

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»
(ИОФ РАН)

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИОФ РАН,
и.о. зам. дир. ИОФ РАН



С.В. Гарнов
202__ г.

Рабочая программа дисциплины
ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Специальность: 1.3.5. Физическая электроника

г. Москва
2022 год

Рабочая программа дисциплины «Физическая электроника» составлена в соответствии с Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов, утвержденными приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 20 октября 2021 г. № 951.

Программу составили: Гусейн-заде Н.Г., д.ф.-м.н., проф., главный научный сотрудник
Глушков В.В., д.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе

Программа обсуждена и одобрена на заседании аспирантской комиссией ИОФ РАН
30.06.2022, протокол №2206-30

Программа утверждена решением Ученого совета ИОФ РАН 05.07.2022 протокол №13

Аннотация

Учебная дисциплина «Физическая электроника» является важной составной частью Учебного плана программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре ИОФ РАН. В рамках дисциплины «Физическая электроника» обучающиеся далее – аспиранты) получают базовые знания по основополагающим разделам физической электроники: корпускулярной оптике, эмиссионной электронике, вакуумной электронике, твердотельной электронике, электронике поверхностей и пленок, и функциональной электронике.

Дисциплина «Физическая электроника» является важным фактором формирования у аспиранта целостного научного мировоззрения, развития физического мышления, умения использовать базовые физические законы, включая законы квантовой физики, для анализа различных явлений в областях физической электроники. Освоение дисциплины позволит выработать у аспирантов подходы к решению современных проблем в области физической электроники и смежных областях естественных наук. Дисциплина «Физическая электроника» также направлена на подготовку аспирантов к сдаче кандидатского экзамена по специальности 1.3.5. Физическая электроника.

Общая трудоемкость учебной дисциплины «Физическая электроника» составляет 5 зачетных единиц (180 часов).

Контроль уровня освоения дисциплины аспирантами проводится в формах текущей и итоговой аттестации. Текущая аттестация предполагает оценку знаний и умений на лекционных занятиях с помощью устных опросов, оценки различных видов самостоятельной работы аспирантов. Промежуточная аттестация аспирантов проводится в форме зачетов (в 3, 4 и 5 семестрах). Итоговая аттестация проводится в рамках кандидатского экзамена по специальности «Физическая электроника» (6 семестр).

1. Цель изучения дисциплины

Целью изучения дисциплины «Физическая электроника» является освоение обучающимися фундаментальных знаний по основным направлениям физическая электроника, овладении методами и выработке практических навыков решения задач по физической электронике, формировании умений, необходимых для успешного осуществления научно-исследовательской деятельности в области физической электроники.

2. Задачи дисциплины

1) Получение общих знаний о фундаментальных законах, физических процессах и явлениях, возникающих в электромагнитных полях, влиянии этих полей на движущиеся заряженные частицы. Усвоение методов создания электронных приборов и устройств, в которых взаимодействие электронов с электромагнитным полем используется для преобразования энергии для передачи, обработки и хранения информации.

2) освоение аспирантами основными понятиями, законами и моделями физической электроники – базовых знаний в области физической электроники, как дисциплины, интегрирующей общеприродную и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей научно-технические основы современных инновационных сфер деятельности;

3) обучение аспирантов основным подходам и методам решения задач в области физической электроники и освоение с экспериментальными и теоретическими методами исследований, применяемые в физической электронике, а также численных методов, применимых к описанию явлений в этой области физики;

4) обучение разработке адекватных моделей изучаемых объектов и определению области их применимости;

5) формирование навыков применения эффективных методов исследования физических объектов, процессов и явлений с использованием современных аналитических средств физики.

3. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры

Дисциплина «Физическая электроника» относится к базовым дисциплинам Образовательного компонента «Дисциплины (модули)» программы аспирантуры по специальности 1.3.5. Физическая электроника.

Дисциплина «Физическая электроника» реализуется в соответствии с ФГТ, ОПОП ВО и Учебного плана аспирантуры ИОФ РАН по специальности 1.3.5. Физическая электроника.

Изучение дисциплины «Физическая электроника» опирается на знания базовых разделов высшей математики, общей физики, а также начальных знаний по теоретической физике, физики полупроводников и твердого тела, физики плазмы и электроники приобретенных аспирантами в рамках освоения программ магистратуры или специалитета по естественнонаучным и техническим специальностям.

4. Требования к результатам освоения дисциплины

Изучение дисциплины «Физическая электроника» направлено на формирование у аспирантов следующих когнитивных умений и навыков:

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач в области физической электроники, а также в смежных и междисциплинарных областях;
- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области физической электроники.

В результате изучения дисциплины аспирант должен:

Знать:

- современные представления о природе основных физических явлений, о причинах их возникновения, а также представление о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук;
- методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях;
- о современном состоянии, теоретических работах и результатах экспериментов в области физической электроники, а также перспективных направлениях исследований в данной области исследований;
- перспективы развития физической электроники, а также связанные с этим передовые технологии; методы анализа и синтеза при исследовании и разработке конкретных электронных устройств;
- современные представления об электронно-физических процессах в различных средах и структурах, в том числе процессов, составляющих основу для разработок и создания электронных приборов и устройств;
- основные физические законы, явления и эффекты, основные понятия и теории, описывающие физические объекты и процессы;
- основные теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в области физической электроники;
- математические методы, позволяющие адекватно описать и объяснить конкретные физические процессы и явления;
- постановку проблем при моделировании физических процессов;
- способы и методы анализа современных физико-технических проблем;
- принципы формулировки новых задач, возникающих в ходе научных исследований и методы их решения;

- методы, средства и практику планирования, организации, проведения и внедрения
- научных исследований;
- особенности представления результатов научной деятельности в устной и письменной форме при работе в российских и международных исследовательских коллективах.

