

**федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»**



Ю.С. Ключков

ПРОГРАММА

**вступительного испытания
по специальной дисциплине**

**для поступающих на обучение по программам подготовки
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре**

научная специальность

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Санкт-Петербург

2022

Руководитель ОП

к.т.н.

О.Б. Шагниев

Составители:

д.ф.-м.н., доцент

Е.Г. Апушкинский

д.ф.-м.н., доцент

В.В. Журихина

д.ф.-м.н., профессор

А.А. Липовский

Программа рассмотрена и рекомендована к изданию Научно-техническим советом (протокол № 5 от «21» марта 2022 г.).

1. Область применения и нормативные ссылки

Программа вступительного испытания сформирована на основе федеральных государственных требований по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре и порядка приема на обучение по образовательным программам высшего образования - программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре.

2. Структура вступительного экзамена

Программа вступительного испытания сформирована на основе федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования по программам специалитета или магистратуры.

Программа содержит перечень тем (вопросов) по специальной дисциплине соответствующей научной специальности **1.3.8-Физика конденсированного состояния**.

Вступительное испытание по специальной дисциплине состоит из двух блоков:

- теоретический экзамен, проводимый очно в письменной и/или устной форме (максимальный балл – 100);

- портфолио (максимальный балл – 100).

Минимальное количество баллов для теоретического экзамена составляет 50 баллов.

При получении по теоретическому экзамену результата ниже минимального балла, портфолио не рассматривается и не суммируется с результатом теоретического экзамена.

2.1. Оценка индивидуальных достижений. Структура портфолио

Максимальная возможная оценка за индивидуальные достижения (портфолио) составляет 100 баллов.

Для участия в конкурсе оценки индивидуальных достижений (портфолио) абитуриент может представить следующие документы, подтверждающие его достижения:

а. Доклады на международных и российских конференциях, научных семинарах, научных школах и т.д. по направлению будущего диссертационного исследования. Подтверждается представлением программы конференции, диплома (сертификата) участника.

б. Опубликованные или принятые к публикации научные работы (статьи, доклады в сборниках докладов). Подтверждается представлением электронных копий подлинников, ссылкой на открытые источники, справкой из редакции о принятии к публикации с обязательным указанием номера журнала и страниц. Публикации должны относиться к тому же направлению, что и тема будущего диссертационного исследования.

с. Свидетельства о государственной регистрации программ и баз данных, патенты на изобретения, патенты на полезные модели, и проч.

д. Участие в научно-исследовательских проектах, академических грантах. Подтверждается данными проекта (название, номер гранта, фонд), контактными данными руководителя проекта и краткой аннотацией (не более 200 слов), разъясняющей суть работы абитуриента.

Перечень достижений портфолио, учитываемых при приеме на обучение

№ п/п	Индивидуальное достижение	Подтверждающий документ	Количество баллов за каждое достижение
1.	Научные публикации (тематика публикации должна соответствовать научной специальности, по которой поступающий участвует в конкурсе):	Копия статьи с выходными данными журнала, DOI, URL	
	в журналах перечня ВАК;		10
	в журналах индексируемых в Scopus и (или) WoS (в том числе входящих в базу данных RSCI) Q1 или Q2;		25
	в журналах индексируемых в Scopus и (или) WoS (в том числе входящих в базу данных RSCI) Q3 или Q4.		15
2.	Гранты, проекты по выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, тематика которых соответствует направлению подготовки в конкурсе, по которому участвует поступающий, и в которых он являлся:	Копия подписанного соглашения с грантодателем	
	руководителем		10
	исполнителем		5
3.	Наличие документа, удостоверяющего авторство (соавторство) поступающего на достигнутый им научный (научно-методический, научно-технический, научно-творческий) результат интеллектуальной деятельности:	Копия патента или свидетельства	
	– патент на изобретение;		10
	– патент на полезную модель;		7
	– свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ;		5
	– свидетельство о государственной регистрации базы данных;		5
	– свидетельство о государственной регистрации топологии интегральных микросхем.		5

