

Российская академия наук  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт электрофизики  
Уральского отделения Российской академии наук  
(ИЭФ УрО РАН)

Утверждаю»  
Врио. директора ИЭФ УрО РАН



*В.Г. Шпак*  
В.Г. Шпак  
2015 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ  
03.06.01 – «Физика и астрономия»  
Направленность 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Б1.В.ОД.1

Рабочая программа утверждена на заседании Ученого совета ИЭФ УрО РАН.  
Протокол № 1 от 06.02.2015 г.

Программу составили:

г.н.с. ИЭФ УрО РАН  
д.ф.-м.н., с.н.с.

Медведев М.В.

зав. лаб. ПВ УрО РАН  
д.ф.-м.н., профессор

Овчинников В.В.

в.н.с. ИЭФ УрО РАН  
д.ф.-м.н.

Кучинский Э.З.

СОГЛАСОВАНО:

Зам. директора по НВ ИЭФ УрО РАН  
к.т.н.

« 6 » февраля 2012 г.

Иванов М.Г.

Учёный секретарь ИЭФ УрО РАН  
к.ф.-м.н.

« 6 » февраля 2012 г.

Кокорина Е.Е.

Рабочая программа утверждена на заседании Учёного совета ИЭФ УрО РАН.  
Протокол № 1 от 06.02.2015 г.

## **1. Цели и задачи дисциплины.**

– дать общее представление об атомно-молекулярной и электронной структуре веществ в конденсированном состоянии, классификации твёрдых тел, основных модельных приближениях, основных взаимодействиях и основных физических свойствах;

– научить аспиранта языку современной физики конденсированного состояния вещества, сформировать представления об электронной и кристаллической структуре твёрдых тел различной природы и методах её описания и расчёта, получить навыки решения конкретных задач.

## **2. Требования к уровню освоения содержания дисциплины.**

В результате изучения дисциплины аспирант должен:

### **Знать:**

– основные представления о природе формирования атомной и электронной структуры конденсированных сред, классификации твёрдых тел, основных модельных приближениях, основных взаимодействиях, и основных физических свойствах.

### **Уметь:**

– анализировать и излагать результаты экспериментальных исследований материалов в рамках современных представлений физики конденсированного состояния, разрабатывать и внедрять адекватные микроскопические модели, проводить стандартные количественные оценки.

### **Владеть:**

– языком современной физики конденсированного состояния, чёткими представлениями о природе электронной и кристаллической структуры твёрдых тел, методами физического и математического описания основных микро- и макроскопических характеристик твёрдых тел, основными расчётными схемами.

### 3. Компетенции.

<i>№ п/п</i>	<i>Индекс</i>	<i>Содержание</i>
1.	ОПК-1	Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий.
2.	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.
3.	УК-3	Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач.
4.	УК-4	Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития.
5.	ПК-1	Способность ставить, формализовать и решать задачи, умением системно анализировать научные проблемы, генерировать новые идеи и создавать новое знание.
6.	ПК-2	Способность проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы и информационных технологий с учётом отечественного и зарубежного опыта.
7.	ПК-3	Способность пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза информации в избранной области физических исследований.
8.	ПК-4	Способность применять на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, способность самостоятельно организовывать и проводить научные исследования и внедрять их результаты в качестве члена или руководителя коллектива.

#### 4. Объём дисциплины и виды учебной работы.

<i>Вид учебной работы</i>	<i>Всего</i>		<i>Период обучения</i>
	<i>часов</i>	<i>ЗЕТ</i>	
Общая трудоёмкость дисциплины	144	4	четвёртый курс
Аудиторные занятия, в т.ч.:			
Лекции	36	1	
Практические занятия (ПЗ)			
Самостоятельная работа	72	2	
Контроль самостоятельной работы	18	0,5	
Контроль	18	0,5	

#### 5. Содержание дисциплины.

##### 5.1. Разделы дисциплин и виды занятий

<i>№ п/п</i>	<i>Раздел дисциплины</i>	<i>Лекции</i>	<i>ПЗ</i>	<i>Сам. раб.</i>	<i>Контр. сам. раб.</i>	<i>Контр- роль</i>
1	Силы связи в конденсированных средах.	4		8	2	2
2	Симметрия твёрдых тел.	3		6	1,5	1,5
3	Дефекты в твёрдых телах.	3		6	1,5	1,5
4	Колебания решётки.	3		6	1,5	1,5
5	Электронные свойства металлов в модели свободного электронного газа.	3		6	1,5	1,5
6	Зонная теория энергетического спектра электронов в кристаллической решётке.	4		8	2	2
7	Полупроводники.	4		8	2	2
8	Явления переноса в диэлектрических кристаллах.	3		6	1,5	1,5
9	Сверхпроводимость.	4		8	2	2
10	Радиационная физика твёрдого тела.	5		10	2,5	2,5
Всего час.		36		72	18	18

## **5.2. Содержание разделов дисциплины.**

### **5.2.1. Силы связи в конденсированных средах.**

Электронная структура многоэлектронных атомов. Химическая связь и валентность. Типы связи в конденсированном состоянии: ван-дер-ваальсова связь, ионная связь, ковалентная связь, металлическая связь, водородная связь.