Уметь:

- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы, а также фундаментальные знания для понимания сущностных явлений окружающего мира;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- критически осмысливать и интерпретировать новейшие явления в теории и практике;
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
- вычленять факторы, наиболее существенные в тех или иных электронно- физических системах, выполнять качественные оценки и количественные расчеты физических процессов, соответствующих этим факторам, оценивать и прогнозировать важнейшие параметры электронных систем, в том числе, составляющих основу электронных приборов и устройств
- анализировать современные естественнонаучные проблемы;
- ставить задачи, разрабатывать программу исследования и проводить научные исследования поставленных проблем;
- анализировать альтернативные варианты решения исследовательских и практических задач;
- выбирать способы и методы решения исследовательских и практических задач;
- осваивать новые методы научных исследований в области физической электроники;
- при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операционализации, исходя из наличных ресурсов и ограничений;
- обосновывать применение математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов;
- выполнять теоретические и экспериментальные исследования объектов физической электроники с использованием современных программно-аппаратных комплексов;
- интерпретировать полученные результаты на основе системного научного мировоззрения;
- работать с информацией в области своей научной деятельности, полученной из различных источников: научной периодической литературы, монографий и учебников, электронных ресурсов сети Интернет;
- активно и целенаправленно применять полученные знания, навыки и умения для выбора тематики выполнения индивидуальной научно-исследовательской работы;
- применять на практике умения и навыки в организации исследовательских работ и проводить научные исследования, готовность к участию в инновационной деятельности;
- следовать нормам, принятым в научном общении при работе в российских и международных исследовательских коллективах с целью решения научных и научно-образовательных задач.

Владеть:

- навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях;
- творческим подходом в реализации научно-технических задач, основанному на систематическом обновлении полученных знаний, навыков и умений и использовании последних достижений в области физики;
- способностью планировать и осуществлять комплексные исследования на основе системного научного мировоззрения;
- навыками работы с научно-технической литературой;
- логикой научного исследования, терминологическим аппаратом научного исследования, научным стилем изложения собственной концепции;
- математическим аппаратом современной физики;
- практическими навыками решения конкретных задач;
- методологией проведения теоретических исследований;
- методами выполнения исследовательских работ;
- навыками применения современных методов математического и компьютерного моделирования физических процессов в области физической электроники;
- способностью обработки результатов физического эксперимента, а также интерпретации полученных результатов на основе системного научного мировоззрения.

5. Объем и вид учебной работы

Общая трудоёмкость дисциплины «Физическая электроника» составляет 5 зач. ед. (180 часов), их распределение по видам работ представлено в таблице 1.

Таблица 1

Распределение трудоёмкости дисциплины по видам работ

Вид учебной работы	Трудоёмкость					
	зач. ед.	час.	в т.ч. по семестрам			
			3	4	5	6
Общая трудоёмкость дисциплины по учебному плану	5	180	48	48	36	36
Аудиторная работа:	3	72	36	36	-	-
<i>лекции (Л)</i>		72	36	36	-	-
<i>семинары (С)</i>		-	-	-	-	-
Самостоятельная работа:	2	108	18	18	36	36
<i>самоподготовка (проработка и повторение лекционного материала, освоение материала учебников и учебных пособий, подготовка к семинарам и т.д.)</i>		66	16	16	34	-
<i>Подготовка к зачёту</i>		6	2	2	2	-
<i>Подготовка к экзамену</i>		36	-	-	-	36
Вид контроля (З – зачет, Э – кандидатский экзамен)			З	З	З	Э

6. Содержание дисциплины

Таблица 2

Тематический план учебной дисциплины

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего	Аудиторная работа		Внеаудиторная работа СР
		Л	С	
Раздел 1. Кинетические явления в кристаллах	52	36	0	14
Тема 1.1. Зонный спектр кристаллов	12	8	0	4
Тема 1.2. Квазичастицы	12	8	0	4
Тема 1.3. Носители заряда в магнитном поле	15	10	0	4
Тема 1.4. Кинетическое уравнение Больцмана	15	10	0	4
Подготовка к зачёту	2	0	0	2
Всего за 3 семестр	54	36	0	18
Раздел 2. Корпускулярная оптика	24	18	0	6
Тема 2.1. Законы движения заряженных частиц (электронов и ионов) в статических и переменных во времени электрических и магнитных полях	10	8	0	2
Тема 2.2. Электростатические линзы.	8	6	0	2
Тема 2.3. Электронные микроскопы.	6	4	0	2
Раздел 3. Вакуумная электроника	28	18	0	10
Тема 3.1. Методы генерирования потоков заряженных частиц	15	10	0	5
Тема 3.2. Источники СВЧ-излучения.	13	8	0	5
Подготовка к зачёту	2	0	0	2
Всего за 4 семестр	54	36	0	18
Раздел 4. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины	34	0	0	34
Эмиссионная электроника, электроника твердого тела, физические основы электроники поверхности и пленочной электроники, методы анализа поверхности и тонких пленок, функциональная электроника (разделы на выбор научного руководителя)	34	0	0	34
Подготовка к зачёту	2	0	0	2
Всего за 5 семестр	36	0	0	36
Раздел 5. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины по программе кандидатского экзамена по специальности	36	0	0	36
Подготовка к экзамену				
Всего за 6 семестр	36	0	0	36
Итого по дисциплине	180	54	18	108

Раздел 1. Кинетические явления в кристаллах

Тема 1.1. Зонный спектр кристаллов

Многочастичное уравнение Шредингера для кристалла. Приближение Борна-Оппенгеймера. Одноэлектронное приближение. Уравнение Хартри и уравнение Хартри-Фока. Зонный спектр. Периодическое пространство. Квазиимпульс, зона Бриллюэна. Теорема Блоха. Закон дисперсии и эффективная масса. Методы расчетов зонного спектра: метод псевдопотенциала, k - p – метод. Тензор эффективной массы, роль симметричных точек в зоне Бриллюэна.

Зонный спектр одномерного уравнения Шредингера с периодическим потенциалом. Операторы координаты и скорости для электронов в кристалле. Закон изменения квазиимпульса. Метод эффективной массы. «Искривление» зон во внешнем поле. Динамика электрона в случае однородного электрического поля. Решение задачи о водородоподобной примеси.

