

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич  
Должность: врио ректора  
Дата подписания: 11.04.2023 09:57:10  
Уникальный программный ключ:  
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»



Утверждаю:  
Руководитель ПА:  
Малышкина О.В.

«24» апреля 2022г.

Рабочая программа дисциплины (или модуля) (с аннотацией)  
Магнитные свойства твердых тел

Научная специальность  
1.3.8 Физика конденсированного состояния

Для аспирантов 3 курса

Составитель: к.ф.-м.н., доцент Карпенков А.Ю.

Тверь, 2022

## **I. Аннотация**

**1. Наименование дисциплины (или модуля) в соответствии с учебным планом** Магнитные свойства твердых тел

### **2. Цель и задачи дисциплины (или модуля)**

Целями освоения дисциплины является: изучение теоретических основ макроскопического и микроскопического описания магнитных свойств материалов, находящихся в конденсированном состоянии и рассмотрение различных аспектов их практического применения.

Задачами освоения дисциплины является формирование четкого понимания основных понятий и идей современной физики магнитных материалов; подготовка аспирантов к изучению, в случае необходимости, специальных обзоров и оригинальных работ по отдельным вопросам данной области знания.

### **3. Объем дисциплины (или модуля):**

2 зачетные единицы, 72 академических часа, **в том числе контактная работа:** лекции 12 часов; практические занятия 0 часов; **самостоятельная работа:** 60 часов.

### **4. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (или модулю):**

Формируемые компетенции:

ПК-1 - способность самостоятельно ставить научные задачи в области физики и решать их с использованием современного оборудования и новейшего отечественного и зарубежного опыта;

УК-1 - способностью к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.

### **5. Форма промежуточной аттестации – зачет**

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

Учебная программа – наименование разделов и тем	Всего (час.)	Контактная работа (час.)		Самостоятельн ая работа (час.)
		Лекции	Практические занятия	
1. Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Законы Кюри и Кюри – Вейсса. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости.	12	2		10
2. Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика.	12	2		10
3. Ферромагнитные домены. Причины появления доменов. Доменные границы (Блоха, Нееля).	12	2		10
4. Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферримагнетики. Магнитная структура ферримагнетиков.	12	2		10
5. Спиновые волны, магноны. Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта и Керра).	12	2		10
6. Движение магнитного момента в постоянном и переменном магнитных полях. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.	12	2		10
<b>ИТОГО</b>	<b>72</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>60</b>

**III. Оценочные материалы для проведения текущей и промежуточной аттестации**

Планируемые результаты освоения образовательной программы (Формируемые компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
УК-1 способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	<p><b>Владеть:</b> способностью анализировать экспериментальный результат и сопоставлять с соответствующей теорией и известными свойствами исследуемого материала.</p> <p><b>Уметь</b> проводить анализ и обобщение изученной литературы, ясно излагать и аргументировать собственную точку зрения, свободно ориентироваться в сферах применения современных методов, ставить конкретные задачи научных исследований.</p> <p><b>Знать:</b> современные представления о проблемах в различных областях современной физики конденсированного состояния</p>
ПК-1 способность самостоятельно ставить научные задачи в области физики и решать их с использованием современного оборудования и новейшего отечественного и зарубежного опыта	<p><b>Владеть</b> постановкой научной задачи физики конденсированного состояния и умением решать их с помощью современной аппаратуры и зарубежного опыта..</p> <p><b>Знать</b> основные понятия и теоретические основы физики конденсированного состояния, современное состояние научных исследований в данной области.</p>

*Перечень заданий:*

Этап формирования компетенции УК-1, в котором участвует дисциплина	Перечень заданий для оценки знаний, умений, навыков
<p>Промежуточный</p> <p><b>Владеть:</b> способностью анализировать экспериментальный результат и сопоставлять с соответствующей теорией и известными свойствами исследуемого материала.</p> <p><b>Уметь</b> проводить анализ и обобщение изученной литературы, ясно излагать и аргументировать собственную точку зрения, свободно ориентироваться в</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.</li> <li>2. Ферромагнитные домены.</li> <li>3. Спиновые волны, магноны.</li> </ol>

<p>сферах применения современных методов, ставить конкретные задачи научных исследований.</p> <p><b>Знать:</b> современные представления о проблемах в различных областях современной физики конденсированного состояния</p>	
--	--

Этап формирования компетенции ПК-1, в котором участвует дисциплина	Перечень заданий для оценки знаний, умений, навыков
<p>заключительный</p> <p><b>Владеть</b> постановкой научной задачи физики конденсированного состояния и умением решать их с помощью современной аппаратуры и зарубежного опыта.</p> <p><b>Знать</b> основные понятия и теоретические основы физики конденсированного состояния, современное состояние научных исследований в данной области.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Природа ферромагнетизма.</li> <li>2. Ферромагнитные домены.</li> <li>3. Ядерный магнитный резонанс.</li> </ol>