№ п/п	Индивидуальное достижение	Подтверждающий документ	Количество баллов за каждое достижение
4.	Публикация в материалах международных и всероссийских научно-технических конференций, включая публикации в выпусках научных журналов, публикующих статьи по итогам конференций (изданиях типа Conference series и(или) Proceedings), проводимых не ранее чем за 2 года, предшествующих приему. Тематика публикации должна соответствовать научной специальности, по которой поступающий участвует в конкурсе:	Копии материалов конференций (тезисов докладов) с приложением титульных листов, DOI, URL (при наличии)	
	за конференцию, индексируемую в базе данных Web of Science и (или) Scopus (индексация сборника или журнала с публикацией подтверждается ссылкой или скриншотом из базы данных).		5
	за прочие конференции.		3
5.	Наличие дипломов победителей мероприятий международного и всероссийского значения, подтверждающие успехи в профессиональной подготовке кандидата для поступления в аспирантуру.	Копия диплома	3

Оценка индивидуальных достижений проводится на собеседовании.

2.2. Структура и процедура проведения теоретического экзамена

Максимальная возможная оценка за теоретический экзамен составляет 100 баллов. Собеседование состоит из двух частей.

1) Ответ на вопросы в соответствии с научной специальностью будущей научно-исследовательской работы (диссертации).

Абитуриент выбирает билет, содержащий два вопроса из представленных в программе собеседования тем.

Абитуриенту предоставляется 30 минут на подготовку. В ходе ответа комиссия может задавать уточняющие вопросы.

2) Беседа по планируемому направлению исследований. Абитуриенту необходимо раскрыть следующие вопросы: предполагаемая тема научно-исследовательской работы, формулировка проблемы, цели ее исследования, новизна. В ходе ответа комиссия может задавать уточняющие вопросы.

2.3. Перечень тем для теоретического экзамена

I. ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА.

Целью данного раздела экзамена являются: проверка комплекса знаний о типах твердых тел, структуре кристаллических решеток, о межатомных взаимодействиях и силах

сцепления в твердых телах, об элементарных возбуждениях и взаимодействиях между ними, об электронных зонных спектрах кристаллов, о колебательных модах кристалла, о явлениях переноса в твердых телах, о воздействии внешних полей на твердые тела, об оптических свойствах твердых тел, об основных типах наноструктур.

Кристаллические решетки. Дифракция волн и частиц на решетке. Типы твердых тел и кристаллических решеток. Обратная решетка. Дифракция волн и частиц на кристаллической решетке. Рассеяние электронов решеткой. Приближение почти свободных электронов. Теория металлов Друде-Зоммерфельда. Межатомные взаимодействия и силы сцепления в твердых телах. Ван-дер-ваальсово взаимодействие. Передача энергии возбуждения в твердых телах. Ионная и ковалентная связи. Твердотельная плазма. Металлическая связь. Ион-ионное взаимодействие. Электронные состояния. Методы расчета зонной структуры. Метод сильной связи. Экситоны. Колебания решетки и тепловые свойства. Колебания трехмерной решетки. Фононы. Теплоемкость решетки. Диэлектрическая проницаемость решетки. Электрон-фононное взаимодействие. Оптические явления в твердых телах. Оптическое поглощение. Двухфотонные переходы. Электростатика диэлектриков. Диэлектрические свойства изоляторов. Наноструктуры. Гетероструктуры. Размерное квантование. Электрооптические эффекты в наноструктурах.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ФИЗИКЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА.

Целью данного раздела экзамена являются: проверка знаний об основных экспериментальных методах определения ионной и электронной структуры твердых тел, носителей заряда и их эффективной массы, энергетического спектра электронов и дырок, квантовых свойств наноструктур и низкоразмерных структур.