Тема 1.2. Квазичастицы

Квазичастицы. Определение, введение квазичастиц на примере идеального Ферми-газа. Поверхность Ферми. Полное число состояний в зоне Бриллюэна. Функции распределения квазичастиц и частиц, химпотенциал. Электроны и дырки в полупроводниках.

Модель Ферми-газа. Плотность состояний, особенности Ван-Хова. Эффективная масса плотности состояний. Интегралы Зоммерфельда. Температурная зависимость химпотенциала, температура вырождения. Электронная теплоемкость. Квазичастицы в идеальном Бозе-газе. Функции распределения и химпотенциал. Бозе-конденсация. Температура конденсации.

Колебания кристаллической решетки. Динамические уравнения, свойства силовой функции. Закон дисперсии. Акустические и оптические колебания. Переход к квантовому описанию. Фононы, функция распределения. Фононная теплоемкость.

Тема 1.3. Движение в магнитном поле

Движение электронов в кристалле во внешнем магнитном поле. Траектории и циклотронная масса. Квазиклассическое квантование движения в магнитном поле. Уровни Ландау. Плотность состояний. Роль экстремальных сечений поверхности Ферми. Цилиндр Ландау.

Квантовые осцилляционные явления. Эффекты де Гааза-ван Альфена и Шубникова-де Гааза. Период квантовых осцилляций по обратному полю. Движение химпотенциала в магнитном поле. Спиновое расщепление. Амплитуда осцилляций. Формула Лифшица-Косевича, температура Дингла. Использование квантовых осцилляционных эффектов для исследования поверхности Ферми.

Тема 1.4. Кинетическое уравнение Больцмана

Модель Друде: проводимость, эффект Холла, магнитосопротивление и циклотронный резонанс. Кинетическое уравнение Больцмана. Выражение для тока и потока энергии. Теорема Лиувилля. Приближение времени релаксации. Время релаксации для основных механизмов рассеяния в твердых телах (ионы примеси, колебания решетки, вакансии и точечные дефекты, дислокации, границы кристаллитов, межэлектронное рассеяние). Задача о рассеянии электрона на ионизированной примеси. Формула Конуэлл-Вайскопфа.

Решение кинетического уравнения Больцмана в вырожденном случае. Проводимость, частотная зависимость проводимости. Движение в магнитном поле, тензор проводимости и эффект Холла. Сравнение с моделью Друде.

Общее решение кинетического уравнения Больцмана в приближении времени релаксации. Продольные и поперечные эффекты. Кинетические коэффициенты. Случай изотропной и анизотропной эффективной массы. Расчет проводимости с помощью кинетического уравнения Больцмана. Температурная зависимость дрейфовой подвижности в случае рассеяния на акустических фононах и ионах примеси. Случай многодолинной изоэнергетической поверхности. Транспортная эффективная масса. Случай нескольких групп носителей заряда. Сравнение с моделью Друде.

Раздел 2

Раздел 2. Корпускулярная оптика

Тема 2.1. Законы движения заряженных частиц (электронов и ионов) в статических и переменных во времени электрических и магнитных полях.

Законы движения заряженных частиц в статических электрических и магнитных полях. Показатель преломления в корпускулярной оптике. Оптический и механический подходы при решении задач корпускулярной оптики. Законы подобия. Параксиальные пучки. Основные свойства аксиально симметричных электростатических и магнитных полей. Теорема Буша и закон сохранения углового момента. Теорема Лагранжа-Гельмгольца и ее следствия.

Динамика заряженной частицы в переменных во времени полях; движение частиц в полях электромагнитных волн, захват и ускорение, ускорение на биениях.

Тема 2.2. Электростатические линзы.

Основные типы электростатических линз. Тонкие линзы. Линза-диафрагма. Одиночная линза, иммерсионный объектив и иммерсионная линза. Магнитные линзы. Расчет фокусных расстояний. Линза Глазера. Аберрации линз.

Тема 2.3. Электронные микроскопы.

Электронные микроскопы. Общие принципы работы. Конструкции электронных микроскопов. Особенности электрооптических систем. Корпускулярные микроскопы.

Раздел 3. Вакуумная электроника

Тема 3.1. Методы генерирования потоков заряженных частиц

Формирование электронных пучков большой плотности. Пушка Пирса. Ограничение тока пространственным зарядом. Предельный ток нейтрализованных пучков – ток Пирса. Устойчивость пучков в дрейфовом пространстве, неустойчивости Пирса, диокотронная и токово-конвективная неустойчивости, слиппинг-неустойчивость.

Спонтанное и вынужденное излучение потоков заряженных частиц. Черенковское, циклотронное (синхротронное) и ондуляторное излучения. Нормальный и аномальный эффекты Доплера. Томсоновское рассеяние.

Тема 3.2. Источники СВЧ-излучения

Источники СВЧ-излучения, основанные на вынужденном излучении потоков заряженных частиц: лампа бегущей волны (ЛБВ), магнетроны, гиратроны, убитроны, виркаторы, лазеры на свободных электронах.

Волны пространственного заряда. Пространственная и энергетическая группировки потоков частиц. Нелинейные механизмы насыщения излучения – захват частиц в волнах пространственного заряда, сдвиг резонансной частоты излучения. КПД СВЧ-источников излучения.

Релятивистские эффекты, умножение частоты, параметрические усилители и генераторы.

Раздел 3. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины

Эмиссионная электроника.

1. Эмиссионная электроника, включая процессы на поверхности, определяющие явления эмиссии, эмиссионную спектроскопию и все виды эмиссии заряженных частиц.

Термоэлектронная эмиссия (ТЭЭ). Работа выхода. Основное уравнение ТЭЭ. Термоэмиссионный метод прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Вакуумный диод с термокатодом и его вольт-амперная характеристика.

Эмиссия под воздействием частиц. Взаимодействие электронов подпороговых энергий с твердым телом. Упругие взаимодействия, сечения процессов. Спектры вторичных электронов. Оже-электроны. Электронно-стимулированная десорбция.

Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. Распыление. Механизмы распыления. Формула Зигмунда для коэффициента распыления. Вторичная ионная эмиссия. Коэффициент вторичной ионной эмиссии. Рассеяние ионов низких и средних энергий. Обратное Резерфордское рассеяние. Ионно-электронная эмиссия. Потенциальная и кинетическая эмиссия. Ионно-фотонная эмиссия.

Фотоэлектронная эмиссия. Трехступенчатый механизм эмиссии.

Автоэлектронная, экзоэлектронная и взрывная эмиссия.

Электроника твердого тела

1. Физические основы электроники твердого тела.

Энергетический спектр электрона в ограниченном кристалле. Условия локализации. Локализованные состояния Тамма. Поверхностные состояния Шокли. Особенности энергетического спектра электронов в тонких пленках (квантовый размерный эффект).

Типы точечных дефектов в кристаллах. Акцепторные и донорные примеси в полупроводниках. Водородоподобная модель примесного центра.

Статистика носителей заряда в полупроводниках. Статистика примесных состояний. Невырожденные и вырожденные полупроводники. Электрохимический потенциал и концентрация свободных и связанных носителей в собственном, примесном и компенсированном полупроводниках.

Электропроводность в сильных электрических полях. Эффект Ганна. Классический и квантовый размерный эффекты в электропроводности.

2. Электропроводность в неупорядоченных полупроводниках.

Неупорядоченные полупроводники. Понятие идеального аморфного твердого тела (идеального стекла). Случайная структура и случайное поле. Энергетический спектр неупорядоченных систем (без случайного поля и со случайным полем). Дефекты в аморфных материалах.

Электропроводность в неупорядоченных системах. Прыжковая проводимость по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми (закон Мотта) и хвостах плотности состояний вблизи краев щели подвижности.

3. Неравновесные носители заряда в полупроводниках.

Неравновесные носители заряда в полупроводниках и диэлектриках. Генерация и рекомбинация. Механизмы рекомбинации.

Диффузия и дрейф неравновесных носителей, соотношение Эйнштейна. Плотность тока и градиент уровня Ферми. Уравнение непрерывности, анализ частных случаев локального возбуждения и инъекции.

4. Контактные явления в полупроводниках.

Различные типы контактов. Контакт твердое тело – вакуум. Контакт металл – полупроводник. Диоды Шоттки. Диодная и диффузионная теории выпрямления.

Электронно-дырочный переход. Количественная теория инъекции и экстракции неосновных носителей. Выпрямление и усиление с помощью р-п переходов. Статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) р-п перехода. Туннельный эффект в р-п переходах.

Основные представления о полупроводниковых гетеропереходах, их применение.

5. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках

Поглощение и испускание света полупроводниками. Механизмы поглощения. Поглощение и отражение электромагнитных волн свободными носителями заряда. Поглощение и излучение при оптических переходах зона-зона. Прямые и не прямые переходы. Разрешенные и запрещенные переходы. Спектральные характеристики поглощения кристаллами.

Спонтанное и вынужденное излучение. Полупроводниковые лазеры. Оптические свойства аморфных полупроводников. Фотоэффект в p-n переходах. Солнечные батареи. Преобразование электрических сигналов в световые.

6. Нанoeлектроника.

Нанoeлектроника. Квантовые ямы и сверхрешетки. Квантовые нити и квантовые точки. Электронные состояния в наноструктурах. Транспортные явления в низкоразмерных системах. Оптические свойства наноструктур. Одноэлектронные явления в нанoeлектронных устройствах. Нанотехнология. Приборы нанoeлектроники.

Физические основы электроники поверхности и пленочной электроники

1. Физические основы электроники поверхности и пленочной электроники.

Энергетическая диаграмма реальной поверхности. Поверхностные состояния. Эффект поля и поверхностная проводимость. Влияние адсорбированных частиц на поверхностную проводимость. Полевые транзисторы.

Проблема микроминиатюризации элементов микроэлектроники. Полупроводниковые, пленочные и гибридные интегральные схемы. Фотолитография, рентгеновская и электронная литографии.

Особенности структуры пленок, связанные с характером зарождения.

Текстурированные и эпитаксиальные пленки. Структурные несовершенства.

Явления переноса в тонких металлических пленках. Дисперсные пленки. Сплошные пленки. Размерные эффекты в пленках.

Тонкие диэлектрические и полупроводниковые пленки. Диэлектрические потери.

Токопрохождение через диэлектрические слои. Туннелирование. Надбарьерная эмиссия электронов. Токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ).

Пленочные активные элементы. Использование неравновесных (горячих) электронов в металлических пленках. Активные элементы, основанные на использовании характеристик с отрицательным сопротивлением. Аналоговые триоды на основе ТОПЗ в диэлектриках. Пленочный полевой триод.

2. Методы анализа поверхности и тонких пленок

Методики определения плотности поверхностных состояний, основанные на эффекте поля (C-V метод и метод, основанный на изменении поверхностной проводимости).

Основы энергоанализа заряженных частиц. Основные типы энергоанализаторов. Методы регистрации частиц. Вторичный электронный умножитель. Детекторы для быстрых частиц (поверхностно-барьерный детектор).

Дифракция медленных и быстрых электронов (на просвет и отражение) как методы исследования структуры поверхности.

Электронная Оже-спектроскопия. Основное уравнение. Методы количественной Оже-спектроскопии.

Фотоэлектронная спектроскопия (ФЭС и УФЭС). Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС или ЭСХА – электронная спектроскопия для химического анализа) и конструкции приборов. Химические сдвиги уровней. Количественная РФЭС.

Спектроскопия характеристических потерь энергии (СХПЭЭ). Конструкции приборов. Одночастичные и многочастичные возбуждения электронов в твердом теле. Количественная СХПЭЭ.

Растровая электронная микроскопия. Режимы работы. Особенности формирования контраста. Рентгеновский микроанализ. Конструкции растровых электронных микроскопов и микроанализаторов.

Туннельная и атомно-силовая микроскопия. Физические основы. Конструкция микроскопов. Применения.