Химическая связь и ближний порядок. Структура веществ с ненаправленным взаимодействием. Примеры кристаллических структур, отвечающих упаковкам шаров: простая кубическая, ОЦК, ГЦК, ГПУ, структура типа CsCl и NaCl, структура типа перовскита.

Основные свойства ковалентной связи. Структура веществ с ковалентными связями. Структуры типа селена, алмаза и графита. Гибридизация атомных орбиталей в молекулах и кристаллах.

### **5.2.2. Симметрия твёрдых тел.**

Кристаллические и аморфные твёрдые тела. Трансляционная инвариантность. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Ячейка Вигнера-Зейтца. Решётка Браве. Обозначение узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решётка, её свойства. Зона Бриллюэна.

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

Элементы теории групп, группы симметрии. Возможные порядки поворотных осей в кристалле. Пространственные и точечные группы (кристаллические классы). Классификация решёток Браве.

### **5.2.3. Дефекты в твёрдых телах.**

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

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

Дефекты упаковки и плоскости двойникования.

### **5.2.4. Колебания решётки.**

Колебания кристаллической решётки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная одномерные цепочки атомов. Закон дисперсии упругих волн. Акустические и оптические колебания. Квантование колебаний. Фононы. Электрон-фононное взаимодействие.

Теплоёмкость твёрдых тел. Решёточная теплоёмкость и её температурная зависимость. Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Температура Дебая.

### **5.2.5. Электронные свойства металлов в модели свободного электронного газа.**

Типичные свойства металлического состояния вещества. Модель свободного электронного газа Ферми. Свойства свободного электронного газа Ферми при нулевой температуре.

Температурная зависимость функции распределения Ферми-Дирака. Теплоёмкость электронного газа и её температурная зависимость при низких температурах. Парамагнитная восприимчивость свободного электронного газа.

Электропроводность и закон Ома, формула Друде-Лоренца. Движение электронов в магнитном поле (циклотронная частота, статическое магнетосопротивление и эффект Холла).

Диэлектрическая реакция электронного газа на переменное электрическое поле. Плазменная частота газа свободных электронов.

### **5.2.6. Зонная теория энергетического спектра электронов в кристаллической решётке.**

Уравнение Шрёдингера для электрона в самосогласованном поле периодического кристаллического потенциала. Блоховские волновые функции электрона в кристаллической решётке. Свойства волнового вектора блоховской волновой функции.

Энергетический спектр зонных электронов и вид поверхности Ферми в приближении сильной связи. Приближение слабой связи (случай почти свободных электронов). Закон дисперсии электронов в приближении слабой связи в различных зонных схемах. Поверхность Ферми для почти свободных электронов и её построение в схеме расширенных зон Бриллюэна, в схеме приведённых зон и в периодической зонной схеме.

Классификация твёрдых тел по проводимости (металлы, диэлектрики и полупроводники) с точки зрения зонного характера энергетического спектра электронов. Моттовские диэлектрики как сильнокоррелированные вещества, необъяснимые с позиций зонного спектра одноэлектронного уравнения Шрёдингера.

Динамика электрона в зонной теории. Электронные и дырочные орбиты движения электронов в магнитном поле. Дырки и их свойства. Эффективная масса электрона в кристалле. Плотность состояний электронов для произвольного закона дисперсии. Особенности ВанХова в плотности электронных состояний.

### **5.2.7. Полупроводники.**

Типичные свойства полупроводников. Примеры зонной структуры полупроводников. Прямые и непрямые оптические переходы через запрещённую энергетическую щель.

Концентрация носителей тока в термодинамическом равновесии. Концентрация собственных носителей тока и положение уровня химического потенциала в энергетической щели в случае собственной проводимости.

Примесные энергетические уровни в несовершенных полупроводниках. Равновесная концентрация носителей тока в примесном полупроводнике. Глубокие примесные уровни и их влияние на проводимость полупроводников.

Положение уровня химического потенциала в несовершенных полупроводниках. Контактные явления на контакте несовершенных полупроводников р- и n-типа. Вольтамперная характеристика р-n контакта. Сильнолегированные полупроводники и вольтамперная характеристика туннельного диода.

Особенности кинетических явлений в полупроводниках.

### **5.2.8. Явления переноса в диэлектрических кристаллах.**

Фотопроводимость в диэлектрических кристаллах и влияние электронных ловушек на её характеристики. Примеры использования эффектов фотопроводимости в технических приложениях (фотография, ксерокопирование).

Ионная проводимость в ионных кристаллах при высоких и низких температурах. Вакансионный механизм самодиффузии ионов как основной механизм ионной проводимости. Различие ролей термодинамически равновесных и структурных вакансий. Суперионные проводники.

Электрический пробой диэлектриков.

### **5.2.9. Сверхпроводимость.**

Основные физические свойства сверхпроводящего состояния. Эффект Мейсснера, сверхпроводники I и II рода. Термодинамика перехода в сверхпроводящее состояние в сверхпроводнике I рода.

Лондоновская электродинамика сверхпроводников, глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник и её величина в двухжидкостной модели сверхпроводимости.

