

Институт физики микроструктур РАН —  
филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии наук»

УТВЕРЖДАЮ

Врио директора ИФМ РАН

\_\_\_\_\_ З.Ф.Красильник

"11" апреля 2016 г.

**Рабочая программа дисциплины**  
Физика конденсированного состояния

Направление подготовки  
*03.06.01 «Физика и астрономия»*

Направленность (профиль) программы  
*01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики»*

Квалификация (степень) выпускника  
*исследователь - преподаватель, исследователь*

Форма обучения

*очная*

Нижний Новгород

2016

## 1. Место дисциплины в структуре ООП аспирантуры

Дисциплина «Физика конденсированного состояния» является дисциплиной по выбору вариативной части программы 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики».

Для успешного усвоения курса аспиранту необходимо знание общих курсов физики, квантовой механики, статистической физики и электродинамики. Данный курс является базой для выполнения аспирантами исследований в области твердотельных наноструктур.

Дисциплина изучается на 2 курсе (4 семестр).

**Целями освоения дисциплины являются:**

- формирование у аспирантов общих представлений о строении кристаллов и аморфных веществ, методах исследования и классификации кристаллических структур, а также различных физических свойствах твёрдых тел: тепловых, электрических, магнитных и других;
- формирование у аспирантов современных представлений об электронно-ионной структуре твёрдых тел, о свойствах волновых функций и энергетического спектра электронов в кристаллах, методах квантового описания электронных процессов в твёрдых телах;
- освоение студентами методов теоретического расчёта основных физических характеристик твёрдотельных систем;
- формирование у аспирантов компетенций программы 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики», в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия».

## 2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы по направлению «Физика и астрономия»

В результате освоения дисциплины обучающийся должен овладеть следующими компетенциями результатами обучения по дисциплине:

Код компетенции	Результаты освоения ООП Содержание компетенций	Перечень результатов планируемых 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	<b>ЗНАТЬ:</b> методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе междисциплинарных областях. <b>УМЕТЬ:</b> проводить анализ литературных данных в рамках поставленной исследовательской (практической, образовательной) задачи, выявлять основные вопросы и проблемы, существующие в современной науке;

		<p>при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b>  навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.</p>
<p><b>ОПК-1</b></p>	<p>способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области разработки приборов и методов экспериментальной физики с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b>  теоретические основы организации научно-исследовательской деятельности;  методы сбора информации для решения поставленных исследовательских задач;  методы анализа данных, необходимых для проведения конкретного исследования.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b>  выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования</p> <p>планировать, организовывать и проводить научно-исследовательские и производственно-технические исследования с применением современной аппаратуры, оборудования и компьютерных технологий;</p> <p>самостоятельно выполнять теоретические, экспериментальные и вычислительные физические исследования при решении научно-исследовательских и производственных задач с использованием современной аппаратуры и вычислительных средств.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b>  навыками поиска (в том числе с</p>

		<p>использованием информационных систем и баз данных) и критического анализа информации по тематике проводимых исследований;</p> <p>навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов и формулировки выводов;</p> <p>навыками работы на современной аппаратуре и оборудовании для выполнения физических исследований;</p> <p>способностью самостоятельно с применением современных компьютерных технологий; анализировать, обобщать и систематизировать результаты физических работ.</p>
<b>ПК-1</b>	<p>способность самостоятельно проводить научные исследования в области профессиональной деятельности и применять полученные результаты для решения практических задач</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b> основные законы, теоретические модели и современные методы исследований и математического моделирования в области профессиональной деятельности.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b> использовать полученные знания для анализа результатов научных исследований и решения практических задач в области профессиональной деятельности.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b> разработкой методов научного исследования для получения новых фундаментальных знаний в области профессиональной деятельности и способами применения этих знаний для создания прикладных технологий и решения практических задач.</p>
<b>ПК-2</b>	<p>способность к системному анализу современных проблем физики и комплекса новейших знаний и достижений физики в своей научно-исследовательской деятельности</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b> Базовые законы современной физики и их взаимосвязь, тенденции развития физики в обозримой перспективе, основные проблемы, стоящие перед современной физикой, а также предлагаемые средства их решения.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b></p>