Методы ионной спектроскопии. Масс-спектрометрия вторичных ионов (МСВИ). Стигматический и растровый режим МСВИ. Ионно-нейтрализационная спектроскопия. Обратное резерфордское рассеяние. Спектроскопия рассеяния ионов низких и средних энергий.

Функциональная электроника

Магнетоэлектроника. Цилиндрические магнитные домены. Магнитные запоминающие устройства: на ферритах и на тонких пленках.

Акустоэлектроника: взаимодействие электронов с длинно-волновыми акустическими колебаниями решетки, акустоэлектрический эффект, усиление ультразвуковых волн. Акустоэлектрические явления на поверхностных волнах и их практические применения – малогабаритные линии задержки, усилители и генераторы электрических колебаний.

Молекулярная электроника. Основные принципы молекулярной электроники. Электронные возбуждения, используемые для передачи и хранения информации в молекулярных системах. Перспективы одномерных и квазиодномерных систем, структурная неустойчивость одномерных проводников, переходы Пайерлса и Мотта-Хаббарда. Электронные возбуждения в одномерных системах, солитонная проводимость. Фотопроводимость, нелинейные оптические свойства. Молекулярные полупроводники - полиацетилен и полидиацетилен: структура, свойства, легирование. Приборы молекулярной электроники.

Криоэлектроника. Электронные свойства твердых тел (металлы, диэлектрики, полупроводники при низких температурах. Явление сверхпроводимости. Эффект Мейснера. Особенности туннелирования в условиях сверхпроводимости.

Высокотемпературная сверхпроводимость. Свойства и параметры сверхпроводников с высокой T_k .

Макроскопические квантовые эффекты сверхпроводимости. Квантование магнитного потока. Эффект Джозефсона. Типы Джозефсоновских переходов. Аналоговые устройства на эффектах Джозефсона. Стандарты напряжения, сквиды, СВЧ приемные устройства.

Цифровые ячейки логики и памяти. Проблемы создания больших интегральных схем (БИС). Особенности электронных устройств на высокотемпературных сверхпроводниках.

Дополнительный перечень вопросов для самостоятельного изучения дисциплины «Физическая электроника» формируется научным руководителем аспиранта и утверждается аспирантской комиссией.

Раздел 4. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины по программе кандидатского экзамена по специальности

Перечень вопросов для самостоятельного изучения дисциплины «Физическая электроника» при подготовке к кандидатскому экзамену по специальности соответствует программе кандидатского экзамена по специальности «Физическая электроника», утвержденной Ученым советом ИОФ РАН (протокол №__ от «__» _____ 20__ г.).

7. Примерная тематика:

7.1. Курсовых работ

Не предусмотрено учебным планом

7.2. Научно-исследовательских работ и проектов

Не предусмотрено учебным планом

7.3. Рефератов

Не предусмотрено учебным планом

8. Ресурсное обеспечение.

8.1. Кадровый потенциал

Аспирантура ИОФ РАН располагает кадровыми ресурсами, гарантирующими качество подготовки аспиранта по специальности 1.3.5. Физическая электроника в соответствии с ФГТ.

8.2. Материально-техническое оснащение.

Для проведения занятий по дисциплине «Физическая электроника», предусмотренной учебным планом подготовки аспирантов, имеется необходимая материально-техническая база, соответствующая действующим санитарным и противопожарным правилам и нормам, обеспечивающая проведение всех видов теоретической и практической подготовки:

- аудитории для лекционных и семинарских занятий, оснащенные презентационным оборудованием (ноутбук, проектор, экран) и маркерными досками;
- оборудование для проведения лекционных и семинарских занятий в дистанционном формате (в случае необходимости);
- лицензионное программное обеспечение для демонстрации презентаций в формате PowerPoint, OpenOffice или Portable Document Format, а также современный формат Computable Document Format (CDF) for Interactive Content.
- учебная литература и методические материалы для проведения самостоятельной работы по дисциплине.

Есть возможность использовать стандартные пакеты компьютерной математики для решения физико-математических и физико-технических задач, а также представления полученных решений с использованием средств компьютерной графики.

Стандартные пакеты для инженерных расчетов:

- Лицензионная программа MATLAB (на компьютерный класс)
- Лицензионная программа Mathematica 8
- Лицензионная программа Visual Studio .NET, 2005, 2008, 2010
- Лицензионная программа Intel® Fortran Composer XE (академич)
- Лицензионная Программа КАРАТ (автор: Тараканов В.П.).

Авторские программные пакеты, разработанные сотрудниками ИОФ РАН.

8.3. Образовательные технологии

При реализации различных видов учебной работы (лекции, семинары, самостоятельная работа) используются следующие современные образовательные технологии:

- лекционная система обучения;
- информационно-коммуникационные технологии;
- исследовательские методы в обучении.

Программа дисциплины «Физическая электроника» предусматривает широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий в сочетании с внеаудиторной самостоятельной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков у обучающихся. Эффективность применения интерактивных форм обучения обеспечивается реализацией следующих условий:

- создание диалогического пространства в организации учебного процесса;
- использование принципов социально-психологического обучения в учебной и научной деятельности;

- применение интерактивных форм обучения, направленных на развитие внутренней активности аспиранта, стимулирование мотивации и интереса в области углубленного изучения теоретической физики в общеобразовательном и профессиональном плане; повышение уровня активности и самостоятельности научно-исследовательской работы; развитие навыков анализа, критичности мышления, научной коммуникации.

Образовательные технологии предполагают проведение занятий в форме лекций с объяснением теоретического материала, семинаров с разбором лекционного материала и решением задач и самостоятельную работу. Самостоятельная работа аспирантов проводится в форме изучения отдельных теоретических вопросов по предлагаемой литературе и самостоятельного решения задач с дальнейшим их разбором или обсуждением на аудиторных занятиях.

На занятиях может использоваться промежуточный контроль в виде решения задач по лекционному и семинарскому материалу.

9. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

9.1. Основная литература

9.1.1. Электронные учебные издания (учебники, учебные пособия).

9.1.2. Электронные базы данных, к которым обеспечен доступ.

- Интернет-ресурсы научно-технической библиотеки ИОФ РАН
<https://www.gpi.ru/about/library/education/>
- Научная электронная библиотека elibrary.ru;
- Электронные базы Web of Science и SCOPUS;
- Журналы по физике (Успехи физических наук, ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ, Физика твердого тела, Физика плазмы, Nature, New Journal of Physics, Physical Review Letters, Physical Review и др.;
- Научные и научно-технические журналы издательств American Physical Society, American Institute of Physics, Institute of Physics, Nature, Springer Verlag, база данных Web of Science.

9.1.3. Учебники

1. Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика, Наука, Л., 1968, 486 с.
2. Голдстейн Дж. И др. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ, кн. 1 и 2, Мир, 1984.
3. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии, М., Мир, 1985, 494 с.
4. Жеребцов И.П. Основы электроники, Л., Энергоатомиздат, 1985.
5. Добрецов Л.Н., Гомаюнова М.В. Эмиссионная электроника, М., Наука, 1966.
6. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц, М., Мир, 1984, 432 с.
7. Рухадзе А.А. и др. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков, М., Атомиздат, 1980.
8. Маршалл Т. Лазеры на свободных электронах, М., Мир, 1987, 238 с.
9. Епифанов Е.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника, М., Высшая школа, 1986, 303 с.
10. Гусева М.Б., Дубинина Е.М. Физические основы твердотельной электроники, М., МГУ, 1986, 311 с.
11. Аморфные полупроводники. Под ред. М. Бродски, М., Мир, 1982.
12. Чопра К.Л. Электрические явления в тонких пленках, М., Мир, 1972, 435 с.
13. Палатник Л.С., Папилов И.И. Эпитаксиальные пленки, М., Наука, 1971, 480 с.
14. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах, М., Мир, 1973.
15. Методы анализа поверхности. Под ред. Зандерны А., М., Мир, 1979, гл.3,4,5.

16. Афанасьев В.П., Явор С.Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц, Наука, 1978.
17. Электронная и ионная спектроскопия твердого тела. Под. Ред. Фирменса Л., М., Мир, 1981.
18. Анализ поверхности методами Оже и РФЭС. Под ред. Бригса А. И Сиха М.В., м., Мир, 1987.
19. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Физические основы конструирования и технологии РЭА и ВЭА, М., Советское радио, 1979, 352 с.
20. Ван Дузер Т., Тренер Ч.У. Физические основы сверхпроводящих устройств и цепей, М., Радио и связь, 1984.
21. Гинзбург В.Л. Сверхпроводимость позавчера, вчера, сегодня, завтра. Успехи физических наук, т. 170 , с. 619-630 (2000).
22. Максомов Е.Г. Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Современное состояние. Успехи физических наук, т. 170, с. 1033-1061 (2000).
23. Шмидт. Введение в физику сверхпроводимости. МЦ. МНО. Москва, 2000.

9.1.4. Учебные пособия

1. Александров А.Ф., Кузелев М.В. Теоретическая плазменная электротехника. МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, 167 с.

9.2. Дополнительная литература

1. Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника, 2018 г Ленанд, 624 с
2. Епифанов Е.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. М.: Высш. Шк., 1986.
3. Сушков А.Д. Вакуумная электроника. Физико-технические основы. С-Пб: Изд. Лань, 2004.
4. Куделев М.В. Плазменная релятивистская СВЧ электроника. М.: МГТУ им. Баумана, 2002.
5. В.Е. Борисенко, А.Л. Данилюк, А.И.Воробьева, Е.А.Уткина, Нанoeлектроника: Теория и практика (Бином, М., 2013).
6. Бинниг Г., Рорер Г. Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения к юности, УФН. 1988, т.154, вып.
7. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Вынужденное излучение сильнооточных релятивистских электронных пучков. УФН, 1987, т.152, вып.2, 285-316 с.
8. Основы силовой электроники: от азов к вершинам мастерства / Шустов М. А. - Москва: Наука и техника, 2017. - 335 с.
9. В.Ю. Е. Бабичев, Электротехника и электроника. Ч.1. Электрические, электронные и магнитные цепи / Ю. Е. Бабичев. - Москва : Горная книга, 2007. - ISBN 978-5-91003021-7 : Б. ц. ЭБС ЛАНЬ
10. 5. С. Э. Фриш, Оптические спектры атомов / С. Э. Фриш. - Москва : Лань, 2010. - 644 с.
11. А. Г. Фурсей, Автоэлектронная эмиссия / А. Г. Фурсей. - Москва : Лань, 2012. - 320с.
12. К. Шимони. Физическая электроника. Москва, "Энергия", 1977.
13. Д.И. Трубецков, А.Г. Рожнёв, Д.В. Соколов. Лекции по сверхвысокочастотной вакуумной микроэлектронике. Саратов.- Изд-во ГосУНЦ "Колледж", 1996.
14. Л.А. Вайнштейн, В.А. Солнцев. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. Сов.радио, 1973.

9.2.1. Учебно-методические пособия (учебные задания)

1. Щука А. А. Электроника. Учебное пособие / Под ред. проф. А. С. Сигова. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 800 с.: ил.

9.2.2. Литература для углубленного изучения, подготовки рефератов

10. Аттестация по дисциплине. Форма промежуточной аттестации по итогам обучения в 3, 4 и 5 семестрах – зачет, процедура аттестации в 3 и 4 семестрах включает решение контрольных задач и ответ на вопросы, в 5 семестре – ответ на вопросы.

Итоговая аттестация по дисциплине включает сдачу кандидатского экзамена экзаменационной комиссии, утвержденной локальным нормативным актом ИОФ РАН.

11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

11.1 Оценочные средства текущего контроля успеваемости и сформированности компетенций

Для текущего контроля успеваемости применяется комплекс методик и диагностического инструментария: устный опрос, решение домашних задач по теме занятий, учет посещаемости занятий и активности аспирантов в ходе занятий.