Дифракция электронов и нейтронов. Метод циклотронного резонанса. Экспериментальное определение эффективной массы носителей. Оптические методы исследования. Классический и квантовый методы Холла. Баллистическая проводимость. Туннельная спектроскопия. Эмиссионная и Оже- спектроскопия. Методы исследования дефектов с мелкими и глубокими уровнями. Особенности исследования двумерных и одномерных проводимостей и низкоразмерных наноструктур. Эксперименты в МДП структурах.

III. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ В СВЕТЕ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЙ ДЛЯ НАНОСИСТЕМ

Целью данного раздела экзамена являются: проверка комплекса знаний о фундаментальных законах квантовой механики и квантовых явлениях, возникающих в современных наноскопических и мезоскопических материалах и устройствах на основе нанокристаллов, электронных и фотонных волноводов и нанопленок, включая теоретическую интерпретацию экспериментальных методов их исследования; проверка представлений о принципиальных возмущениях при квантовых измерениях и специфике концепций корпускулярно-волнового дуализма, амплитуд вероятности квантовых переходов, квантовой интерференции и основных теоретических методах, используемых для их описания;

проверка опыта постановки и самостоятельного решения практических задач квантовой механики, ознакомление студентов с приближенными методами и с теоретическим описанием таких эффектов как квантование Ландау, эффект Ааронова-Бома и другими.

2.4. Перечень вопросов для теоретического экзамена

I. ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА.

1. Кристаллические структуры. Симметрия кристаллов.
2. Обратная решетка и зона Бриллюэна. Векторы обратной решетки и атомные плоскости.
3. Дифракция рентгеновских волн. Картины Лауэ и Брэгга.
4. Теорема Блоха.
5. Дифракция блоховских волн. Явления на границе зоны Бриллюэна.
6. Эффект Холла и магнетосопротивление в теории металлов Друде.
7. Теплопроводность. Эффекты Видемана-Франца и Зеебека в теории Друде и в теории Зоммерфельда.
8. Ионная связь.
9. Ковалентная связь.
10. Электрон-ионное взаимодействие в металле. Экранирование. Диэлектрическая проницаемость Хартри.
11. Обменная энергия в металле.
12. Длина экранирования в плазме.
13. Плазменные колебания.
14. Пространственная дисперсия в плазме.
15. Теплоемкость решетки. Модели Эйнштейна и Дебая.
16. Колебания трехмерных решеток. Акустические и оптические моды.
17. Квантование колебаний решетки. Фононы.
18. Дисперсия решеточной диэлектрической проницаемости.
19. Взаимодействие поперечных оптических фононов с фотонами. Поляритоны.
20. Методы расчета зонной структуры твердых тел. Приближение сильной связи.
21. Методы расчета зонной структуры твердых тел. Метод ячеек Вигнера-Зейтца.
22. Методы расчета зонной структуры твердых тел. Метод ортогонализированных плоских волн.
23. Методы расчета зонной структуры твердых тел. Метод присоединенных плоских волн.
24. Методы расчета зонной структуры твердых тел. Метод гриновских функций Корринги-Кона-Ростокера.
25. Экситоны. Энергия связи и боровский радиус экситона.
26. Взаимодействие электронов с акустическими фононами. Деформационный потенциал.
27. Взаимодействие электронов с оптическими фононами. Гамильтониан Фрелиха потенциал.
28. Полярны. Среднее число виртуальных фононов, сопровождающих электрон в полярном кристалле.
29. Энергия связи и эффективная масса полярона.
30. Дисперсия диэлектрической проницаемости.
31. Типы оптических переходов в твердых телах.
32. Многофотонное поглощение и комбинационное рассеяние света в твердых телах.
33. Размерное квантование. Структуры с квантовыми ямами, проводящими и точками.
34. Экситоны в наноструктурах. Случаи сильного и слабого конфайнмента.
35. Электрооптические и нелинейные оптические эффекты в наноструктурах.

