

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и инновациям

 Ложилов А.Г.

«28» февраля 2022 г.

ПРОГРАММА

вступительного испытания по специальной дисциплине
соответствующей научной специальности программы подготовки научных и
научно-педагогических кадров в аспирантуре

1.3.8 Физика конденсированного состояния
шифр и наименование научной специальности

Программа вступительных испытаний при приеме на обучение по программе подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре формируется на основе федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования по программам специалитета или магистратуры.

Составители программы: Смирнов С.В., профессор каф. ФЭ.

ПРОГРАММА РАССМОТРЕНА И УТВЕРЖДЕНА на заседании кафедры ФЭ от 26.02 2022 г. протокол № 130

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой ФЭ

 Троян П.Е.

Разработчик

 Смирнов С.В.

Руководитель образовательной программы

 Смирнов С.В.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Программа вступительного испытания по специальной дисциплине соответствующей научной специальности программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

шифр и наименование научной специальности

(далее – Программа), сформирована на основе требований федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования к программам магистратуры (специалитета) по соответствующим направлениям (специальностям) подготовки. Программа разработана для поступления на обучение в аспирантуру ТУСУРа.

Программой устанавливается:

- форма, структура, процедура сдачи вступительного испытания;
- шкала оценивания;
- максимальное и минимальное количество баллов для успешного прохождения вступительного испытания;
- критерии оценки ответов.

1.2 Организация и проведение вступительного испытания осуществляется в соответствии с Правилами приема, утвержденными приказом ректора ТУСУРа, действующими на текущий год поступления.

1.3 По результатам вступительного испытания, поступающий имеет право подать на апелляцию о нарушении, по мнению поступающего, установленного порядка проведения вступительного испытания и (или) о несогласии с полученной оценкой результатов вступительного испытания в порядке, установленном Правилами приема, действующими на текущий год поступления.

2. ФОРМА, СТРУКТУРА, ПРОЦЕДУРА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ И ШКАЛА ОЦЕНИВАНИЯ ОТВЕТОВ

2.1 Вступительное испытание проводится на русском языке.

2.2 Вступительное испытание по специальной дисциплине проводится в форме экзамена (письменно) в соответствии с перечнем тем и (или) вопросов, установленных данной Программой.

2.3 Структура экзамена:

Вступительные испытания проводятся в тестовой форме. Продолжительность проведения письменного экзамена – не более 60 минут.

2.4 Вступительное испытание проводится экзаменационной комиссией, действующей на основании приказа ректора.

Итоговая оценка за экзамен определяется как средний балл, выставленный всеми членами экзаменационной комиссии.

Результаты проведения вступительного испытания оформляются протоколом, в котором фиксируются вопросы экзаменаторов к поступающему. На каждого поступающего ведется отдельный протокол. Протокол приема вступительного испытания подписывается членами комиссии, которые присутствовали на экзамене, с указанием их ученой степени, ученого звания, занимаемой должности и утверждается председателем комиссии. Протоколы приема вступительных испытаний после утверждения хранятся в личном деле поступающего

2.5 Шкала оценивания ответов на экзамене.

| | | | |
|---------------------|-------------------|--------|---------|
| неудовлетворительно | удовлетворительно | хорошо | отлично |
|---------------------|-------------------|--------|---------|

| | | | |
|--------------|----------------|----------------|-----------------|
| до 44 баллов | 45 – 75 баллов | 76 – 84 баллов | 85 – 100 баллов |
|--------------|----------------|----------------|-----------------|

Максимальное количество баллов за экзамен – 100. Минимальное количество баллов для успешного прохождения экзамена – 45. Поступающий, набравший менее 45 баллов за экзамен, не может быть зачислен в аспирантуру.