		<p>понимать суть явлений и процессов, изучаемых физикой.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b></p> <p>основами методологии и практическими навыками научного познания при изучении различных уровней организации материи, пространства и времени.</p>
<b>ПК-3</b>	<p>способность использовать современные методы обработки экспериментальных данных и/или методы численного моделирования сложных физических процессов в области профессиональной деятельности.</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b></p> <p>основные методы обработки данных, полученных экспериментально или методами численного моделирования.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b></p> <p>выделять и систематизировать необходимые научные данные; критически оценивать их достоверность.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b></p> <p>навыками сбора, обработки, анализа и систематизации научных данных;</p> <p>навыками статистического анализа экспериментальных данных;</p> <p>навыками аналитических и численных аппроксимаций функций.</p>

**3. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам занятий) и на самостоятельную работу обучающихся**

Общая трудоемкость (объем) дисциплины составляет 3 зачетных единиц (ЗЕ), 108 часов.

**3.1. Объем дисциплины по видам учебных занятий (в часах)**

<b>Вид учебной работы</b>	<b>Всего часов</b>
Общая трудоемкость дисциплины	108
Контактная работа обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) (всего)	36
Аудиторная работа (всего):	36
в том числе:	
Лекции	18
Практические занятия	18
Самостоятельная работа обучающихся (всего)	72
<b>Вид итогового контроля</b>	<b>зачет</b>

**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	Электронные состояния в твердых телах	30	6	6	18
2	Теория колебаний решетки	26	4	4	18
3	Магнитные свойства твердых тел	26	4	4	18
4	Транспортные свойства твердых тел	26	4	4	18
<b>Дисциплина в целом</b>		<b>108</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>72</b>

### 3.3 Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам)

№	Наименование раздела дисциплины	Содержание
1	Электронные состояния в твердых телах.	Теории металлов Друде и Зоммерфельда. Недостатки модели свободных электронов. Дифракция рентгеновских лучей в кристаллах. Адиабатическое приближение. Приближение Борна – Оппенгеймера. Невзаимодействующие электроны в кристаллической решетке. Трансляционная симметрия. Квазиимпульс. Общие свойства зонного спектра. Различные методы расчета зонной структуры. Методы сильной и слабой связи. Плотность состояний. Заполнение энергетических зон электронами. Металлы. Диэлектрики. Полупроводники. Поверхность Ферми. Взаимодействующие электроны. Приближение Хартри-Фока. Модель Хартри-Фока для свободных электронов. Экранирование. Теория Томаса-Ферми. Теория Линдхарда. Слабо неидеальный ферми-газ с отталкиванием. Основы теории ферми-жидкости. Когезионная энергия. Ионные и ковалентные кристаллы, металлы.
2	Теория колебаний решетки	Недостатки модели статической решетки. Динамика решетки. Гармоническое приближение. Нормальные моды одномерной монокристаллической решетки Браве. Нормальные моды одномерной решетки с базисом. Акустические и оптические моды колебаний решетки. Квантовая теория колебаний решетки. Фононы. Законы дисперсии акустических и оптических фононов при малых $k$ . Закон дисперсии акустических фононов при малых $k$ . Соотношение Бома-Ставера. Теплоемкость металлов. Закон Дюлонга и Пти. Квантовая теория теплоемкости. Теплоемкость. Интерполяционная формула Дебая. Теплоемкость. Приближение Эйнштейна. Электронная теплоемкость. Ангармонизм колебаний решетки. Тепловое расширение твердых тел.
3	Магнитные свойства	Электрон в решетке в магнитном поле. Симметрия

	твердых тел.	состояний. Эффект де Гааза-ван-Альфена. Диамагнетизм Ландау. Парамагнетизм Паули. Магнитная восприимчивость. Теорема Ван-Леевен. Обменное взаимодействие. Дипольное взаимодействие. Магнитное упорядочение. Магноны. Диамагнетизм, парамагнетизм и ферромагнетизм.
4	Транспортные свойства твердых тел.	Кинетическое уравнение Больцмана. Интеграл столкновений. Приближение времени релаксации. Закон Видемана-Франца. Проводимость и теплопроводность. Длина свободного пробега. Процессы рассеяния. Эффект Холла. Скин-эффект. Оптические свойства твердых тел. Межзонные переходы. Сверхпроводимость.

