**Минобрнауки России**

**Институт физики микроструктур РАН**

**- филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения**

**«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики**

**им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»**

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФМ РАН

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.В.Новиков

" " \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2023 г.

Рабочая программа дисциплины

**Экспериментальные методы физики твердого тела**

УРОВЕНЬ ОБРАЗОВАНИЯ

|  |
| --- |
| ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ – ПОДГОТОВКА КАДРОВ ВЫСШЕЙ КВАЛИФИКАЦИИ |

НАУЧНАЯ СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

1.3.8. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ФОРМА ОБУЧЕНИЯ

ОЧНАЯ

Нижний Новгород

2023

1. Место и цели дисциплины в структуре ООП аспирантуры

Дисциплина «Экспериментальные методы физики твердого тела» является обязательной дисциплиной программы 1.3.8. «Физика конденсированного состояния».

Для успешного усвоения курса аспиранту необходимо знание общих курсов физики и математики, ряда разделов теоретической физики (электродинамика, статистическая физика), физики твердого тела, твердотельной электроники. Данный курс является базой для выполнения аспирантами экспериментальных исследований в области твердотельных наноструктур.

Дисциплина изучается на 2 курсе, (4 семестр).

**Целями освоения дисциплины являются:**

* формирование у аспирантов представления о современных экспериментальных методиках, широко используемых исследователями в различных разделах физики твердого тела;
* формирование у аспирантов в ходе лекционных и практических занятий умения выбирать адекватный экспериментальный метод, соответствующий поставленной задаче физики твердого тела;

2. **Планируемые результаты обучения по дисциплине**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен самостоятельно проводить научные исследования в области физики конденсированного состояния и применять полученные результаты для решения практических задач.

Аспирант, освоивший дисциплину «Экспериментальные методы физики твердого тела», должен:

Знать основные методы обработки данных, полученных экспериментально или методами численного моделирования в области физики конденсированного состояния

Уметь использовать современные методы обработки экспериментальных данных и/или методы численного моделирования сложных физических процессов в области физики конденсированного состояния.

Владеть разработкой методов научного исследования для получения новых фундаментальных знаний в области физики конденсированного состояния и способами применения этих знаний для создания прикладных технологий и решения практических задач.

3. **Структура и содержание дисциплины**

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, всего 114 часов, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (2 часа мероприятия промежуточной аттестации), 76 часов составляет самостоятельная работа обучающегося

|  |  |
| --- | --- |
| Вид учебной работы | Всего часов |
| Общая трудоемкость дисциплины | 114 |
| Контактная работа обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) (всего) | 36 |
| Аудиторная работа (всего): | 36 |
| в том числе: |  |
| Лекции | 36 |
| Практические занятия |  |
| Самостоятельная работа обучающихся (всего) | 76 |
| Промежуточная аттестация | 2 |
| **Вид итогового контроля** | **зачет** |

3.2. Разделы дисциплины и трудоемкость по видам учебных занятий (в академических часах)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Раздел дисциплины | Всего | Контактная работа | | Самостоятельная работа |
| Лекционные занятия | Практические занятия |
| 1 | Получение низких температур | 14 | 4 |  | 10 |
| 2 | Техника низкотемпературного эксперимента | 16 | 6 |  | 10 |
| 3 | Низкотемпературная термометрия | 16 | 6 |  | 10 |
| 4 | Получение сильных магнитных полей | 14 | 4 |  | 10 |
| 5 | Конструкции гелиевых криостатов | 14 | 4 |  | 10 |
| 6 | Шумы в измерительных устройствах | 14 | 4 |  | 10 |
| 7 | Использование импульсной техники в физических измерениях | 12 | 4 |  | 8 |
| 8 | Приемники электромагнитного излучения | 12 | 4 |  | 8 |
|  | Дисциплина в целом | 114 | 36 |  | 76 |