36. Сегнетоэлектрики. Классификация сегнетоэлектрических кристаллов.
37. Фазовые переходы первого и второго рода в сегнетоэлектриках.
38. Пьезоэлектрики.
39. Сегнетоэлектрические домены.
40. Диамагнетизм и парамагнетизм.
41. Ферромагнитный порядок.
42. Магнитная структура ферромагнетика и антиферромагнетика.
43. Магноны.
44. Ферромагнитные домены.
45. Локализованные моменты. Эффект Кондо.

II. Экспериментальные методы в физике твердого тела.

1. Энергетический спектр электронов в магнитном поле. Уровни Ландау. Классическая теория циклотронного резонанса в случае изотропной эффективной массы.
2. Циклотронный резонанс электронов и дырок в кристаллах кремния и германия. Экспериментальная техника. Спектры циклотронного резонанса. Экспериментальное определение тензора эффективной массы электронов и дырок.
3. Циклотронный резонанс в низкоразмерных системах:
 - (а) квазидвумерный газ электронов и дырок в квантовых ямах; размерное квантование;
 - (б) уровни Ландау в зоне проводимости и валентной зоне;
 - (г) квантовый циклотронный резонанс: определение значений эффективной массы дырок, принадлежащих различным подзонам размерного квантования. Сравнение с данными оптических измерений.
4. Эффект Холла. Коллективизированные электроны в полупроводниках без магнитного поля. Кинетическая энергия – основные соотношения. Энергетический спектр электронов в магнитном поле. Переход от классического к квантовому эффекту Холла.
5. Двумерные системы: размерное квантование, уровни Ландау. Баллистическая проводимость. Осцилляции Шубникова - де Газа. Интегральный квантовый эффект Холла в кремниевом полевом транзисторе.
6. Дробный квантовый Холл – эффект в AlGaAs/GaAs наноструктурах.
7. Модель Лафлина. Краевые каналы проводимости. Метастабильность квантового эффекта Холла. Температурная зависимость подвижности двумерных носителей тока.
8. Туннельный эффект в полупроводниках (эксперимент Л. Есаки).
9. Туннельный эффект в низкоразмерных системах. Классические и квантовые законы движения электронов. Низкоразмерные полупроводниковые структуры: квантовые ямы, квантовые нити, квантовые точки.
10. Квантованная проводимость в квантовых нитях. Резонансное тунелирование в квантовых точках.
11. Резонансные туннельные структуры. Сверхрешетки. Каскадные лазеры.
12. Туннельные эффекты в сверхпроводниках. Контакт металл-сверхпроводник. Контакт сверхпроводник-сверхпроводник.
13. Точечные дефекты с мелкими и глубокими уровнями в запрещенной зоне. Метод эффективной массы в расчетах спектра возбужденных состояний водородоподобного примесного центра.
14. ИК Фурье-спектроскопия и фотоэлектрическая спектроскопия возбужденных состояний мелких водородоподобных центров. Влияние анизотропии эффективной массы и многодолинности зоны проводимости. Водородоподобные мелкие доноры в кремнии и германии.

15. Спектры водородоподобных состояний глубоких центров. Идентификация центров на основе сравнительного анализа данных ЭПР и ИК Фурье-спектроскопии. ИК фотоприемники.
16. Метастабильность глубоких дефектов в полупроводниках. Одноэлектронные и двухэлектронные конфигурационные диаграммы. Глубокие дефекты: двойные доноры, двойные акцепторы, амфотерные центры. Метастабильные центры.
17. Расчет двухэлектронных адиабатических потенциалов глубокого дефекта в электрическом поле. Зарядовые и спиновые корреляции. Емкостная спектроскопия точечных центров в полупроводниках.
18. Рекомбинационно-индуцированные реакции дефектов в полупроводниках. Теория и Эксперимент.
19. Фотоэмиссия. Отрицательное электронное сродство. Тушение и регенерация фотоэмиссии в эмиттерах с отрицательным электронным сродством.

