


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов

  
«13» / 04

2022 г.



Рабочая программа факультативной дисциплины  
**МАГНЕТИЗМ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД**  
программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре  
по научной специальности 1.3.3 Теоретическая физика

Принята решением Ученого совета  
от 04.03.2022 № 03/22

Санкт-Петербург

2022 г.



Рабочая программа факультативной дисциплины «Магнетизм конденсированных сред» составлена на основании программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.3 Теоретическая физика (далее – программа аспирантуры)

### **1. Цель освоения дисциплины**

Целью курса является:

- получение знаний по физике магнитных явлений в конденсированных средах, а также о перспективных магнитных материалах и их применениях в технике.
- создание у аспирантов представлений о природе взаимодействий, ответственных за магнитное упорядочение, магнитную анизотропию, статические и динамические магнитные свойства кристаллов.
- формирование представлений об особенностях магнитных свойств пленочных материалов, обменно-связанных структур, магнитных, оптических и магнитооптических свойств поверхности и интерфейса.
- ознакомление аспирантов с последними достижениями физики сверхбыстрого магнетизма.

### **2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ**

2.1. Дисциплина «Магнетизм конденсированных сред» входит в факультативную часть образовательного компонента программы аспирантуры с целью расширения и углубления научных и прикладных знаний аспирантов и организуется по выбору и желанию аспиранта.

2.2. Актуальность изучения дисциплины определяется приоритетной ролью физики магнетизма в современной науке и технике, в частности, для создания устройств хранения, обработки, записи и считывания информации, а также возможностью применений комплекса знаний и умений, приобретаемых в ходе изучения курса, для практических целей. Изучение дисциплины является основой для самостоятельной научно-исследовательской работы в области физики магнитных явлений твердых тел.

### **3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

По окончании изучения дисциплины аспиранты должны будут

**знать:**

- основные магнитные и магнитооптические явления и эффекты, проявляющиеся в объемных магнетиках и магнитных наноструктурах;
- основные микроскопические взаимодействия, ответственные за магнитные и магнитооптические явления;

- основные свойства конкретных магнитных материалов, применяемых в технике (ферриты-шпинели, ферриты-гранаты, ортоферриты, кобальт, железо, никель, инвары);
- основные применения магнитных материалов (запись и обработка информации, устройства СВЧ диапазона).

**уметь:**

- самостоятельно изучать и понимать научную литературу, связанную с проблемами физики магнетизма;
- описывать поведение магнитных и магнитооптических явлений конденсированных тел при изменении температуры, электрического и магнитного поля на феноменологическом уровне;
- оперировать знаниями по фундаментальным разделам физики магнитных явлений, необходимыми для решения научно-исследовательских задач, научной терминологией, основными понятиями физики магнетизма в пределах, необходимых для понимания специальной научной литературы.

**владеть опытом:**

- самостоятельного изучения и анализа специальной научной и методической литературы, посвященной изучению магнитных и магнитооптических свойств твердых тел.

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

##### 4.1. Объем дисциплины и количество учебных часов:

Вид учебной работы	Трудоемкость (в часах)
Лекции	14
Самостоятельная работа аспиранта	94
ИТОГО	108
Вид итогового контроля	зачет

##### 4.1. Структура дисциплины

№ п/п	Тема	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу, и трудоемкость (в часах)			
		Лек	СЕМ	Лаб	СР
1.	Введение	3			4
2.	Типы магнитных структур	3			22
3.	Статические и динамические магнитные явления в кристаллах и пленочных структурах	4			34
4.	Магнитооптические явления в конденсированных средах	2			17
5.	Применения магнитных материалов	2			17
6.	Зачет				
	ИТОГО	14			94



### **3. Содержание разделов (тем) дисциплины**

#### **5.1. Содержание аудиторных занятий**

##### **Тема 1 – Введение.**

*(лекции - 3 часа)*

История развития учения о магнетизме. Магнитные моменты свободных атомов. Правило Хунда. Снятие орбитального вырождения кристаллическим полем. Высокоспиновые и низкоспиновые состояния. Замораживание орбитального момента. Влияние спин-орбитального взаимодействия. Теория молекулярного поля. Магнитный момент и магнитная восприимчивость диа-, пара-, ферро-, ферри- и антиферромагнетиков.

*(СР - 4 часа)*

##### **Тема 2 – Типы магнитных структур**

*(лекции – 3 часа)*

Магнитная симметрия. Ферриты со структурой шпинели, граната, ортоферриты, гексаферриты. Слабые ферромагнетики. Поле Дзялошинского. Магнетизм 3d-металлов. Аморфные магнетики и спиновые стекла. Однодоменные частицы. Суперпарамагнетизм.