Таблица критериев оценки устных и письменных ответов (при наличии)

| Вид деятельности | | |
|----------------------------|--------|--|
| Оценка | Балл | Уровень владения темой |
| неудовлетворительно | до 44 | Не имеет необходимых представлений о проверяемом материале. Знать на уровне ориентирования, представлений. Обучающийся знает основные признаки или термины изучаемого элемента содержания, их отнесенность к определенной науке, отрасли или объектам, узнает в текстах, изображениях или схемах и знает, к каким источникам нужно обращаться для более детального его усвоения. |
| удовлетворительно | 45-75 | Знать и уметь на репродуктивном уровне. Обучающихся знает изученный элемент содержания репродуктивно: произвольно воспроизводит свои знания устно, письменно или в демонстрируемых действиях. |
| хорошо | 76-84 | Знать, уметь, владеть на аналитическом уровне. Зная на репродуктивном уровне, указывать на особенности и взаимосвязи изученных объектов, на их достоинства, ограничения, историю и перспективы развития и особенности для разных объектов усвоения. |
| отлично | 85-100 | Знать, уметь, владеть на системном уровне. Обучающийся знает изученный элемент содержания системно, произвольно и доказательно воспроизводит свои знания устно, письменно или в демонстрируемых действиях, учитывая и указывая связи и зависимости между этим элементом и другими элементами содержания дисциплины, его значимость в содержании дисциплины. |

2.6 Во время проведения вступительных испытаний их участникам и лицам, привлекаемым к их проведению, запрещается иметь при себе и использовать средства связи. Участники вступительных испытаний могут иметь при себе и использовать письменные принадлежности.

При нарушении поступающим во время проведения вступительных испытаний правил приема, утвержденных организацией, уполномоченные должностные лица организации вправе удалить его с места проведения вступительного испытания с составлением акта об удалении.

3. СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ

Примерный перечень тем и вопросов для подготовки к сдаче экзамена (*и формирования тестов*):

3.1 ОСНОВЫ КРИСТАЛЛОГРАФИИ И КРИСТАЛЛОХИМИИ

Решётка, кристаллическая структура. Решётки Браве. Элементы симметрии, преобразования симметрии. Точечные группы. Сингонии. Пространственные группы. Примеры кристаллических структур. Индексы Миллера. Дифракция рентгеновских лучей. Закон Вульфа-Брегга. Уравнение Лауэ. Обратная решётка. Рентгеновские методы исследования структуры кристаллов. Нейтронно-графический метод исследования строения кристаллов и атомной магнитной структуры магнитоупорядоченных кристаллов.

Типы сил связи в кристаллах. Энергия связи. Основные свойства ионных кристаллов, кристаллов с ковалентной связью, металлов, молекулярных кристаллов, кристаллов с водородными связями.

Связь структуры кристаллов с характером химических связей. Координационное число. Радиус иона. Плотно упакованные структуры. Дефекты кристаллической структуры, примеси в кристаллах.

3.2 УПРУГИЕ И ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

Тензор деформаций и тензор напряжений. Обобщённый закон Гука. Модули упругости и упругие постоянные для кристаллов различных классов. Упругие волны в кубических кристаллах.

Спектр собственных частот. Акустические и оптические ветви. Нормальные колебания. Фононы. Рассеяние фононов.

Теплоёмкость кристаллов. Теории Эйнштейна, Дебая, Борна. Теплопроводность и тепловое расширение твёрдых тел.

3.3 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ЭЛЕКТРОНОВ В ТВЁРДОМ ТЕЛЕ И ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО УРОВНЯМ ЭНЕРГИИ

Равновесные свойства свободного электронного газа в кристалле. Уравнение Шредингера и его анализ, плотность состояний, зависимость энергии от волнового вектора. Функция распределения электронов Ферми-Дирака и принцип Паули. Уровень Ферми-уровень химического потенциала. Предельные случаи состояния электронов при температуре, отличной от нуля: сильное вырождение – металлы, невырожденный электронный газ - диэлектрики и полупроводники.

Равновесные свойства электронного газа в периодическом потенциальном поле идеальной кристаллической решётки. Анализ энергетической структуры для модели Кронига-Пенни. Энергетические ионы и зона Бриллюэна. Приближение почти свободных электронов и приближение сильной связи. Современные методы теоретического расчёта и экспериментального исследования зонной структуры твёрдых тел. Зонная структура основных полупроводниковых и диэлектрических материалов. Статистический подход для описания свойств твёрдых тел. Понятие о функциях распределения и функциях плотности состояний. Фермионы и бозоны. Распределение Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна. Энергия Ферми. Вырожденное и невырожденное состояния. Зонная теория твердого тела.

