

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ЛЭТИ» ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)

Утверждаю.
Проректор по учебной работе
Павлов В.Н.
2018 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
дисциплины
«ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ»
для подготовки аспирантов по направлению
03.06.01 – «Физика и астрономия»
по направленности
«Физика полупроводников»

Санкт-Петербург

2018

СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

№№ учебных планов:	8903100
Обеспечивающий факультет:	ФЭЛ
Обеспечивающая кафедра:	МНЭ
Общая трудоемкость (ЗЕТ)	3
Курс	4
Семестр	8
Виды занятий	
Лекции (академ. часов)	2
Все аудиторные (контактные) занятия (академ. часов)	2
Самостоятельная работа (академ. часов)	106
Всего (академ. часов)	108
Вид промежуточной аттестации	
Экзамен (семестр)	8

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры МНЭ 14.06.2018, протокол № 5/18.

Рабочая программа рассмотрена и одобрена учебно-методической комиссией факультета ФЭЛ 15.06.2018, протокол № 4/18.

АННОТАЦИЯ ДИСЦИПЛИНЫ
«ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ»

Предусматривает изучение физические основы теоретической физики и специальных разделов физики полупроводников. К ним относятся следующие: структура и симметрия полупроводниковых кристаллов, методы расчета зонной полупроводников, полупроводниковые наногетероструктуры и методы расчета их энергетического спектра.

SUBJECT SUMMARY
"PHYSICS OF CONDUCTORS"

The course covers physical foundations of theoretical physics and special-governmental sections of Semiconductor Physics. These include the following: the structure and symmetry of semiconductor crystals, methods of calculating the band semi-conductors, semiconductors nanoheterostructures and methods of calculation of energy-energy spectrum.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Изучение физических процессов в объемных полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах
2. Формирование умения проводить теоретический анализ и компьютерное моделирование физических процессов, лежащих в основе работы полупроводниковых приборов.
3. Владеть навыками анализа физических и химических процессов, лежащих в основе работы технологического оборудования для производства полупроводников.

Перечень компетенций, в формировании которых участвует дисциплина, приведен в матрице компетенций, прилагаемой к ООП.

Настоящая программа составлена на основе «Программы кандидатских экзаменов по истории и философии науки, иностранному языку и специальным дисциплинам», утвержденной приказом Минобрнауки России от 8 октября 2007 г. № 274 (зарегистрирован Минюстом России 19 октября 2007 г., регистрационный № 10363).

МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Дисциплина «Физика полупроводников» относится к вариативной части ООП. Дисциплина изучается на основе ранее освоенных дисциплин учебного плана:

1. «Специальные разделы физики»
2. «Специальные вопросы физики полупроводников»;

и обеспечивает подготовку выпускной научной квалификационной работы (диссертации).

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Введение (2 академ. час)

Роль полупроводников в развитии науки и техники. Перспективы и тенденции развития полупроводниковых приборов.

Раздел 1. ОСНОВЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Тема 1. Классическая механика (7 академ. часов)

Функция Лагранжа для системы с конечным числом степеней свободы. Принцип наименьшего действия. Уравнения Лагранжа. Функция Гамильтона. Уравнения Гамильтона. Законы сохранения энергии и импульса.

Тема 2. Электродинамика (7 академ. часов)

Электромагнитное поле в вакууме. Напряженности и индукции электрического и магнитного полей. Потенциалы электромагнитного поля. Уравнения Максвелла в вакууме в присутствии внешних зарядов и токов. Закон сохранения энергии. Плотность и поток энергии электромагнитного поля. Плоские электромагнитные волны в вакууме. Частота, волновой вектор и поляризация электромагнитных волн. Дисперсия электромагнитных волн в вакууме. Элементы квантовой теории электромагнитного поля. Фотоны.

Электромагнитное поле в веществе. Макроскопические уравнения Максвелла в среде. Материальные уравнения. Диэлектрическая и магнитная проницаемости, удельная проводимость среды. Диэлектрическая восприимчивость среды с учетом эффектов запаздывания и диссипации энергии. Частотная дисперсия диэлектрической проницаемости. Вещественная и мнимая части диэлектрической проницаемости. Соотношения Крамерса-Кронига. Плоские электромагнитные волны в однородной изотропной, немагнитной среде. Комплексный показатель преломления. Оптические характеристики среды.

Тема 3. Квантовая механика (7 академ. часов)

Уравнение Шредингера. Стационарные состояния. Дискретный и непрерывный спектр энергий. Электрон в потенциальной яме. Гармонический осцил-

лятор. Атом водорода. Квантовые числа и волновые функции. Спин электрона. Многоэлектронные системы и принцип Паули. Приближение Хартри и Хартри-Фока. Теория возмущений. Переходы под влиянием периодического возмущения. Золотое правило Ферми.

