитный резонанс. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.

#### **Тема 3.4. Экспериментальные методы физики низких температур и сильных магнитных полей.**

Экспериментальные установки ИОФ РАН (ознакомительная лекция с экскурсией в отдел низких температур и криогенной техники ИОФ РАН).

### **Раздел 4. Экспериментальные методы диагностики лазерной плазмы**

#### **Тема 4.1. Основные понятия: объекты и методы исследования лазерной плазмы.**

Плазма – что это такое? Лазерная плазма. Методы визуализации плазмы – формирование теневых изображений микроплазменных образований с микронным пространственным и субпикосекундным временным разрешением. Мгновенные изображения быстро протекающих процессов – сверхскоростная “киносъемка”. Изображение малоразмерных объектов («микроплазмы») - пространственное разрешение оптики. Почему мы видим прозрачную плазму?

#### **Тема 4.2. Лазерная интерферометрия.**

Плоская ЭМ-волна. Формирование интерференционной картины – «мгновенные» и статические изображения. “Искривление” фронта волны при ее прохождении сквозь прозрачный объект. Сдвиг фазы волны прошедшей сквозь вещество и коэффициент преломления вещества. Смещение фронта волны и сдвиг полос интерферограмм. Экспериментальная установка для измерения показателя преломления лазерной плазмы. Восстановление сдвига фаз из интерферограмм: обработка интерферограмм по анализу формы интерференционных полос. Интерференционные изображения осесимметричных объектов и определение их показателя преломления. Преобразование Абеля.

Восстановление сдвига фаз из интерферограмм: Фурье анализ. Показатель преломления и электронная плотность плазмы – модель Друде. Примеры распределения показателя преломления плазмы. Теоретическое моделирование процессов формирования фс-плазмы: фотоионизация; лазерный нагрев электронов; ударная ионизация.

### **Тема 4.3. Спектроскопия лазерной плазмы: спектральные приборы - призма, дифракционная решетка. Сверхскоростная электронно-оптическая спектроскопия плазмы.**

Принципиальная схема спектрального прибора. Основные характеристики спектрального прибора: угловая и линейная дисперсии, разрешающая способность, область дисперсии. Критерий Рэлея для спектрального разрешения. Призмные спектральные приборы и их характеристики. Спектральные приборы на основе дифракционных решеток и их характеристики.

Исследование эмиссионных свойств лазерной плазмы. Сверхскоростная спектрально-временная диагностика лазерной плазмы. Принцип работы электронно-оптических камер - ЭОК. Электронно-оптическая спектроскопия фемтосекундной лазерной плазмы. Временная структура спектров лазерной плазмы. Временная эволюция интенсивности спектральных линий фемтосекундной лазерной плазмы в воздухе, азоте, аргоне и гелии. Быстрые и медленные радиационные процессы.

## **Раздел 5. Методы генерации и регистрации ультракоротких лазерных импульсов**

### **Тема 5.1. Введение в физику ультракоротких лазерных импульсов (УКИ).**

Основные понятия. Принцип лазерной генерации. Лазерные импульсы и их свойства. Гауссовы импульсы. Моды резонатора и их синхронизация: принципы генерации ультракоротких лазерных импульсов (УКИ).

### **Тема 5.2. Методы синхронизация мод**

Методы синхронизация мод: а) активная (акустооптическая) синхронизация мод; б) пассивная синхронизация мод : i) свето-индуцированное просветление оптических сред; ii) синхронизация мод методом керровской линзы. Активные среды лазеров УКИ. Распространение УКИ в оптических средах: chirпированные импульсы.

### **Тема 5.3. Спектрально-временная компрессия и принципы усиления УКИ.**

Спектрально-временная компрессия УКИ в призмах и в дифракционных решетках. Лазерная стойкость оптических материалов. Принципы усиления УКИ.

### **Тема 5.4. Измерение длительности УКИ и их применения.**

Измерение длительности УКИ линейными и нелинейно-оптическими методами. Применения УКИ: лазерная обработка материалов.