3.4 ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Собственная проводимость полупроводников. Электроны и дырки. Равновесная концентрация носителей заряда, уровень Ферми. Зависимость концентрации носителей от температуры. Примесная проводимость полупроводников. Акцепторные и донорные примесные атомы. Энергия активации. Уравнение баланса носителей заряда в

полупроводнике. Температурная зависимость равновесной концентрации примесных носителей заряда. Закон действующих масс.

Компенсированные полупроводники. Неравновесные носители заряда. Понятие о квазиуровнях Ферми. Рекомбинация, ее механизмы. Время жизни носителей заряда. Излучательная рекомбинация. Основные полупроводники, применяемые в микроэлектронике (кремний, германий, арсенид галлия), их свойства. Диффузионная и дрейфовая составляющие тока. Коэффициент диффузии носителей заряда. Соотношение Эйнштейна. Монополярная и биполярная диффузия носителей заряда в полупроводниках. Уравнение непрерывности.

3.5 ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Классическая теория электропроводности, ее недостатки. Влияние электрического поля на функцию распределения носителей заряда. Дрейфовая скорость. Подвижность носителей заряда. Уравнения Ланжевена. Механизмы рассеяния носителей заряда. Электрон-фононное рассеяние. Рассеяние на дефектах кристаллической решётки. Температурные зависимости подвижности и концентрации носителей заряда в металлах.

Температурная зависимость удельной проводимости металлов. Основные механизмы рассеяния носителей заряда в полупроводниках. Температурная зависимость подвижности носителей заряда в полупроводниках. Температурная зависимость удельной проводимости полупроводников. Эффекты сильного поля. Термоэлектронная ионизация, ударная ионизация, электростатическая ионизация. Типы вольтамперных характеристик в полупроводниках. Эффект Ганна. Понятие о доменах. СВЧ-генераторы на эффекте Ганна.

3.6 ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Поверхностные состояния в полупроводнике. Приповерхностный слой объемного заряда. Поверхностная проводимость. Эффект поля.

3.7 ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ, ТЕРМОМАГНИТНЫЕ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Движение носителей заряда при наличии магнитного поля. Магнитосопротивление, эффект Холла и его применения. Эффекты Нернста, Риги-Ледюка, Эттинггаузена. Эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона, области их применения.

3.8 ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ И ПОТЕРИ

Квантово-механическое и классическое описания поляризации, как изменения распределения зарядов в диэлектрике или полупроводнике под действием электрического поля. Влияние поляризованного диэлектрика на величину электрического поля в пространстве.

Поляризованность, связанные заряды, вектор индукции – связь между этими характеристиками, электрической восприимчивостью, диэлектрической проницаемостью.

Диэлектрическая проницаемость однородного электронного газа в полупроводниках. Коллективные колебания плазмы, статическое экранирование, плазмоны.

Диэлектрические потери в переменном электрическом поле, связанные с проводимостью диэлектрика и с замедленным установлением поляризации. Удельная мощность потерь, тангенс угла диэлектрических потерь, фактор потерь и взаимосвязь этих характеристик. Комплексная диэлектрическая проницаемость.

Основные методы исследования поляризации и потерь в переменном поле от инфранизких до сверхвысоких частот. Распространение электромагнитных волн в диэлектриках, волноводы, резонаторы.

Температурно-частотная зависимость поляризации и потерь в неполярных, ионных и дипольных диэлектрика.

3.9 ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Поглощение- отражение и испускание света диэлектриками и полупроводниками. Оптические спектры атомов и молекул, связанные с электронными переходами. Колебательные и вращательные спектры молекул, их исследование методами ИК-спектроскопии, радиоспектроскопии, комбинационного рассеяния. Оптические спектры твёрдых тел, связанные с прямыми и непрямыми межзонными переходами электронов, с центрами окраски, и колебаниями ионов кристаллической решётки. Полоса остаточных лучей. Особенности инфракрасных спектров полимерных веществ. Поглощение света свободными носителями в полупроводниках, спектры веществ. Поглощение света свободными носителями в полупроводниках, спектры плазменного отражения.