#### IV. Образовательные технологии

Учебная программа – наименование разделов и тем (в строгом соответствии с разделом II РПД)	Вид занятия	Образовательные технологии
<p>Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Законы Кюри и Кюри – Вейсса. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости.</p>	Лекция	<p>Лекция традиционная</p> <p>Дискуссионные технологии</p> <p>Дистанционные образовательные технологии</p>

Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика.	Лекция	Лекция традиционная Дискуссионные технологии Дистанционные образовательные технологии
Ферромагнитные домены. Причины появления доменов. Доменные границы (Блоха, Нееля).	Лекция	Лекция традиционная Дискуссионные технологии Дистанционные образовательные технологии
Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферромагнетики. Магнитная структура ферромагнетиков.	Лекция	Лекция традиционная Дискуссионные технологии Дистанционные образовательные технологии
Спиновые волны, магноны. Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта и Керра).	Лекция	Лекция традиционная Дискуссионные технологии Дистанционные образовательные технологии
Движение магнитного момента в постоянном и переменном магнитных полях. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.	Лекция	Лекция традиционная Дискуссионные технологии Дистанционные образовательные технологии

## V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### Рекомендуемая литература:

а) основная литература:

1. Боровик Е. С. Лекции по магнетизму / Е. С. Боровик, В. В. Еременко, А. С. Мильнер. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 510 с. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=75475>
2. Физические свойства материалов : учебное пособие / В. И. Грызунов, Т. И. Грызунова, О. А. Клецова и др. - 2-е изд., стер. - Москва : Флинта, 2015. - 248 с. : схем., табл. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-9765-2404-0 ; [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=461082>
3. Электричество и магнетизм: учебное пособие / Ш. А. Пиралишвили [и др.]. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 160 с. — [Электронный ресурс].- Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/91880>
4. Пастушенков Ю.Г., Пастушенков А.Г. Постоянные магниты. Ч.1. Учебн. пособие. Тверь. 2015. 219 с.
5. Пастушенков Ю.Г. Магнитная доменная структура. Количественный анализ микромагнитных параметров. Тверь. 2007. 197 с.

б) дополнительная литература

6 Пацева Ю. В. Электромагнетизм : лекции по физике / Ю. В. Пацева. - Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2015. - 124 с. : ил. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-4475-4031-9 ; [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=298188>

7 Музычка А. Ю. Механика и электромагнетизм: тексты лекций по общей физике : лекции / А. Ю. Музычка. - Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2015. - 280 с. : ил. - (Высшая школа). - ISBN 978-5-4458-9569-5 ; [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=256579>

8 Дубровский В. Г. Электричество и магнетизм: сборник задач и примеры их решения : учебное пособие / В. Г. Дубровский, Г. В. Харламов. - Новосибирск : НГТУ, 2011. - 92 с. - ISBN 978-5-7782-1600-6 ; [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=228733>

2) Программное обеспечение

- Adobe Reader XI
- Debut Video Capture
- 7-Zip
- iTALC
- Google Chrome
- и др.

3) Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

*(Доступ с компьютеров сети ТвГУ)*

1. ЭБС «ZNANIUM.COM» [www.znanium.com](http://www.znanium.com);
2. ЭБС «ЮРАИТ» [www.biblio-online.ru](http://www.biblio-online.ru);
3. ЭБС «Университетская библиотека онлайн» <https://biblioclub.ru/> ;
4. ЭБС IPRbooks <http://www.iprbookshop.ru/>;
5. ЭБС «Лань» <http://e.lanbook.com>;
6. ЭБС BOOK.ru <https://www.book.ru/>
7. ЭБС ТвГУ <http://megapro.tversu.ru/megapro/Web>
8. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU (подписка на журналы) [https://elibrary.ru/projects/subscription/rus\\_titles\\_open.asp?](https://elibrary.ru/projects/subscription/rus_titles_open.asp?) ;
9. Репозиторий ТвГУ <http://eprints.tversu.ru>,
10. Wiley Online Library <https://onlinelibrary.wiley.com/>
11. Журналы American Institute of Physics (AIP) <http://aip.scitation.org/> ;
12. Журналы American Chemical Society (ACS) <https://www.acs.org/content/acs/en.html>;
13. Журналы American Physical Society (APS) <https://journals.aps.org/about>
14. Журналы издательства Taylor&Francis <http://tandfonline.com/> ;
15. Патентная база компании QUESTEL- ORBIT <https://www.orbit.com/> ;
16. БД Scopus <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic>