## **7. Примерная тематика:**

### **7.1. Курсовых работ**

Не предусмотрено учебным планом

### **7.2. Научно-исследовательских работ и проектов**

Не предусмотрено учебным планом

### **7.3. Рефератов**

Не предусмотрено учебным планом

## **8. Ресурсное обеспечение.**

### **8.1. Кадровый потенциал**

Аспирантура ИОФ РАН располагает кадровыми ресурсами, гарантирующими качество подготовки аспиранта по специальностям 1.3.3. Теоретическая физика, 1.3.4. Радиофизика, 1.3.5. Физическая электроника, 1.3.7. Акустика, 1.3.8. Физика конденсированного состояния, 1.3.9. Физика плазмы, 1.3.11. Физика полупроводников, 1.3.19. Лазерная физика, 2.2.3 Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники. в соответствии с ФГТ.

## **8.2. Материально-техническое оснащение.**

Для проведения занятий по дисциплине «Методы физического эксперимента», предусмотренной учебным планом подготовки аспирантов, имеется необходимая материально-техническая база, соответствующая действующим санитарным и противопожарным правилам и нормам, обеспечивающая проведение всех видов теоретической и практической подготовки:

- аудитории для лекционных и семинарских занятий, оснащенные презентационным оборудованием (ноутбук, проектор, экран) и маркерными досками;
- оборудование для проведения лекционных и семинарских занятий в дистанционном формате (в случае необходимости);
- лицензионное программное обеспечение для демонстрации презентаций в формате PowerPoint, OpenOffice или Portable Document Format.
- учебная литература и методические материалы для проведения самостоятельной работы по дисциплине.

## **8.3. Образовательные технологии**

При реализации различных видов учебной работы (лекции, семинары, самостоятельная работа) используются следующие современные образовательные технологии:

- лекционная система обучения;
- информационно-коммуникационные технологии;
- исследовательские методы в обучении.

Программа дисциплины «Методы физического эксперимента» предусматривает широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий в сочетании с внеаудиторной самостоятельной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков у обучающихся. Эффективность применения интерактивных форм обучения обеспечивается реализацией следующих условий:

- создание диалогического пространства в организации учебного процесса;
- использование принципов социально-психологического обучения в учебной и научной деятельности;
- применение интерактивных форм обучения, направленных на развитие внутренней активности аспиранта, стимулирование мотивации и интереса в области углубленного изучения лазерной физики, физики конденсированного состояния, физики плазмы и физики поверхности в общеобразовательном и профессиональном плане; повышение уровня активности и самостоятельности научно-исследовательской работы; развитие навыков анализа, критичности мышления, научной коммуникации.

Образовательные технологии предполагают проведение занятий в форме лекций с объяснением теоретического материала и самостоятельную работу. Самостоятельная работа аспирантов проводится в форме изучения отдельных теоретических вопросов по предлагаемой литературе и самостоятельного решения задач с дальнейшим их разбором или обсуждением на аудиторных занятиях.

На занятиях может использоваться промежуточный контроль в виде решения задач по лекционному материалу.

## **9. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **9.1. Основная литература**

#### **9.1.1. Электронные учебные издания (учебники, учебные пособия).**

1. Беспалов В. Г., Козлов С. А., Крылов В. Н., Путилин С. Э. Фемтосекундная оптика и фемтотехнологии // Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2010, 234 с.  
<http://window.edu.ru/resource/762/72762/files/itmo512.pdf>,  
[http://books.ifmo.ru/book/624/femtosekundnaya\\_optika\\_i\\_femtotehnologii.htm](http://books.ifmo.ru/book/624/femtosekundnaya_optika_i_femtotehnologii.htm)

### **9.1.2. Электронные базы данных, к которым обеспечен доступ.**

- Интернет-ресурсы научно-технической библиотеки ИОФ РАН  
<https://www.gpi.ru/about/library/education/>  
- [https://www.rp-photonics.com/laser\\_physics.html](https://www.rp-photonics.com/laser_physics.html) - энциклопедия по лазерам  
- Научная электронная библиотека eLibrary.ru;  
- Электронные базы Web of Science и SCOPUS;  
- Журналы по физике конденсированного состояния и наноматериалам (Физика твердого тела, ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ, Успехи физических наук, Nanoletters, Physica Status Solidi b, Physical Review B и др.);  
- Научные и научно-технические журналы издательств American Physical Society, American Institute of Physics, Institute of Physics, Nature, Springer Verlag, база данных Web of Science.