11.2 Примерный перечень вопросов к зачету по дисциплине

- 1 Энергетическая модель атомов и твердых тел. Зонная модель твердого тела. Электроны в металлах, диэлектриках, полупроводниках.
- 2 Электрический ток в высоком вакууме при незначительном объемном заряде. Конвекционный и наведенный ток при перемещении электрона в междуэлектродном пространстве.
- 3 Термоэлектронная эмиссия: распределение электронов по скоростям Максвелла-Больцмана и Ферми-Дирака.
- 4 Траектории заряженных частиц в однородном электрическом поле. Пример.
- 5 Работа выхода: силы ее определяющие (пример). Поверхностный потенциальный барьер (определение формы и величины).
- 6 Траектории заряженных частиц в однородном магнитном поле. Пример.
- 7 Вывод закона эмиссии. Закон Ричардсона-Дешмэна. Закон начальных токов диода. Экспериментальное определение распределения электронов по скоростям методом задерживающего поля.
- 8 Траектории заряженных частиц в скрещенных электрических полях. Пример.
- 9 Типы катодов и их эмиссионные константы. Металлические катоды. Их зонная энергетическая модель.
- 10 Основы геометрической электронной оптики. Преломление электронного луча в электрическом отклоняющем поле. Преломление электронного луча в плоскопараллельном электрическом двойном слое. Закон электронного оптического преломления.
- 11 Пленочные катоды. Структурная и зонная- энергетическая модели.
- 12 Уравнения для фокусных расстояний сферического электрического двойного слоя. Фокусные расстояния электронных линз и их экспериментальное определение. Условия применимости законов электронной оптики. Увеличение с помощью электронных линз
- 13 Оксидные катоды- энергетическая зонная и структурная модели. Их применение. Катоды прямого и косвенного накала.
- 14 Электростатические электронные линзы. Их классификация и разновидности. Магнитные электронные линзы. Их классификация. Искажения в электронных линзах.
- 15 Фотоэлектронная эмиссия. Внутренний и внешний фотоэффект. Законы Столетова и Эйнштейна. Энергетическая зонная модель металлических фотокатодов. Чувствительность

фотокатодов. Утомление фотокатодов.

16 Электростатическое и магнитное отклонение луча (достоинства и недостатки).Э.Л.Т. (устройство). Люминесцентный экран. Зонная энергетическая модель люминофора. устройство, работа, применение.

17 Вторичная электронная эмиссия.

18 Электрический ток при ионизации электронным ударом.

Усиление тока. Образование Таунсендовских лавин.

19 Автоэлектронная эмиссия. Ее зонная энергетическая модель.

20 Усиление тока за счет дополнительного образования носителей заряда при ионизации ударами ионов в газоразрядном промежутке и в результате бомбардировки катода ионами.

21 Электрический ток в вакууме. Механизм ограничения тока объемным зарядом.

Уравнение Пуассона.

22. Условия зажигания разряда. Закон Пашена. Полная характеристика газового разряда.

23 Закон трех вторых. Реальный вакуумный диод.

24. Глеющий разряд, катодное падение потенциала. Стабилитрон. Тиратрон.

Индикаторные приборы: неоновые лампы, знаковые индикаторы, вакуумные люминесцентные, электролюминесцентные и жидкокристаллические.

25 Вакуумный диод, его характеристики и применение

26 Влияние реактивных параметров триода на работу колебательной системы. Требования к лампам, предназначенные для работы в СВЧ-диапазоне. Конструктивные особенности триодов СВЧ.

27 Вакуумный триод. Уравнения статической и динамической характеристики.

Межэлектродные соединения звездой и треугольником. Определение действующего напряжения.

28. Методы генерирования и усиления колебаний на СВЧ. Время и угол пролета электронов. Отбор энергии от электрического потока. Управление электронным потоком. Триоды СВЧ их характеристики и применение.

29 Применение триода: Усиление тока, напряжения, мощности. Недостатки триода.

30. Элементарная теория пролетного двухрезонаторного клистрона. Основные характеристики: Коэффициент взаимодействия с полем резонатора, параметр группировки электронного луча клистрона. Многорезонаторные пролетные усилительные клистроны.

31 Тетрод. Характеристики, достоинства и недостатки.

32 Отражательный клистрон. Кинетическая теория группировки электронов. Электронная настройка. Амплитудная и частотная модуляция. Характеристика и применение.

33 Лучевой тетрод. Характеристики, достоинства и недостатки.

34 Приборы СВЧ со скрещенными полями. Многорезонаторные магнетроны. Принцип действия магнетрона. Движение электронов в статическом магнетроне. Резонансная система магнетрона. Взаимодействие электронного потока СВЧ полем. Конструкция магнетрона.

35. Пентод Характеристики, достоинства и недостатки.

36 Лампа бегущей волны типа «О». Принцип действия, характеристики, применение.

Лампа обратной волны типа «О». Принцип действия, характеристики, применение.

11.3 Примерный перечень задач к зачету по дисциплине

1. В однородное тормозящее электрическое поле $E = 5,39 \times 10^3 \text{ В/м}$ влетает электрон с энергией 100 эВ. Угол между направлением начальной скорости электрона и электрическим полем равен α . Через $5 \cdot 10^{-9}$ с электрон достигает точки посадки на электрод, в которой его скорость перпендикулярна электрическому полю. Найти угол α и энергию, с которой электрон попадает на электрод.

2. В расположенном горизонтально плоском конденсаторе с расстоянием между пластинами $d = 10$ мм находится заряженная макрочастица. В отсутствии напряжения между обкладками конденсатора макрочастица падает вниз с постоянной скоростью $v_1 =$

0,078 мм/с. После подачи на пластины конденсатора напряжения $U = 95$ В, макрочастица движется равномерно вверх со скоростью $v_2 = 0,016$ мм/с. Определить удельный заряд этой макрочастицы.