3.3 Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Наименование раздела дисциплины | Содержание |
| 1 | Получение низких температур | Методы получения низких температур. Холодильные циклы и конструкции азотных и гелиевых ожижителей. Получение температур ниже 1К (использование He3, метод адиабатического размагничивания). Устройство и принцип работы криостатов замкнутого цикла. |
| 2 | Техника низкотемпературного эксперимента | Свойства жидкого He4 и его использование в низкотемпературном эксперименте. Техника низкотемпературного эксперимента, устройство и принципы работы криостатов. |
| 3 | Низкотемпературная термометрия | Методы низкотемпературной термометрии. Первичные и вторичные термометры. Международные и национальные температурные шкалы. Металлические и полупроводниковые термометры сопротивления. Термопары. |
| 4 | Получение сильных магнитных полей | Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. Расчет магнитного поля на оси соленоида. Использование сверхпроводников для получения сильных магнитных полей. Импульсные магнитные поля. |
| 5 | Конструкции гелиевых криостатов | Основные принципы конструирования гелиевых криостатов. Тепловые экраны. Оптимизация токовводов для сверхпроводящих соленоидов. |
| 6 | Шумы в измерительных устройствах | Естественные пределы измерений. Шумы в измерительных устройствах. Фазочувствительное (синхронное) детектирование. Улучшение отношения сигнал/шум при синхронном детектировании. Использование фильтров низкой и высокой частоты. Аналоговые и цифровые синхродетекторы. |
| 7 | Использование импульсной техники в физических измерениях | Использование импульсной техники в физических измерениях. Стробоскопический анализ сигналов. Использование цифровых осциллографов для анализа импульсных сигналов. |
| 8 | Приемники электромагнитного излучения | Приемники электромагнитного излучения и их основные характеристики. Тепловые и фотоэлектрические приемники. Ограничение обнаружительной способности флуктуациями фонового излучения. |

Текущий контроль успеваемости осуществляется в рамках занятий практического и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций. Итоговый контроль осуществляется на зачете, в ходе которого оцениваются уровень теоретических знаний и навыки решения практических задач.

4. Образовательные технологии

При изучении дисциплины используются современные образовательные технологии. Предусматривается использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (разбор конкретных ситуаций, тренинги по решению практических задач) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) по дисциплине проходит в форме лекций и практических занятий, а также в виде коллективных и индивидуальных консультаций. На занятиях лекционного типа используются мультимедийные средства поддержки образовательного процесса, часть занятий проводятся в виде лекций с проблемным изложением материала. На занятиях практического типа разбираются решения задач различной степени сложности, проводятся обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в данной области. Аспиранты работают как индивидуально, так и коллективно.

Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних заданий, подготовку семинаров, а также теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы. Кроме того, аспиранты имеют возможность принимать участие в семинарах с представителями российских и зарубежных научных организаций, мастер-классах экспертов и специалистов в области современных экспериментальных задач физики твердого тела.

5. Фонд оценочных средств по дисциплине

5.1 Типовые контрольные задания или иные материалы

1. Методы получения низких температур. Техника низкотемпературного эксперимента, устройство и принципы работы криостатов.
2. Свойства жидкого He4 и его использование в низкотемпературном эксперименте.
3. Получение температур ниже 1К. Наблюдение квантового эффекта Холла.
4. Устройство и принцип работы криостатов замкнутого цикла.
5. Методы низкотемпературной термометрии. Первичные и вторичные термометры. Международные и национальные температурные шкалы. Металлические и полупроводниковые термометры сопротивления. Термопары.
6. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. Расчет магнитного поля на оси соленоида.
7. Использование сверхпроводников для получения сильных магнитных полей. Импульсные магнитные поля.
8. Основные принципы конструирования гелиевых криостатов. Тепловые экраны. Оптимизация токовводов для сверхпроводящих соленоидов.
9. Естественные пределы измерений. Шумы в измерительных устройствах.
10. Фазочувствительное (синхронное) детектирование. Улучшение отношения сигнал/шум при синхронном детектировании.
11. Аналоговые и цифровые синхродетекторы. Использование фильтров низкой и высокой частоты.
12. Использование импульсной техники в физических измерениях. Стробоскопический анализ сигналов. Использование цифровых осциллографов для анализа импульсных сигналов.
13. Приемники электромагнитного излучения и их основные характеристики. Ограничение обнаружительной способности флуктуациями фонового излучения.
14. Микроволновая спектроскопия. Опыты по циклотронному резонансу.