Тема 4. статическая физика (7 академ. часов)

Большое каноническое распределение Гиббса. Химический потенциал. Распределение Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна для идеальных газов. Переход к классическому распределению Больцмана. Вырожденный электронный газ. Излучение абсолютно черного тела.

Раздел 2. ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Тема 5. Структура и симметрия кристаллов (7 академ. часов)

Трансляционная симметрия кристаллов. Решетка Браве. Элементарная ячейка. Точечная симметрия кристаллов – симметрия направлений. Функции, периодические с периодом решетки, и их фурье-представление. Обратная решетка. Зона Бриллюэна.

Тема 6. Макроскопические свойства твердых тел (7 академ. часов)

Тензорное описание физических свойств кристаллов. Материальные тензоры. Инвариантность материальных тензоров относительно точечной группы симметрии кристалла. Поляризация и электропроводность твердых тел. Тензоры диэлектрической проницаемости и удельной проводимости. Эффект Холла в кристаллах. Тензор холловской проводимости. Упругие свойства кристаллов. Тензор механических напряжений и тензор деформаций. Упругие волны в кристаллах. Пьезоэлектрический и электрооптический эффекты в кристаллах.

Тема 7. Колебания атомов в твердых телах (7 академ. часов)

Гармоническое приближение в теории колебания решетки. Преобразование Фурье для функций заданных на решетке. Динамическая матрица. Собственные колебательные моды. Волны в одномерной цепочке с одним и двумя различными атомами в элементарной ячейке. Дисперсия акустических и оптических мод. Колебательные спектры трехмерных кристаллов. Квантовая теория колебания решетки. Фононы.

Тема 8. Зонная структура твердых тел (7 академ. часов)

Одночастичное приближение в физике твердого тела. Уравнение Шредингера для электрона в периодическом поле. Волновой вектор электрона. Теорема Блоха. Зонная структура твердых тел в приближение слабой и сильной связи. Схема расширенных и приведенных зон.

Принцип Паули и заполнение одночастичных состояний электронами при $T=0$. Уровень Ферми. Свойства полностью заполненных зон. Диэлектрики, полупроводники, металлы. Свойства частично заполненных зон в полупроводниках. Электроны и дырки. Квазиклассическая динамика электронов и дырок во внешних полях. Эффективная масса носителей заряда.

Раздел 3. ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Тема 9. Кристаллическая структура полупроводников (7 академ. часов)

Полупроводниковые кристаллы со структурой алмаза, сфалерита и вюрцита. Их точечная симметрия. Прямая и обратная решетки. Зоны Бриллюэна.

Тема 10. Зонная структура полупроводников (7 академ. часов)

Дисперсия электронов в направлениях и точках высокой симметрии в зоне Бриллюэна. Кр-теория возмущений. Зонные параметры. Эффективная масса. Прямозонные и непрямозонные многодолинные полупроводники. Зонная структура кубических полупроводников Ge, Si и A^3B^5 без учета и с учетом спина и спин-орбитального взаимодействия. Зона легких и тяжелых дырок. Кратность вырождения в точках экстремума.

Плотность энергетических состояний в зонах. Эффективная масса плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне кубических полупроводников.

Тема 11. Приближение эффективной массы (7 академ. часов)

Метод огибающих волновых функций в теории полупроводников. Эффективный кр-гамильтониан. Мелкие примеси и экситоны в приближении эффективной массы. Водородоподобная модель.

Квантово-размерные полупроводниковые гетероструктуры в приближении эффективной массы. Квантовые ямы, проволоки, точки, сверхрешетки. Эффективные кр-гамильтонианы для электронов и дырок. Уровни (подзоны) размерного квантования и огибающие волновые функции носителей заряда. Плотность энергетических состояний в 0-D, 1-D и 2-D системах.

Тема 12. Оптические свойства полупроводников (6 академ. часов)

Связь коэффициента поглощения с вероятностью оптических переходов. Золотое правило Ферми. Оптические переходы с участием мелких водородоподобных примесей в полупроводниках. Вероятность процессов фотовозбуждения и фотоионизации. Спектр примесного поглощения.

Край собственного поглощения полупроводников. Прямые оптические переходы электронов из валентной зоны в зону проводимости. Непрямые оптические переходы с участием фононов. Зависимость коэффициента поглощения от энергии фотонов. Учет экситонных эффектов. Прямые и непрямые экситоны. Экситонная зонная структура. Оптические переходы в экситонные состояния. Спектр поглощения прямозонных и непрямозонных полупроводников с учетом экситонных эффектов.

Тема 13. Статистика электронов в полупроводниках (7 академ. часов)

Распределение Ферми-Дирака для идеального ферми-газа. Функция распределения для электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Уравнение электронейтральности. Зависимость положения уровня Ферми и концентрации свободных носителей заряда от температуры в собственном полупроводнике.