3. Найти разность потенциалов U , которую нужно приложить к обкладкам цилиндрического конденсатора с радиусами обкладок $R_1 = 100$ мм и $R_2 = 120$ мм для того, чтобы он пропускал ионы с энергией $W = 3,0$ кэВ.

4. Чему равна сила F , действующая на инжектор ионов Hg^+ , если ток ионов ртути равен $I = 1,0$ А? Атомная масса атома ртути равна 200 а.е.м. Энергия ионов Hg^+ на выходе из инжектора равна $W = 10$ кэВ.

5. За какое время τ работы электромагнитного масс-сепаратора будет накоплен $m = 1,0$ г изотопа ^{112}Cd , если ионы Cd являются двухзарядными, а ток этих ионов равен $I = 1,0$ А?

6. Магнитная линза образована короткой магнитной катушкой, имеющей 10 витков, по которой течет ток $I = 10$ А. Найти оптическую силу магнитной линзы для электронов с энергией 1 кэВ, если средний диаметр катушки 50 мм.

7. Какое напряжение нужно приложить к плоскому диоду с катодом из вольфрама для того, чтобы ток, текущий через диод, достиг насыщения? Температура катода равна $T = 3200^\circ C$, расстояние между катодом и анодом составляет $d = 5$ мм.

8. Найти коэффициент прозрачности барьера на границе металл — вакуум для молибдена, если постоянная Ричардсона $A = 55$ А/(см²·К²), а температурный коэффициент работы выхода $\alpha = 7,8 \cdot 10^{-5}$ В/К.

12. Методические рекомендации аспирантам по освоению дисциплины

Аспиранты должны быть заранее ознакомлены с графиком учебного процесса, содержанием дисциплины и методикой проведения занятий. Посещаемость учебных занятий является обязательной для обучающихся, как и ведение конспектов, записей. Отработка пропущенных занятий предполагает самостоятельную работу аспиранта с учебной литературой и осуществляется в форме собеседования по теме пропущенного занятия.

13. Методические рекомендации преподавателям по организации обучения по дисциплине

13.1 Порядок проведения лекции

Вводная часть включает формулировку темы лекции с краткой аннотацией предлагаемых для изучения вопросов, характеристику места и значения данной темы в курсе.

Основная часть лекции имеет своей целью раскрытие содержания основных вопросов и определяется логической структурой плана лекции.

В *заключительной части* лектор проводит обобщение наиболее важных и существенных вопросов, делает выводы, отвечает на вопросы слушателей, формулирует задачи для самостоятельной работы аспирантов и рекомендует соответствующую литературу.

13.2 Порядок проведения семинара

Во вводной части решаются организационные задачи семинарского занятия: проверка готовности аудитории и подготовленности аспирантов к занятию, формулировка темы, цели и задач занятия.

Основная часть занятия предполагает организацию дискуссии: постановку проблемы, выделение основных направлений. Выступление докладчиков, раскрывающих основные положения по вопросу. Выступления оппонентов, раскрывающих свое видение проблемы, дискуссия по докладу.

В заключительной части подводятся итоги занятия, дается оценка результатов работы аспирантов.

13.3 Организация самостоятельной работы аспирантов

Основными формами самостоятельной работы и контроля аспирантов являются:

Выполнение индивидуальных заданий (как репродуктивного, так и творческого характера), позволяющих диагностировать уровень сформированности у аспирантов знаний, умений и навыков по дисциплине.

Собеседование – форма учебной деятельности, специальная беседа преподавателя с аспирантом, рассчитанная на выяснение объема знаний аспиранта по определенному разделу, теме, проблеме и т.п., позволяющая оценить их умение аргументировать собственную точку зрения, предполагающее всестороннее обсуждение какого-либо вопроса, проблемы или сопоставлении информации, идей, мнений, предложений.

14. Описание критериев оценивания знаний обучаемых, шкал их оценивания

14.1. Критерии оценивания знаний обучаемых на зачете по дисциплине:

Оценка «Зачтено»: Обучающийся обнаружил знание основного учебно-программного материала в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по специальности, справился с выполнением заданий и контрольных работ, предусмотренных программой дисциплины.

Оценка «Не зачтено»: Обучающийся обнаружил значительные пробелы в знаниях основного учебно-программного материала, допустил принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий и не способен продолжить обучение или приступить по окончании аспирантуры к профессиональной деятельности без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

14.2. Критерии оценивания знаний обучаемых на кандидатском экзамене по специальности:

Оценка ставится по каждому из вопросов кандидатского экзамена по специальности, оценка за экзамен определяется как среднее арифметическое из оценок по трем вопросам экзамена с соответствующим округлением до целочисленной по правилам арифметических операций. При наличии оценки «неудовлетворительно» по одному из вопросов ставится общая оценка «неудовлетворительно».

Оценка «Отлично»: В ответе качественно раскрыто содержание темы. Ответ хорошо структурирован. Прекрасно освоен понятийный аппарат. Продемонстрирован высокий уровень понимания материала. Продемонстрировано превосходное умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Представлены полные ответы на дополнительные вопросы по теме.

Оценка «Хорошо»: Основные вопросы темы раскрыты. Структура ответа в целом адекватна теме. Хорошо освоен понятийный аппарат. Продемонстрирован хороший уровень понимания материала. Продемонстрировано хорошее умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Представлены частичные ответы на дополнительные вопросы по теме.

Оценка «Удовлетворительно»: Тема раскрыта частично. Ответ структурирован недостаточно. Понятийный аппарат освоен частично. Продемонстрировано понимание отдельных положений из материала по теме. Продемонстрированы удовлетворительное умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Представлены фрагментарные ответы на дополнительные вопросы по теме.

Оценка «Неудовлетворительно»: Тема не раскрыта. Ответ не структурирован. Понятийный аппарат освоен в недостаточном объеме. Понимание материала фрагментарное или отсутствует. Продемонстрировано неумение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Не представлены ответы на дополнительные вопросы по теме.

Программу разработали:

Гусейн-заде Н.Г., д.ф.-м.н., профессор

(подпись)

Глушков В.В., д.ф.-м.н., доцент

(подпись)