### **9.1.3. Учебники**

1. Брандт Н.Б., Кульбачинский В.А., Квазичастицы в физике конденсированного состояния. М.: Физматлит, 2007 г., 632 с.
2. Абрикосов А.А. Основы теории металлов. М.: Физматлит, 2009 г., 600 с.
3. К.Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М.Катаяма. Введение в физику поверхности, М.: Наука, 2006, 490 с.
4. Harald Ibach. Physics of Surfaces and Interfaces (Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006) P. 660.
5. Щука А.А. Нанoeлектроника, М.: Физматкнига, 2007 г., 464 с.
6. P.A. Redhead, EXTREME HIGH VACUUM. PROCEEDINGS Book Series: CERN REPORTS V 99 P. 213-226 (1999).
7. Смородинский Я.А. Температура. М.: Терра 2008 г. 224 с.
8. Чен Ф. Введение в физику плазмы // М.: МИР, 1987, 398 с.
9. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы // 3-е изд. «Интеллект», 2008, 280 с.
10. Малышев В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию // М.: Наука, 1979, 480 с.
11. Горелик Г.С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику, 3-е изд. — Ред. С.М. Рытов. — М.: Физматлит, 2007. 656 с.4.
12. Херман И., Вильгельми Б. Лазеры сверхкоротких световых импульсов // М.: МИР, 1986, 368 с.
13. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов // М.: Наука, 1988, 312 с.
14. Крюков П.Г. Лазеры ультракоротких импульсов и их применения // М.: Интеллект, 2012, 248 с.
15. Вовченко Е.Д., Кузнецов А.П., Савёлов А.С. Лазерные методы диагностики плазмы // М.: МИФИ, 2008, 202 с.

### **9.1.4. Учебные пособия**

1. Александров А. Ф., Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А. Основы электродинамики плазмы: учебник для физических специальностей университетов. — 2-е изд., перераб. и доп. // М.: Высшая школа, 1988, 424 с.
2. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии Учебное пособие по курсу прикладной спектроскопии для студентов университетов и других высших учебных заведений. // М.: Наука, 1972, 375 с.

### **9.2. Дополнительная литература**

1. Surface and Interface Science. Volume 1: Concepts and Methods (WILEY-VCH, 2012, Weinheim, Germany), p.488, K. Wandelt (Ed.).
2. Physics and Engineering of New Materials. Springer Proceedings in Physics 127 (Springer, 2009), 387 pages, Eds. Do Tran Cat, A. Pucci, K. Wandelt.

3. Лоунасмаа О.В.. Принципы и методы получения температур ниже 1К. М: Мир, 1977 г., 356 с.
4. Методы получения и измерения низких и сверхнизких температур. Справочник под ред. Б.И. Веркина. Киев: Наукова думка, 1987 г.,
5. Херлах Ф. (под ред.) Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применения, М, Мир, 1988.
6. Звелто О. Принципы лазеров // М.: МИР, 1990, 559 с.
8. Ким А.В, Рябикин М.Ю., Сергеев А.М. От фемтосекундных к аттосекундным импульсам. – Успехи физических наук, 1999, Т.169, №1, С.85-103.
9. Желтиков А.М. Сверхкороткие импульсы и методы нелинейной оптики. – М.: Физматлит, 2006, 296 с.
10. . Методы исследования плазмы. Спектроскопия, лазеры, зонды // Под ред. В. Лохте-Хольтгрена – М.: МИР, 1971, 552 с.

### **9.3 Лабораторные установки:**

1. Установка для исследования гальваномагнитных свойств металлов и полупроводников в температурном интервале 2-300 К (отдел низких температур и криогенной техники ИОФ РАН). Включает в себя магнитную систему холодного поля (сверхпроводящий магнит на 8 Тл с критическим током 65 А).
2. Сверхвысоковакуумная аналитико-технологическая установка в составе: сверхвысоковакуумный сканирующий туннельный микроскоп GPI 300, ионные источники, дифрактометр медленных электронов, масс-спектрометр, электронный оже-спектрометр, газовые источники, система транспорта образцов и зондов, температурные датчики для измерения температуры в диапазоне 90-1200 К (ОТИАМ ЦЕНИ ИОФРАН).