III. Физические основы квантовой механики в свете ее применений для наносистем

1. Характерные масштабы длины и энергии в мезоскопической физике.
2. Общие свойства волновых функций. Бегущие и стоячие волны. Плотность потока вероятности. Сферические и цилиндрические волны.
3. Квантовый принцип суперпозиции для амплитуд перехода.
4. Сравнение баллистического, диффузионного и квантового транспорта. Управляющие транспортные уравнения.
5. Селективные и неселективные измерения в квантовой механике. Измерение проекции спина электрона в промежуточном состоянии.
6. Эффект Ааронова-Бома в эксперименте по дифракции на двух щелях.
7. Расплывание волнового пакета частицы. Соотношение неопределенностей.
8. Принцип Гюйгенса и функция распространения частицы в системах с низкой размерностью.
9. Размерное квантование в квантовой нити квадратного сечения.
10. Плотность состояний и квантованная проводимость в одномерной системе.
11. Движение носителя заряда в постоянном однородном магнитном поле – полуклассическое приближение.
12. Орбитальное квантование Ландау.
13. Кратность вырождения уровней Ландау в двумерной системе.
14. Релаксация импульса при рассеянии. Электропроводность Больцмана-Друде.
15. Транспортное время релаксации и его связь с сечением рассеяния. Сильно анизотропное (дифракционное) рассеяние.
16. Квантовая теория рассеяния. Оптическая теорема.
17. Амплитуда и вероятность рассеяния на случайном потенциале примесей.
18. Квантовая теория двумерного рассеяния. Рассеяние на цилиндрическом проводе. Связь особенностей амплитуды рассеяния с энергетическим спектром системы – формула Брейта-Вигнера.
19. Коэффициенты отражения и прохождения в случае потенциальной ступеньки. Полное внутреннее отражение.
20. Формулировка задачи о туннелировании в терминах матрицы переноса.
21. Простые и составные потенциальные барьеры в наносистемах. Резонансное туннелирование.

2.5. Критерии оценки теоретического экзамена

Оценка знаний поступающего в аспирантуру производится по сто бальной шкале.

100 баллов выставляется экзаменационной комиссией за обстоятельный и обоснованный ответ на все вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы членов экзаменационной комиссии. Поступающий в аспирантуру в процессе ответа на

вопросы экзаменационного билета правильно определяет основные понятия, свободно ориентируется в теоретическом и практическом материале по предложенной тематике.

75 баллов выставляется поступающему в аспирантуру за правильные и достаточно полные ответы на вопросы экзаменационного билета, которые не содержат грубых ошибок и неточностей в трактовке основных понятий и категорий, но в процессе ответа возникли определенные затруднения при ответе на дополнительные вопросы членов экзаменационной комиссии.

50 баллов выставляется поступающему в аспирантуру при недостаточно полном и обоснованном ответе на вопросы экзаменационного билета и при возникновении серьезных затруднений при ответе на дополнительные вопросы членов экзаменационной комиссии.

0 баллов выставляется в случае отсутствия необходимых для ответа на вопросы экзаменационного билета теоретических и практических знаний.