Основные физические представления микроскопической теории сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера. Косвенное притяжение электронов через фононы. Синглетные куперовские пары и длина когерентности. Зависимость критической температуры сверхпроводящего перехода от физических параметров металла. Влияние кулоновского отталкивания электронов на сверхпроводящий переход.

Поверхностная энергия границ раздела между сверхпроводящей и нормальной фазами в сверхпроводниках I и II рода. Структура смешанного состояния в сверхпроводниках II рода. Критические токи в сверхпроводниках I и II рода.

Стационарный и нестационарный эффекты Джозефсона.

## **5.2.10. Радиационная физика твёрдого тела**

Ионизирующие излучения и их источники. Естественная и искусственная радиоактивность.

Расчёт асимптотических значений энергии частиц при упругих столкновениях.

Межатомные потенциалы. Область применимости классической механики. Столкновения частиц.

Общее теоретическое рассмотрение траекторий при столкновении. Определение дифференциального сечения рассеяния с заданной энергией атома отдачи и полного сечения рассеяния. Импульсное приближение. Приближение твёрдых сфер. Классификация ионов (атомов), осколков деления. Быстрые лёгкие ионы, кулоновские столкновения. Осколки деления. Первичные атомы отдачи и тяжёлые ионы ( $E < 10^6$  эВ). Быстрые электроны. Релятивистские столкновения.

Потери энергии и пробеги ионов в твёрдых телах. Ядерное торможение (упругое взаимодействие с атомами мишени). Электронное торможение. Распределение пробегов. Каскады атомных столкновений. Фокусированные соударения. Каналирование.

Взаимодействие быстрых электронов с веществом. Ионизационные потери. Радиационные потери. Излучение Вавилова-Черенкова. Взаимодействие  $\gamma$ - и рентгеновского излучения с веществом. Томпсоновское рассеяние. Эффект Комптона. Фотоэффект. Образование электрон-позитронных пар. Взаимодействие нейтронов с веществом. Формирование особых структурных состояний и свойств твёрдых тел при радиационных воздействиях.

Рентгеноструктурный анализ ионно-легированных металлов и сплавов. Метод ядерного гамма-резонанса (эффект Мессбаура) в исследованиях конденсированных сред.

## **5.3. Самостоятельная работа аспирантов.**

5.3.1. Проработка лекционного материала по конспектам и учебной литературе (48 ч.).

5.3.2. Подготовка к контролю по дисциплине (6 ч.).

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

### **6.1. Рекомендуемая литература.**

#### **а) основная литература:**

1. Ашкрофт, Н., Мермин, Н. Физика твёрдого тела. – М.: Мир, 1979.
2. Блейкмор, Дж. Физика твёрдого тела. – М.: Мир, 1988.

3. Павлов, П.В., Хохлов, А.Ф. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1993.
4. Епифанов, Г.И. Физика твёрдого тела. – Лань, 1977.
5. Sadovskii, M.V. Statistical physics. – Berlin: De Gruyter, 2012. – 282 p.

**б) дополнительная литература:**

1. Бонч-Бруевич, В.Л., Калашников, С.Г. Физика полупроводников. – М.: Физматлит, 1990.
2. Шмидт, В.В.. Введение в физику сверхпроводников. – М.: МЦНМО, 2000.

**в) методическое обеспечение:**

<http://iep7.iep.uran.ru/iep/aspir.htm>

**6.2. Информационное обеспечение.**

№ п/п	Ссылка на информационный ресурс	Наименование разработки в электронной форме	Доступность
	<a href="http://elibrary.ru/">http://elibrary.ru/</a>	Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU	доступ свободный

**7. Материально-техническое обеспечение дисциплины.**

Для проведения занятий по дисциплине используются: компьютерный класс, аудитория для семинарских занятий, лаборатории Института, расчётные серверы лаборатории теоретической физики ИЭФ УрО РАН, оборудование: оргтехника, проектор, сверхскоростная электронно-оптическая трёхкадровая камера, оптический спектрограф, стрик-камера видимого и ближнего УФ диапазона, просвечивающий электронный микроскоп, растровый электронный микроскоп, прибор синхронного ТГ-ДТА/ДСК анализа, анализатор удельной поверхности, источник широкого пучка ионов металлов, низкоэнергетичный источник широкого пучка ионов газов с плазменным катодом, лабораторная установка нанесения алмазоподобных углеводородных покрытий, лабораторная установка для азотирования сталей и сплавов в плазме, лабораторная установка ионной имплантации, лабораторная установка реактивного магнетронного нанесения многокомпонентных покрытий.

Программа составлена с учётом рекомендаций по формированию основных профессиональных образовательных программ послевузовского профессионального образования для обучающихся в аспирантуре (№ 0160 от 17 июля 2012 г. Серия 90Л01 № 0000173) и на основе Федеральных государственных требований к структуре основной профессиональной образовательной программы послевузовского профессионального образования (аспирантура), утверждённых приказом Министерства образования и науки РФ от 16.03.2011 г. № 1365 (зарегистрирован Министерством юстиции РФ 10.05.2011 г., регистрационный № 20700).