**10. Аттестация по дисциплине.** Форма промежуточной аттестации по итогам обучения в 1 и 2 семестрах – зачет, процедура аттестации в 1 семестре включает доклад по выбранной методике физического эксперимента и ответ на вопросы, в 5 семестре – ответ на вопросы.

### **11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

#### **11.1 Оценочные средства текущего контроля успеваемости и сформированности компетенций**

Для текущего контроля успеваемости применяется комплекс методик и диагностического инструментария: устный опрос, учет посещаемости занятий и активности аспирантов в ходе занятий.

#### **11.2 Примерный перечень вопросов к зачету по дисциплине**

1. Методы создания сверхвысокого и экстремально высокого вакуума (СВВ/ЭВВ).  
Материалы и конструктив.
2. Физические способы измерения СВВ/ЭВВ.
3. Базовые принципы масс-спектрометрии. Типы приборов. Поиски течей.
4. Электронный спектр твердого тела при возбуждении электронами и электромагнитным излучением.
5. Фотоэлектронная спектроскопия. Электронная оже-спектроскопия.
6. EXAFS - методы. Фотоэлектронная и электронная дифракция.
7. Электронные микроскопы.
8. . Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия упругого туннелирования электронов.
9. Спектроскопия неупругого туннелирования электронов.
10. Атомно-силовая микроскопия, включая режим притяжения с частотной модуляцией.

11. В чем преимущества фазовой модуляции по сравнению с амплитудной? В чем ее недостатки?
12. Криогенные жидкости: жидкие азот, водород, гелий и их основные свойства.
13. Методы ожижения газов. Эффект Джоуля-Томсона (дросселирование).
14. Поршневой и турбинный детандеры.
15. Схема ожижения гелия по методу Капицы.
16. Сосуды для хранения криогенных жидкостей. Криостаты для физических исследований.
17. Адиабатическое размагничивание.
18. Фазовая диаграмма  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ . Принцип работы рефрижератора растворения.
19. Методы охлаждения до температур субмикрокельвинного диапазона.
20. Шкала и единицы измерения магнитного поля и намагниченности. Источники стационарного магнитного поля.
21. Сверхпроводящие магниты.
22. Импульсные магнитные поля.
23. Методы получения магнитного поля мегагауссного диапазона.
24. Применение магнитных полей в физическом эксперименте.
25. Эффект Холла.
26. Циклотронный резонанс.
27. Квантовые осцилляционные эффекты.
28. Квантовый эффект Холла.
29. Магнитный резонанс.
30. Электронный парамагнитный резонанс.
31. Ядерный магнитный резонанс.
32. Принцип генерации лазерного излучения ультракоротких импульсов.
33. Активная синхронизация мод.
34. Пассивная синхронизация мод.
35. Гетероструктуры (SESAM), нанотрубки, графен как эффективные синхронизаторы мод.
36. Активные среды различных типов лазеров УКИ.
37. Фемтосекундный лазер на титан-сапфире с керровской линзой.
38. Длительность, спектр и УКИ.
39. Пространственно-временная когерентность УКИ.
40. Автокорреляционные методы измерения УКИ.
41. Чирпирование фемтосекундных импульсов.
42. Спектрально-временные методы измерения УКИ: FROG и SPIDER.
43. Методы измерения УКИ с помощью электронно-оптических камер.
44. Измерение длительности фемтосекундных лазерных импульсов интерферометрическим методом.
45. Пространственная и временная диагностика остросфокусированного лазерного излучения сверхкороткой длительности.
46. Чирпирование фемтосекундных импульсов.
47. Методы усиления УКИ. Тераваттные системы генерации импульсов.
48. Стандарты времени на основе фемтосекундных лазеров.
49. Лазерная прочность оптических материалов.
50. Промышленное использование пикосекундных и фемтосекундных лазеров. Прецизионная обработка материалов.
51. Фемтосекундные лазеры в биологии и медицине.
52. Методы экспериментальных исследований лазерного плазмообразования: возникновения, развития и релаксации плазмы, в различных, в том числе, газообразных, средах при воздействии на них интенсивных лазерных импульсов.