2.6. Список рекомендуемой литературы

1. Н. Ашкрофт, Н. Мермин. Физика твердого тела. Т. 1,2. "Мир", Москва, 1979.
2. Ч. Киттель. Введение в физику твердого тела. "Наука", Москва, 1978.
3. А. Анималу. Квантовая теория кристаллических твердых тел. "Мир", Москва, 1981.
4. Ч. Киттель. Квантовая теория твердых тел. "Наука", Москва, 1967.
5. В.Г. Вакс. Межатомные взаимодействия и связь в твердых телах. "ИздАТ", Москва. 2002.
6. Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский. Квазичастицы в физике конденсированного состояния. "Физматлит". Москва. 2005.
7. G. Dresselhaus, A. F. Kip, and C. Kittel, Cyclotron Resonance of Electrons and Holes in Silicon and Germanium Crystals, Phys. Rev. 98, 368 - 384 (1955).
8. Гершензон Е.М., Циклотронный резонанс в полупроводниках, Соросовский Образовательный Журнал, №10, с.87–94 (2000).
9. Демиховский В.Я., Квантовые ямы, нити, точки. Что это такое, Соросовский Образовательный Журнал, №5, с.80 (1997).
10. Шик А.Я., Квантовые нити, Соросовский Образовательный Журнал, №5, с.87 (1997).
11. Л. Эсаки, ПУТЕШЕСТВИЕ В СТРАНУ ТУННЕЛИРОВАНИЯ, УФН, т. 116, с.569 (1975)
12. И. Гиавер, ТУННЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ, УФН, т. 116, с.585 (1975)
13. Б. Джозефсон, ОТКРЫТИЕ ТУННЕЛЬНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ТОКОВ, УФН, т. 116, с.597 (1975)
14. Н.G. Grimmeiss et al in Deep Centers in Semiconductors, ed by S.T. Pantelides, Gordon & Breach, 1986.
15. S.T. Pantelides. In: Deep centers in semiconductors, ed. by S.T. Pantelides (Gordon & Breach, N.Y., 1986) p.3.
16. А. Милнс. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках (Мир, М., 1977)
17. Т. Андо, А. Фаулер, Ф. Стерн. Электронные свойства двумерных систем. М., "Мир," 1985.
18. Лафлин Р.Б., Дробное квантование, УФН, т.170, с.292 (2000).
19. Штермер Х., Дробный квантовый эффект Холла, УФН, т.170, с.304 (2000).

Приложение

Сведения об достижениях портфолио кандидата для поступления по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре СПбПУ

(Ф.И.О. кандидата для поступления в аспирантуру)			
(научная специальность)			
№ п/п	Индивидуальное достижение	Количество баллов за каждое достижение	Рейтинговая оценка показателя, общий балл
1.	Научные публикации (тематика публикации должна соответствовать научной специальности, по которой поступающий участвует в конкурсе): в журналах перечня ВАК;	10	
	в журналах индексируемых в Scopus и (или) WoS (в том числе входящих в базу данных RSCI) Q1 или Q2;	25	
	в журналах индексируемых в Scopus и (или) WoS (в том числе входящих в базу данных RSCI) Q3 или Q4.	15	
2.	Гранты, проекты по выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, тематика которых соответствует направлению подготовки в конкурсе, по которому участвует поступающий, и в которых он являлся:		
	руководителем,	10	
	исполнителем.	5	
3.	Наличие документа, удостоверяющего авторство (соавторство) поступающего на достигнутый им научный (научно-методический, научно-технический, научно-творческий) результат интеллектуальной деятельности:		
	– патент на изобретение;	10	
	– патент на полезную модель;	7	
	– свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ;	5	
	– свидетельство о государственной регистрации базы данных;	5	
	– свидетельство о государственной регистрации топологии интегральных микросхем.	5	
4.	Публикация в материалах международных и всероссийских научно-технических конференций, включая публикации в выпусках научных журналов, публикующих статьи по итогам конференций (изданиях типа Conference series и(или) Proceedings), проводимых не ранее чем за 2 года, предшествующих приему (тематика публикации должна соответствовать научной специальности, по которой поступающий участвует в конкурсе): за конференцию, индексируемую в базе данных Web of Science и (или) Scopus (индексация сборника или журнала с публикацией подтверждается ссылкой или скриншотом из базы данных);	5	
	за прочие конференции.	3	
5.	Наличие дипломов победителей мероприятий международного и всероссийского значения, подтверждающие успехи в профессиональной подготовке кандидата для поступления в аспирантуру	3	
Суммарный рейтинговый балл			

Кандидат в аспирантуру

(подпись)

(Ф.И.О).

Предполагаемый научный руководитель

(подпись)

(Ф.И.О).

Руководитель образовательных программ
по аспирантуре института

(подпись)

(Ф.И.О).