Текущий контроль успеваемости осуществляется в рамках занятий практического и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций. Итоговый контроль осуществляется на зачете, где 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 задач физики конденсированного состояния.

#### 5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

В курсе запланировано на самостоятельную работу аспирантов 72 часа (67 % общего объема). Самостоятельная работа аспирантов является одним из видов учебных занятий, выполняется по заданию преподавателя индивидуально и без его непосредственного участия. Самостоятельная работа аспиранта – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель –

систематизация и закрепление полученных знаний и умений, углубление и расширение знаний, приобретение навыков самостоятельной работы с литературой, формирование способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа аспиранта подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, решение домашних задач с последующей проверкой навыков решения задач. Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных аспирантам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в конце данной программы) проводится при подготовке к зачету по дисциплине. Выполнение домашних работ осуществляется еженедельно или раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала и проведения практических занятий по соответствующей тематике.

## **6. Фонд оценочных средств по дисциплине**

### **6.1 Типовые контрольные задания или иные материалы**

1. Вероятность процессов межэлектронного рассеяния в слабо-взаимодействующем Ферми-газе. Применимость теории Ферми-жидкости в реальных металлах.
2. Электрон в решетке в слабом магнитном поле. Квазиклассика.
3. Теплоемкость. Модель Эйнштейна.
4. Экранировка. Теория Томаса–Ферми.
5. Колебания и волны в 3-х мерной кристаллической решетке.
6. Сохраняется ли квазиимпульс?
7. Метод Хартри–Фока.
8. Элементы симметрии кристаллической решетки.
9. Симметрия состояний электрона в решетке в магнитном поле. Квазиклассический спектр. Циклотронная масса.
10. Тензор эффективных масс электрона в решетке.
11. Акустические и оптические фононы.
12. Закон дисперсии квазичастиц в Ферми-жидкости.
13. Кристаллические решетки. Решетка Бравэ.
14. Энергетический спектр электрона в слабом периодическом потенциале.
15. Плотность энергетических уровней.
16. Теплоемкость металлов.
17. Законы дисперсии акустических и оптических фононов при малых  $k$ .
18. Адиабатическое приближение. Теорема Борна-Оппенгеймера.
19. Спин-орбитальное взаимодействие и вырождение энергетических уровней в твердом теле. Симметрия относительно обращения времени.
20. Эффект де Гааза – ван Альфена.
21. Недостатки модели статической решетки.
22. Закон дисперсии акустических фононов при малых  $k$ . Соотношение Бома–Ставера.
23. Обменное взаимодействие.
24. Метод сильной связи для расчета зонной структуры.
25. Теорема Бора – ван Леевен.
26. Функции Ванье.
27. Концепция квазичастиц. Основные постулаты теории Ферми-жидкости.



28. Фонон-фононное взаимодействие. Ангармонизм и тепловое расширение.
29. Заполнение энергетических зон электронами. Металлы. Диэлектрики. Полупроводники.
30. Теория Хартри – Фока для свободных электронов.
31. Электрон – фононное взаимодействие.
32. Экранировка. Теория Линдхарда.
33. Теория металлов Друде.
34. Оператор скорости электрона в решетке. Средняя скорость.
35. Теория металлов Зоммерфельда.
36. Процессы рассеяния в твердом теле. Правило Матиссена. Температурная зависимость сопротивления металла.
37. Дифракция рентгеновского излучения в кристаллах.
38. Оптическое поглощение в твердых телах. Межзонные переходы.
39. Нормальный и аномальный скин – эффект.
40. Квантование магнитного потока в сверхпроводниках.
41. Теорема Блоха для электрона в периодическом потенциале.
42. Теплоемкость. Интерполяционная формула Дебая.
43. Поверхность Ферми. Методы ее экспериментального определения.
44. Фононы. Квантовая теория колебаний решетки.
45. Интеграл столкновений для рассеяния электронов на примесях.
46. Спектр электронов в твердом теле в магнитном поле.
47. Теплопроводность.
48. Ферромагнетизм. Диамагнетизм. Парамагнетизм.
49. Применимость квазиклассического описания движения электронов в металлах.
50. Метод слабой связи для расчета зонного спектра.
51. Условия экспериментального наблюдения эффекта де Гааза- ван Альфена.
52. Теплоемкость диэлектриков.
53. Обратная решетка и ее свойства.
54. Диамагнетизм Ландау.
55. Сверхпроводимость. Экспериментальные факты. Зависимость сопротивления от температуры. Эффект Мейсснера.
56. Парамагнетизм Паули.