53. Методы визуализации плазмы – формирование теневых и интерференционных изображений плазменных образований.
54. Регистрация «мгновенных» теневых и интерференционных (фазовых) изображений микрообъемов ионизованного вещества, с помощью задержанных по времени зондирующих лазерных импульсов подсветки.
55. Восстановление пространственного распределения показателя преломления и концентрации плазмы (электронной плотности) по изгибу интерференционных полос.
56. Обратное преобразование Абеля.
57. Изображение малоразмерных плазменных объектов («микроплазмы») - пространственное разрешение оптики.
58. Почему показатель преломления плазмы меньше единицы? Электронная плотность плазмы. Модель Друде.
59. Фурье-анализ и обработка интерферограмм.
60. Явление постиионизации лазерной плазмы: фотоионизация, лазерный нагрев электронов, ударная ионизация.
61. Принцип работы электронно-оптических камер.
62. Электронно-оптическая спектроскопия фемтосекундной лазерной плазмы: временная структура спектров лазерной плазмы.
63. Спектроскопия лазерной плазмы: спектральные приборы - призма, дифракционная решетка, интерферометр.
64. Принципиальная схема и основные характеристики спектрального прибора: угловая и линейная дисперсии, разрешающая способность, область дисперсии.

### **11.3 Примерный перечень задач к зачету по дисциплине**

Не предусмотрено учебным планом

### **12. Методические рекомендации аспирантам по освоению дисциплины**

Аспиранты должны быть заранее ознакомлены с графиком учебного процесса, содержанием дисциплины и методикой проведения занятий. Посещаемость учебных занятий является обязательной для обучающихся, как и ведение конспектов, записей. Отработка пропущенных занятий предполагает самостоятельную работу аспиранта с учебной литературой и осуществляется в форме собеседования по теме пропущенного занятия.

### **13. Методические рекомендации преподавателям по организации обучения по дисциплине**

#### **13.1 Порядок проведения лекции**

*Вводная часть* включает формулировку темы лекции с краткой аннотацией предлагаемых для изучения вопросов, характеристику места и значения данной темы в курсе.

*Основная часть* лекции имеет своей целью раскрытие содержания основных вопросов и определяется логической структурой плана лекции.

В *заключительной части* лектор проводит обобщение наиболее важных и существенных вопросов, делает выводы, отвечает на вопросы слушателей, формулирует задачи для самостоятельной работы аспирантов и рекомендует соответствующую литературу.

#### **13.2 Порядок проведения семинара**

Не предусмотрено учебным планом

#### **13.3 Организация самостоятельной работы аспирантов**

Основными формами самостоятельной работы и контроля аспирантов являются:

Выполнение индивидуальных заданий (как репродуктивного, так и творческого характера), позволяющих диагностировать уровень сформированности у аспирантов знаний, умений и навыков по дисциплине.

Собеседование – форма учебной деятельности, специальная беседа преподавателя с аспирантом, рассчитанная на выяснение объема знаний аспиранта по определенному разделу, теме, проблеме и т.п., позволяющая оценить их умение аргументировать собственную точку зрения, предполагающее всестороннее обсуждение какого-либо вопроса, проблемы или сопоставлении информации, идей, мнений, предложений.

#### **14. Описание критериев оценивания знаний обучаемых, шкал их оценивания**

##### **14.1. Критерии оценивания знаний обучаемых на зачете по дисциплине:**

Оценка «Зачтено»: Обучающийся обнаружил знание основного учебно-программного материала в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по специальности, справился с выполнением заданий, предусмотренных программой дисциплины.

Оценка «Не зачтено»: Обучающийся обнаружил значительные пробелы в знаниях основного учебно-программного материала, допустил принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий и не способен продолжить обучение или приступить по окончании аспирантуры к профессиональной деятельности без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

Программу разработали:

Гарнов С.В., чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Глушков В.В., д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Демишев С.В., д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Ельцов К.Н., д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
(подпись)