5.2. Описание шкал оценивания

Итоговый контроль качества усвоения аспирантами содержания дисциплины проводится в виде зачета, на котором определяется:

* уровень усвоения основного учебного материала по дисциплине;
* уровень понимания изученного материала;
* способности использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Зачет проводится в устной форме. Устная часть заключается в ответе аспирантом на теоретические вопроса курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые аспирант должен дать краткий ответ. Практическая часть предусматривает решение двух задач по различным разделам курса.

|  |  |
| --- | --- |
| **Оценка** | **Уровень подготовки** |
| Превосходно | Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом. Аспирант дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит исчерпывающие, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение уверенно применять на практике приобретенные навыки, владение в полной мере методиками решения задач.  100 %-ное выполнение контрольных экзаменационных заданий |
| Отлично | Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Аспирант дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит почти полные, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение методиками решения задач.  Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше |
| Очень хорошо | Хорошая подготовка. Аспирант дает ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями; неполно отвечает на дополнительные вопросы; приводит достаточно аргументированные и почти полные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами; или исчерпывающее решение приводится только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена с за­метными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.  Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 80 до 90%. |
| Хорошо | В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Аспирант дает полный ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит почти полные решения всех сформулированных в билете задач с некоторыми недочетами; или исчерпывающее решение приведено только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена со значительными погрешностями. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей и не всегда полной обоснованностью выводов, демонстрирующих, в целом, знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.  Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 80%. |
| Удовлетворительно | Минимально достаточный уровень подготовки. Аспирант показывает минимальный уровень теоретических знаний, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит неполные, слабо аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы не отличаются стройной ло­гической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, что говорит о не достаточно полном понимании общефизических и профессиональных дисциплин, умении применять на практике лишь некоторые приобретенные навыки, владении не всеми изученными методиками решения задач.  Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%. |
| Неудовлетворительно | Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Аспирант дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора; приводит решения сформулированных в билете задач с грубыми недочетами, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки, не владение методиками решения задач.  Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%. |
| Плохо | Подготовка абсолютно недостаточная. Аспирант не отвечает на поставленные вопросы, демонстрирует полное непонимание сформулированных в билете задач.  Выполнение контрольных экзаменационных заданий менее 20 %. |

7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

а) основная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., курс "Теоретическая физика", Том V. «Статистическая физика. Часть 1». М.: Наука. 1976.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., курс "Теоретическая физика", Том VIII. «Электродинамика сплошных сред». М.: Наука. 1982.
3. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г., «Физика полупроводников». М.: Наука 1977.
4. Review of Scientific Instruments (https://aip.scitation.org/journal/rsi)

б) дополнительная литература:

1. Ансельм А.И., «Введение в теорию полупроводников». М.: Наука 1978.
2. Ю П., Кардона М., «Основы физики полупроводников». М. Физматлит 2002.
3. Успехи физических наук (https://ufn.ru/ru/)
4. Зеегер К., «Физика полупроводников», М.: Мир 1977.
5. Reviews of Modern Physics (RMP) (https://journals.aps.org/rmp/)
6. Информационный портал о температурных датчиках (<http://temperatures.ru>)
7. Physical Review B (PRB) (https://journals.aps.org/prb/)
8. [Superconductor Science and Technology](http://iopscience.iop.org/journal/0953-2048) (http://iopscience.iop.org/journal/0953-2048)
9. Semiconductor Science and Technology (http://iopscience.iop.org/journal/0268-1242)
10. Физика и техника полупроводников (http://journals.ioffe.ru/journals/2)

в) факультативная литература

1. Д. Монтгомери, «Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов». М.: Мир, 1971.
2. Ж. Макс, «Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях». М.: Мир, 1983.
3. С.М. Зи, «Физика полупроводниковых приборов» (в 2 кн). М.: Мир , 1984.
4. П. Ю, М. Кардона, «Основы физики полупроводников». М.: Физматлит, 2002.
5. О.В. Лоунасмаа, «Принципы и методы получения температур ниже 1К». М.: Мир, 1977.
6. М.Н. Уилсон, Сверхпроводящие магниты. М.: Мир, 1985.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Использование программного обеспечения:

1. Microsoft Office Word.
2. Microsoft Office Excel.
3. Microsoft Office Power Point.
4. Программа «Origin 8.0» (Microcalc corp.) демо-версия.

9. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Для проведения лекций и практических занятий требуется типовое оборудование лекционной аудитории.

Для подготовки самостоятельных контрольных работ и для их графического представления (если это необходимо), а также для расширения коммуникационных возможностей аспиранты имеют возможность работать за компьютером с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

Составитель:

Гавриленко В.И., проф., д.ф.-м.н., зав. отделом физики полупроводников ИФМ РАН.