*(СР - 2 2 часа)*

##### **Тема 3 – Статические и динамические магнитные явления в объемных средах и пленочных структурах.**

*(лекции - 4 часа)*

3.1. Обменное взаимодействие на примере молекулы водорода. Модель Гайзенберга. Косвенное обменное взаимодействие. Пленочные обменно-связанные структуры. Спин-орбитальное взаимодействие. Магнитная анизотропия, ее природа и феноменологическое описание. Индуцированные магнитным полем магнитные фазовые переходы в ферромагнетиках, антиферромагнетиках, обменно-связанных структурах. Изменение свойств магнетиков под действием электрического поля и давления.

3.2. Доменная структура. Причины образования доменов. Однодоменные частицы и суперпарамагнетизм. Методы наблюдения доменов. Структура доменных стенок Блоха и Нееля. Линии и точки Блоха. Скрученная доменная стенка. Цилиндрические домены (ЦМД). Стабильность полосовых и цилиндрических магнитных доменов.

3.3. Уравнение Ландау-Лифшица для движения намагниченности. Магнитные резонансы. Влияние диссипации энергии, размагничивающего поля и магнитной анизотропии. Ферри – и антиферромагнитный резонансы. Спиновые волны. Электродинамика плоских электромагнитных волн в ферромагнетике. Магнитостатические волны. Энергия неоднородного магнитного состояния. Магноны. Параметрическое возбуждение спиновых волн. Релаксационные процессы.

3.4. Сверхбыстрый магнетизм. Методика Pump-probe.

*(СР - 3 4 часа)*

#### **Тема 4– Магнитооптические явления в конденсированных средах.**

*(лекции - 2 часа)*

4.1 Классификация линейных магнитооптических явлений. Магнитооптические эффекты на прохождение: эффект Фарадея, магнитный круговой дихроизм, магнитное линейное двупреломление света, магнитный линейный дихроизм, магнитное преломление света, магнитоэлектрический эффект в оптическом диапазоне, магнитоиндуцированная пространственная дисперсия. Магнитооптические эффекты в отражении света.

4.2 Нелинейные магнитооптические явления. Генерация второй оптической гармоники в магнитоупорядченных кристаллах. Визуализация антиферромагнитных доменов. Магнитная вторая оптическая гармоника в отражении света. Нарушение операции инверсии на поверхности и интерфейсе.

*(СР - 17 часов)*

#### **Тема 5 –Применения магнитных материалов**

*(лекции - 2 часа)*

Магнитная запись и считывание. Жёсткий диск. Гигантское магнетосопротивление. Спин-волновые устройства СВЧ диапазона. Магнитооптические устройства. Инвары. Магнетокалорический эффект. Магнитное охлаждение.

*(СР -17 часов)*

#### **5.2. Самостоятельная работа аспиранта**

Самостоятельная работа аспиранта включает повторение лекционного материала по темам, чтение рекомендованной литературы и научной периодики, а также изучение методических рекомендаций для самостоятельной работы.

### **6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ**

#### **6.1. Текущий контроль**

Текущий контроль проводится еженедельно. Критерии формирования оценки – посещаемость занятий, активность студентов на лекциях, уровень подготовки.

Текущая самостоятельная работа аспиранта направлена на углубление и закрепление знаний, и развитие практических умений.

#### **6.2. Промежуточная аттестация**

Промежуточная аттестация проводится в форме зачета. Критерии формирования оценки – уровень знаний пройденной части курса.

#### **Контрольные вопросы для аттестации:**

№	Контрольные вопросы
1.	Магнитный момент свободного иона и иона в кристаллическом поле. Высокоспиновые и низкоспиновые состояния. Замораживание орбитального момента.
2.	Теория Явления молекулярного поля. Магнитный момент и магнитная



	восприимчивость диа-, пара-, ферро-, ферри- и антиферромагнетиков.
3.	Магнитная симметрия. Ферриты со структурой шпинели, граната, ортоферриты, гексаферриты.
4.	Слабые ферромагнетики. Поле Дзялошинского.
5.	Магнетизм 3d-металлов.
6.	Аморфные магнетики и спиновые стекла. Однодоменные частицы. Суперпарамагнетизм.
7.	Обменное взаимодействие на примере молекулы водорода. Модель Гайзенберга.
8.	Косвенное обменное взаимодействие.
9.	Пленочные обменно-связанные структуры.
10.	Спин-орбитальное взаимодействие. Магнитная анизотропия, ее природа и феноменологическое описание.
11.	Индукцированные магнитным полем магнитные фазовые переходы
12.	Причины образования доменов. Структура доменных стенок Блоха и Нееля. Линии и точки Блоха. Стабильность полосовых и цилиндрических магнитных доменов.
13.	Уравнение Ландау-Лифшица для движения намагниченности. Магнитные резонансы.
14.	Спиновые волны. Электродинамика плоских электромагнитных волн в ферромагнетике. Магнитостатические волны.
15.	Сверхбыстрый магнетизм. Методика Pump-probe
16.	Классификация линейных магнитооптических явлений. Магнитооптические явления в прохождении и отражении света
17.	Нелинейные магнитооптические явления. Генерация второй оптической гармоники в магнитоупорядченных кристаллах. Визуализация антиферромагнитных доменов.
18.	Магнитная запись и считывание. Жёсткий диск. Спин-волновые устройства СВЧ диапазона. Магнитооптические устройства.