17. БД Web of Science  
[http://apps.webofknowledge.com/WOS\\_GeneralSearch\\_input.do?product=WOS&search\\_mode=GeneralSearch&SID=F5lxbbgjnOdTHHnpOs&preferencesSaved=](http://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=F5lxbbgjnOdTHHnpOs&preferencesSaved=)
18. Электронная коллекция книг Оксфордского Российского фонда  
<http://ebookcentral.proquest.com/lib/tverstate/home.action>
19. Ресурсы издательства Springer Nature <http://link.springer.com/> ;
20. Архивы журналов издательства Oxford University Press  
<http://archive.neicon.ru/xmlui/> ,
21. Архивы журналов издательства Sage Publication  
<http://archive.neicon.ru/xmlui/> ,
22. Архивы журналов издательства The Institute of Physics  
<http://archive.neicon.ru/xmlui/>,
23. Архивы журналов издательства Nature <http://archive.neicon.ru/xmlui/>,
24. Архивы журналов издательства Annual Reviews  
<http://archive.neicon.ru/xmlui/> .
25. Polpred.com Обзор СМИ <http://www.polpred.com/>
26. СПС КонсультантПлюс (в сети ТвГУ);
27. ИПС «Законодательство России» <http://pravo.fso.gov.ru/ips.html>
28. Сводные каталоги фондов российских библиотек АРБИКОН, МАРС  
<http://arbicon.ru/>; КОРБИС <http://corbis.tverlib.ru/catalog/> , АС РСК по НТЛ  
[http://library.gpntb.ru/cgi/irbis64r/62/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=F&I21DBN=RSK&P21, DBN=RSK&S21FMT=&S21ALL=&Z21ID=](http://library.gpntb.ru/cgi/irbis64r/62/cgiirbis_64.exe?C21COM=F&I21DBN=RSK&P21, DBN=RSK&S21FMT=&S21ALL=&Z21ID=); ЭКБСОН  
<http://www.vlibrary.ru>

4) Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

- 1) журнал «Физика твердого тела» <http://journals.ioffe.ru/journals/1>
- 2) <http://physics.info/dielectrics/>
- 3) свойства материалов <http://materials.springer.com/>

## **VI. Методические материалы для обучающихся по освоению дисциплины**

Вопросы для подготовки к зачету:

### **1. Силы связи в твердых телах**

- 1.1 Электронная структура атомов.
- 1.2 Химическая связь и валентность.
- 1.3 Типы сил связи в конденсированном состоянии: ван-дер-ваальсова связь.
- 1.4 Типы сил связи в конденсированном состоянии: ионная связь, ковалентная связь.
- 1.5 Типы сил связи в конденсированном состоянии: металлическая связь.
- 1.6 Химическая связь и ближний порядок.
- 1.7 Структура вещества с ненаправленным взаимодействием.



1.8 Примеры кристаллических структур, отвечающих плотным упаковкам шаров: простая кубическая, ОЦК, ГЦК, ГПУ.

1.9 Структура типа CsCl, типа NaCl.

1.10 Структура типа перовскита CaTiO<sub>3</sub>.

1.11 Основные свойства ковалентной связи. Структура веществ с ковалентными связями. Структура веществ типа селена.

1.12 Гибридизация атомных орбиталей в молекулах и кристаллах. Структура типа алмаза и графита.

## **2. Симметрия твердых тел**

2.1 Кристаллические и аморфные твердые тела. Трансляционная инвариантность.

2.2 Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Ячейка Вигнера – Зейтца.

2.3 Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле.

2.4 Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.

2.5 Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции.

2.6 Операции (преобразования) симметрии.

2.7 Элементы теории групп, группы симметрии.

2.8 Возможные порядки поворотных осей в кристалле.

2.9 Пространственные и точечные группы (кристаллические классы).

2.10 Решетка Браве. Классификация решеток Браве.

## **3. Дефекты в твердых телах**

3.1 Точечные дефекты, их образование и диффузия. Вакансии и межузельные атомы. Дефекты Френкеля и Шоттки.

3.2 Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации. Роль дислокаций в пластической деформации.

## **4. Дифракция в кристаллах**

4.1 Распространение волн в кристаллах. Дифракция рентгеновских лучей, нейтронов и электронов в кристалле.

4.2 Распространение волн в кристаллах. Упругое и неупругое рассеяние, их особенности.

4.3 Брэгговские отражения. Атомный и структурный факторы.

4.4 Дифракция в аморфных веществах.