Статистика заполнения примесных состояний в полупроводниках. Фактор вырождения. Уравнение электронейтральности в легированных полупроводниках. Зависимость положения уровня Ферми и концентрации свободных носителей заряда от температуры и уровня легирования материала донорами и акцепторами.

Тема 14. Кинетические явления в полупроводниках (7 академ. часов)

Классическая теория электропроводности Друде. Время релаксации, подвижность, удельная проводимость. Эффект Холла и коэффициент Холла.

Неравновесная функция распределения. Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации. Механизмы рассеяния носителей заряда. Зависимость вероятности рассеяния от энергии носителя заряда и температуры. Тензор удельной проводимости полупроводников и его зависимость от температуры. Тензор холловской проводимости полупроводников. Термоэлектрические эффекты в полупроводниках: эффект Зеебека и Пельтье.

Тема 15. Неравновесные носители заряда (7 академ. часов)

Неравновесные носители заряда в полупроводниках. Время жизни неравновесных носителей. Квазиуровни Ферми. Диффузия и дрейф. Соотношение Эйнштейна для невырожденных полупроводников. Фотопроводимость полупроводников. Эффект Дембера.

Процессы рекомбинации в полупроводниках. Механизмы люминесценции. Фото- и электролюминесценция полупроводников. Безызлучательные переходы. Эффект Оже.

Заключение (1 академ. час)

Перспективы развития полупроводниковой опто-и наноэлектроники.

Реферат

Реферат выполняется по теме будущей диссертации, структура и содержание реферата определяется аспирантом совместно с научным руководителем и согласовывается с преподавателем, ведущим дисциплину. Объем реферата должен быть не менее 16 стр (шрифт 14 pt, междустрочный интервал 1,5), должно быть использовано не менее 5 литературных источников (некорректные заимствования не допускаются).

В том случае, когда дисциплина реализуется в группах с малой численностью, по договоренности между научным руководителем аспиранта и препода-

вателем, ответственным за дисциплину «Физика полупроводников», соотношение между количеством часов, отводимых на изучение отдельных тем дисциплины, может быть изменено, при обязательном условии выделения минимально необходимого количества часов на каждый раздел.

В этом случае занятия по отдельным разделам могут проходить в виде установочной лекций, выдачи и объяснения задания по теме, а текущая аттестация может проходить в виде представления и защиты аспирантом выполненного задания.

Общие рекомендации по выполнению индивидуальных заданий доступны для аспиранта в печатном или электронном виде (на сайте Университета), либо аспирант может получить рекомендации у преподавателя, отвечающего за дисциплину, в часы консультаций. Задание формулируется с учетом тематики диссертационного исследования аспиранта в рамках изучаемой дисциплины.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

№	Название, библиографическое описание	Семестр	К-во экз. в библиот. (на каф.)
Основная литература			
1	Глинский Г.Ф. Полупроводники и полупроводниковые наноструктуры: симметрия и электронные состояния. СПб, «Технолит», 2008. 324 с.	8	94
2	Глинский Г.Ф. Методы теории групп в квантовой механике. СПб, Из-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 200 с.	8	10
3	Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы/ Под ред. Лучинина В.В., Таирова Ю.М.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 552 с.	8	5
4	Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы нанoeлектроники. М.: Логос, 2006. 494 с.	8	10
Дополнительная литература			
1	Пихтин, Александр Николаевич. Квантовая и оптическая электроника.-М. :Абрис,2012.-655	8	99

Зав. отделом учебной литературы  Т.В. Киселева

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», используемых при освоении дисциплины

№	Электронный адрес
1	http://infotechlib.narod.ru
2	http://ru.wikipedia.org

Информационные технологии (операционные системы, программное обеспечение общего и специализированного назначения, а также информационные справочные системы) и материально-техническая база, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, соответствуют требованиям федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Описание информационных технологий и материально-технической базы приведено в УМКД дисциплины.

Конкретные формы и процедуры текущего контроля знаний и промежуточной аттестации, включая перечень экзаменационных вопросов (Приложение 1), а также методические указания для обучающихся по самостоятельной работе при освоении дисциплин (содержащиеся в ООП) доводятся до сведения обучающихся на первом занятии.

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

Разработчик

д.ф.-м.н., проф.

 Глинский Г.Ф.

Рецензент

к.т.н., доц.

 Иванов Б.В.

Зав. каф. МНЭ

д.т.н., проф.

 Лучинин В.В.

Декан ФЭЛ

д.ф.-м.н., проф.

 Соломонов А.В.

Согласовано

Председатель УМК ФЭЛ

к.т.н., доц.

 Александрова О.А.

Начальник МО

д.т.н., проф.

 Грязнов А.Ю.

Заведующий ОДА

к. ф.-м. н.

 Кучерова О. В.