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

### 7.1. Литература

#### Основная литература:

1. Боков В.А. Физика магнетиков: учебное пособие для вузов / В.А. Боков – Санкт-Петербург:- Невский диалект, 2002 г- 271 с.
2. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: Том VIII. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, под редакцией Л.П. Питаевского - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2001, - 651 с.
3. Кринчик Г.С., Физика магнитных явлений / Г.С. Кринчик Изд. МГУ, 1976 г. и 1985 г.
4. Калиникос Б.А. Спин-волновые устройства и эхо-процессоры / Б.А. Калиникос, А.Б. Устинов, С.А. Баруздин, Москва, Радиотехника, 2013 г.
5. Смоленский Г.А. Ферриты и их техническое применение”, / Г.А.Смоленский, В.В.Леманов. Наука, 1975 г.
6. Гинзбург С.Л., Необратимые явления в спиновых стеклах. Москва: Наука, 1989 – 152 с. (Соврем. Пробл. физики).

7. Гуревич А.Г. Магнитные колебания и волны/ А.Г.Гуревич и Г.А.Мелков, Наука, 1994 г.

#### ***Дополнительная литература***

1. Вонсовский С.В., Магнетизм, Наука, 1971 г.

3. А.Малоземов и Дж. Слонзуски, “Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами “, Наука, 1994 г.

4. К.П. Белов, А.К. Звездин, А.М. Кадомцева, Р.З. Левитин. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках. Наука, 1979 г.

5. А.К. Zvezdin, V.A. Kotov. Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials. Institute of Physics Publishing, Bristol, 1997.

#### **7.2 Интернет-ресурсы**

##### **Отечественные журналы:**

1. Физика твердого тела, электронная версия; доступ с 1992 по текущий год;
2. Физика и техника полупроводников, электронная версия; доступ с 1992 по текущий год;
3. ЖЭТФ; электронная версия; доступ с 2001 по текущий год;
4. Письма в ЖЭТФ электронная версия; доступ с 2008 по текущий год;
5. Успехи физических наук электронная версия; доступ с 1988 по текущий год.

##### **Иностранные журналы:**

1. Physical Review B (American Physical Society) электронная версия;
2. Physical Review Letters (American Physical Society) электронная версия;
4. Applied Physics A: Materials Science & Processing (Springer);
5. Central European Journal of Physics доступ с 2003 по текущий год;
6. The European Physical Journal B Condensed Matter and Complex Systems (Springer);
7. International Journal of Modern Physics B (World Scientific Publishing Company) электронная версия;
8. Journal of Physics and Chemistry of Solids (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
9. Journal of Physics : Condensed Matter (UK Institute of Physics ) электронная версия;
10. Nanotechnology (UK Institute of Physics) электронная версия;
11. Nature (Nature Publishing Group) электронная версия;
12. Nature Materials (Nature Publishing Group) электронная версия;
13. New Journal of Physics" (UK Institute of Physics) электронная версия;
14. Philosophical Magazine (Taylor & Francis Group) электронная версия;

15. Philosophical Magazine Letters (Taylor & Francis Group) ) электронная версия;
16. Physica B (Condensed Matter) (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
17. Physica E (Nanostructures) ) (Elsevier (Science Direct) электронная версия;
18. Physica Status Solidi A (Wiley) электронная версия;
19. Physica Status Solidi B (Wiley) электронная версия;
20. Physica Status Solidi C (Wiley) электронная версия;
21. Physica Status Solidi RRL (Wiley) электронная версия;
22. Solid State Communications (Elsevier (Science Direct) электронная версия;

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

1. Лекционная аудитория.
2. Мультимедийный проектор и (или) LCD панель большого размера.
3. Персональный компьютер.
4. Лаборатория оптических явлений в сегнетоэлектрических и магнитных кристаллах, имеющая современное оборудование для исследования линейных и нелинейных оптических явлений в магнитных материалах.
5. Лаборатория кинетических явлений в твердых телах при низких температурах, имеющая современный криомагнитный комплекс измерения физических свойств конденсированных сред PPMS-14, позволяющий обеспечить измерения физических свойств в интервале температур (0.4-400) К и магнитных полей до 14Т в круглосуточном режиме. Осуществлять комплексную характеризацию электрических, сверхпроводящих, магнитных, тепловых, термоэлектрических свойств новых материалов и композитных систем для создания элементов электронной и сенсорной техники.
6. Лаборатория физики ферроиков, имеющая современное оборудование для исследования сверхбыстрых магнитных явлений.

Программа разработана:

вед.н.с., д-р физ.-мат. наук, Кричевцов Б.Б.