Люминесценция кристаллов и молекул. Природа и закономерности теплового излучения. Флюоресценция, фосфоресценция, фотолюминесценция, электролюминесценция, основные закономерности и основные механизмы. Рекомбинационное излучение в диэлектриках и полупроводниках. Спонтанное и вынужденное излучения. Различные типы ОКГ и принцип их действия. Голография и ее применение.

Магнитооптические явления, эффекты Фарадея, Фохта. Электрооптические явления. Эффекты Поккельса, Керра. Франца-Келдыша. Пьезооптические явления, двойное лучепреломление при деформации.

Фотопроводимость диэлектриков и полупроводников, процессы генерации и рекомбинации неравновесных носителей. Объёмная и вентильная фото – э.д.с. Фотоэлектромагнитный эффект.

Оптические полупроводниковые и диэлектрические приборы – светодиод, фотоэлемент. фотодиод, фототранзистор, фоторезистор, лавинный фотодиод, инжекционный лазер. Применение оптических явлений в оптоэлектронике и интегральной оптике.

Нелинейно-оптические свойства кристаллов. Генерация второй, третьей гармоник, оптическое детектирование. Использование нелинейно – оптических явлений для управления лазерным излучением.

Акустооптические явления в твёрдых телах и их использование для управления лазерным излучением.

4. ОБРАЗЕЦ ЭКЗАМЕНАЦИОННОГО БИЛЕТА ДЛЯ СДАЧИ ВСТУПИТЕЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ

Вариант 0

1. Собственные значения энергии с ростом номера уровня...

- а) уменьшается;
- б) увеличивается по квадратичному закону;
- в) увеличивается по линейному закону;
- г) не изменяется.

2. Принцип Паули гласит...

- а) в атоме не может быть двух электронов в состояниях, характеризующихся четырьмя различными квантовыми числами;
- б) в атоме не может быть двух электронов в состояниях, характеризующихся тремя одинаковыми квантовыми числами;
- в) в атоме не может быть двух электронов в состояниях, характеризующихся тремя разными квантовыми числами;
- г) в атоме не может быть двух электронов в состояниях, характеризующихся четырьмя одинаковыми квантовыми числами.

3. Моноклинные решётки могут быть:

- а) простыми, объёмо-центрированными и гранецентрированными;
- б) простыми и объёмо-центрированными;
- в) простыми и базоцентрированными;
- г) простыми и гранецентрированными.

4. Электроны подчиняются статистике...

- а) Максвелла-Больцмана;
- б) Больцмана;
- в) Ферми-Дирака;
- г) Бозе-Эйнштейна.

5. К локализованной квазичастице относится...

- а) плазмон;
- б) электрон проводимости;
- в) фонон;
- г) магнон.

6. Какова минимальная частота колебаний цепочки одинаковых атомов длиной L и расстоянием между атомами a :

- а) $\omega_{мин} = \pi v / L$;
- б) $\omega_{мин} = \pi v / \lambda L$;
- в) $\omega_{мин} = v / \lambda L$;
- г) $\omega_{мин} = \pi v / aL$.

7. Поведение теплоёмкости при низких температурах корректно описывает закон...

- а) Дебая;
- б) Дюлонга-Пти;
- в) Эйнштейна;
- г) Фурье.

8. Коэффициент теплового расширения определяется через среднее расстояние между атомами как...

- а) $\alpha = 1/a_0 \cdot (d \langle r \rangle / dT)$;
- б) $\alpha = (d \langle r \rangle / dT)$;
- в) $\alpha = -1/a_0 \cdot (d \langle r \rangle / dT)$;
- г) $\alpha = 1/a_0 \cdot (dT / d \langle r \rangle)$.

9. Чем обусловлен ангармонизм колебаний атомов в кристалле?

- а) симметрией зависимости энергии связи от межатомного расстояния;
- б) зависимостью частоты колебаний атомов от температуры;
- в) асимметрией зависимости энергии связи от межатомного расстояния;
- г) различной массой атомов.

10. С ростом температуры твёрдого тела его внутренняя энергия...

- а) уменьшается;
- б) увеличивается;
- в) не изменяется;
- г) сначала увеличивается, затем уменьшается.

11. Чему равно полное число электронных состояний в первой зоне Бриллюэна?

- а) числу фононов;
- б) числу электронов;
- в) числу атомов в кристалле;
- г) массе электронов.