## **5. Колебания решетки**

5.1 Колебания кристаллической решетки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная одномерные цепочки атомов.

5.2 Закон дисперсии упругих волн. Акустические и оптические колебания.

5.3 Квантование колебаний. Фононы. Электрон-фононное взаимодействие.

## **ЧАСТЬ II**

### **6. Тепловые свойства твердых тел**

6.1 Теплоемкость твердых тел. Решеточная теплоемкость.

6.2 Теплоемкость твердых тел. Электронная теплоемкость.

6.3 Температурная зависимость решеточной и электронной теплоемкости.

6.4 Классическая теория теплоемкости. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы в классической физике. Границы справедливости классической теории.

6.5 Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Температура Дебая.

6.6 Тепловое расширение твердых тел. Его физическое происхождение. Ангармонические колебания.

6.7 Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана – Франца для электронной теплоемкости и теплопроводности.

## **7. Электронные свойства твердых тел**

7.1 Электронные свойства твердых тел: основные экспериментальные факты. Трудности объяснения этих фактов на основе классической теории Друде. Проводимость.

7.2 Электронные свойства твердых тел: основные экспериментальные факты. Трудности объяснения этих фактов на основе классической теории Друде. Эффект Холла.

7.3 Электронные свойства твердых тел: основные экспериментальные факты. Трудности объяснения этих фактов на основе классической теории Друде. ТермоЭДС.

7.4 Электронные свойства твердых тел: основные экспериментальные факты. Трудности объяснения этих фактов на основе классической теории Друде. Фотопроводимость. Оптическое поглощение.

7.5 Основные приближения зонной теории. Граничные условия Борна – Кармана. Теорема Блоха. Блоховские функции.

7.6 Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны.

7.7 Брэгговское отражение электронов при движении по кристаллу. Полосатый спектр энергии.

7.8 Приближение сильносвязанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии. Тензор обратных эффективных масс.

7.9 Приближение почти свободных электронов. Брэгговские отражения электронов.

7.10 Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Металлы.

7.11 Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Диэлектрики

7.12 Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Полупроводники.

7.13 Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Полуметаллы.

7.14 Классификация диэлектриков. Основные процессы, протекающие в твердых телах под действием электрического поля. Тепловая, ионная и ориентационная поляризации.

7.15 Электромеханические свойства диэлектриков. Пьезоэлектрический эффект.

7.16 Природа спонтанной поляризации диэлектриков. Основные понятия физики сегнетоэлектричества. Фазовый переход в сегнетоэлектрическое состояние. Доменная структура. Пироэлектрический эффект.

## **8. Магнитные свойства твердых тел**

8.1 Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Законы Кюри и Кюри – Вейсса. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости.

8.2 Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика.

8.3 Ферромагнитные домены. Причины появления доменов. Доменные границы (Блоха, Нееля).

8.4 Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферромагнетики. Магнитная структура ферромагнетиков.

8.5 Спиновые волны, магноны.

8.6 Движение магнитного момента в постоянном и переменном магнитных полях. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.

## **9. Оптические и магнитооптические свойства твердых тел**

9.1 Комплексная диэлектрическая проницаемость и оптические постоянные.

9.2 Коэффициенты поглощения и отражения. Соотношения Крамерса—Кронига.

9.3 Поглощения света в полупроводниках (межзонное, примесное поглощение, поглощение свободными носителями, решеткой). Определение основных характеристик полупроводника из оптических исследований.

9.4 Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта и Керра).

9.5 Проникновение высокочастотного поля в проводник. Нормальный и аномальный скин-эффекты. Толщина скин-слоя.

## **10. Сверхпроводимость**

10.1 Сверхпроводимость. Критическая температура. Высокотемпературные сверхпроводники. Эффект Мейснера. Критическое поле и критический ток.

10.2 Сверхпроводники первого и второго рода. Их магнитные свойства. Вихри Абрикосова. Глубина проникновения магнитного поля в образец.

10.3 Эффект Джозефсона.

10.4 Куперовское спаривание. Длина когерентности. Энергетическая щель.

## **VII. Материально-техническое обеспечение**

Материально-техническая база необходимая и применяемая для осуществления образовательного процесса и программное обеспечение по дисциплине включает:

– специальные помещения (аудитории), укомплектованные специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации в аудитории;

- мультимедийное оборудование (ноутбук, экран и проектор);
- ПК для работы студентов в компьютерном классе с выходом в Интернет.

**VIII. Сведения об обновлении рабочей программы дисциплины**

№ п.п.	Обновленный раздел рабочей программы дисциплины	Описание внесенных изменений	Реквизиты документа, утвердившего изменения
1.			
2.			