## 6.2. Описание шкал оценивания

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 вопросы 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.

Зачет ставится при уровне знаний на оценку «удовлетворительно» и выше.

Оценка	Уровень подготовки
Отлично	Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Аспирант дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета;

	<p>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.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше</p>
Хорошо	<p>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.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 90%.</p>
Удовлетворительно	<p>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.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%.</p>
Неудовлетворительно	<p>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 владении методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%.</p>

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

а) основная литература:

### **7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)**

а) основная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., курс "Теоретическая физика", Том III. «Квантовая механика». М.: Наука. 2002.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., курс "Теоретическая физика", Том V. «Статистическая физика. Часть 1.» М. Наука. 1976.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., курс "Теоретическая физика", Том VIII. «Электродинамика сплошных сред.» М. Наука. 1982.
4. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П., курс "Теоретическая физика", Том IX. «Статистическая физика. Часть 2.» М. Наука. 1978.
5. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П., курс "Теоретическая физика", Том X. Физическая кинетика. М. Наука. 1979.
6. Киттель Ч., Квантовая теория твердых тел. М.: Мир, 1967.
7. Абрикосов А.А., «Основы теории металлов», М.: Физматлит, 2010.
8. Де Жен П., «Сверхпроводимость металлов и сплавов». М.: Мир, 1968.

б) дополнительная литература:

1. Займан Дж., «Принципы теории твердого тела», М.: Мир, 1966.
2. Киттель Ч., «Введение в физику твердого тела». М.: Наука. 1978.
3. Успехи физических наук (<https://ufn.ru/ru/>)
4. Reviews of Modern Physics (RMP) (<https://journals.aps.org/rmp/>)
5. Physical Review B (PRB) (<https://journals.aps.org/prb/>)
6. Superconductor Science and Technology (<http://iopscience.iop.org/journal/0953-2048>)

в) факультативная литература

1. М. Ашкрофт, Н. Мермин, «Физика твердого тела», тт. 1–2. М.: Мир, 1979.
2. Л.С. Левитов, А.В. Шитов, «Функции Грина», М.: Физматлит, 2003.
3. А.А. Абрикосов, Л.П. Горьков, И.Е. Дзялошинский, «Методы квантовой теории поля в статистической физике», М.: Физматгиз, 1962.
4. В.Я. Демиховский, Г.А. Вугальтер, «Физика квантовых низкоразмерных структур», Изд. ННГУ, 2005.
5. Р. Уайт, «Квантовая теория магнетизма», М.: Мир, 1985.
6. А.С. Мельников, А.В. Самохвалов. Дополнительные разделы физики твердого тела. Электронное методическое пособие. ([http://www.pnn.unn.ru/UserFiles/lectures/Melnikov\\_Add\\_Chapters\\_SSP.pdf](http://www.pnn.unn.ru/UserFiles/lectures/Melnikov_Add_Chapters_SSP.pdf))

## **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. Free Origin Viewer

## **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:**

Самохвалов А.В., д.ф.-м.н., в.н.с. отдела физики сверхпроводников ИФМ РАН

### **Рецензент:**

Токман И.Д., к.ф.-м.н., с.н.с. отдела физики сверхпроводников ИФМ РАН