12. По какой формуле определяется эффективная масса m_n^* электрона:

- а) $m_n^* = F / a$;
- б) $m_n^* = m$;
- в) $m_n^* = \hbar^2 (d^2 E / dk^2)^{-1}$;
- г) $m_n^* = \hbar (d^2 E / dk^2)$.

13. Значение величины диэлектрической проницаемости зависит:

- а) только от свойств диэлектрика;
- б) только от свойств внешней среды;
- в) от свойств диэлектрика и внешней среды.

14. Для ферромагнетиков полный цикл перемангничивания описывается...

- а) зависимостью намагниченности от частоты;
- б) зависимостью намагничивания от температуры;
- в) зависимостью намагниченности от напряжённости магнитного поля;

г) зависимостью магнитной индукции от частоты.

15. Зависимость намагниченности для парамагнетиков и диамагнетиков от напряжённости поля является...

- а) линейной; б) квадратичной;
в) кубической; г) логарифмической.

16. Количество дислокаций...

- а) не зависит от температуры;
б) зависит от температуры по линейному закону;
в) зависит от температуры по квадратичному закону;
г) зависит от температуры по кубическому закону.

17. Точечные дефекты, возникающие при облучении кристаллов быстрыми частицами, получили название...

- а) линейных дефектов; б) дефектов по Шоттки;
в) дефектов по Френкелю; г) радиационных дефектов.

18. Какой тип примеси создаёт В в кристалле Si?

- а) акцепторную; б) донорную;
в) нейтральную; г) многозарядную.

19. Как ведёт себя уровень Ферми в примесном полупроводнике р-типа при повышении температуры?

- а) находится на одном месте;
б) приближается к середине запрещённой зоны;
в) заходит в зону проводимости;
г) сначала приближается к зоне валентности, а затем начинает удаляться от неё.

20. В каком случае уровень Ферми для собственного полупроводника не зависит от температуры и лежит в середине запрещённой зоны?

- а) $m_n^* = m_p^*$; б) $m_n^* > m_p^*$; в) $m_n^* < m_p^*$.

5. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

5.1. Основная литература

1. Физика конденсированного состояния: учебное пособие для вузов / Ю.А. Байков, В.М. Кузнецов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 294 с. (45)
2. Смирнов С.В. Физика твёрдого тела: учебное пособие. – Томск, ТГУ, 2003. – 276 с. (24)

5.2. Дополнительная литература

1. Физика твёрдого тела. Под редакцией Верещагина И.К. – М.: Высшая школа, 2001. – 238 с. (14)
2. Протасов Ю.С., Чувашев С.Н. Твердотельная электроника. – Изд. МГТУ им. Баумана, 2003. – 189 с. (2)
3. Чупрунов Е.В. Кристаллография: Учебник для вузов / Е.В. Чупрунов, А.Ф. Хохлов, М.А. Фадеев. – М.: Физматлит, 2000. – 496 с. (1)
4. Гуртов В.А., Осауленко Р.Н. Физика твёрдого тела для инженеров: учебное пособие / ред.: Л.А. Алешина. – М.: Техносфера, 2007. – 518 с. (1)
5. Павлов П.В. Физика твёрдого тела: Учебник для вузов / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. – 3-е изд., стереотип. – М.: Высшая школа, 2000. – 496 с. (60)

5.3. Периодические издания

1. Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.
2. Известия высших учебных заведений. Физика.
3. Известия высших учебных заведений. Электроника.
4. Микроэлектроника.
5. Российские нанотехнологии.
6. Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы.
7. Электроника.
8. Общие вопросы физики и физического эксперимента.

5.4. Перечень интернет-ресурсов

1. Образовательный портал в свободном доступе: «Физика, химия, математика студентам и школьникам. Образовательный проект А.Н. Варгина» – Режим доступа: <http://www.ph4s.ru/>

2. «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» [Электронный ресурс]: информационная система. – Режим доступа: <http://window.edu.ru/>

3. «eLIBRARY.RU» [Электронный ресурс]: научная электронная библиотека. – Режим доступа: <http://elibrary.ru>

4. «Научно-образовательный портал ТУСУР» [Электронный ресурс]: научно-образовательный портал университета. – Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/>