

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по ОД

Е.В. Луков

« 21 » октября 2022г.

**ПРОГРАММА**

**кандидатского экзамена по научной специальности**  
*«1.3.8. Физика конденсированного состояния»*

Томск – 2022

Программа кандидатского экзамена по научной специальности «1.3.8. Физика конденсированного состояния» рассмотрена и рекомендована к утверждению ученым советом Физического факультета

протокол № 523 от 13.10.2022

**Авторы-разработчики:**

1. Дитенберг Иван Александрович, д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой
2. Коротаев Александр Дмитриевич, д.ф.-м.н., профессор, профессор
3. Чумляков Юрий Иванович, д.ф.-м.н., профессор, профессор
4. Литовченко Игорь Юрьевич, д.ф.-м.н., доцент, профессор
5. Шилько Евгений Викторович, д.ф.-м.н., профессор
6. Корчуганов Александр Вячеславович, к.ф.-м.н., доцент

Согласовано:

Соруководитель ОП



И.А. Дитенберг

Соруководитель ОП

Е.С. Марченко

## 1. Общие положения

На основании постановления Правительства Российской Федерации от 23.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» кандидатские экзамены сдаются в соответствии с научной специальностью (научными специальностями) и отраслью науки, предусмотренными номенклатурой научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утверждаемой Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (далее – Минобрнауки России), по которым осуществляется подготовка (подготовлена) диссертации.

Кандидатский экзамен по специальной дисциплине в соответствии с темой диссертации на соискание ученой степени кандидата наук представляет собой форму оценки степени подготовленности соискателя ученой степени к проведению научных исследований по научной специальности «1.3.8. Физика конденсированного состояния» по физико-математическим наукам (далее – кандидатский экзамен).

Программа кандидатского экзамена разработана на основе Паспорта научной специальности «1.3.8. Физика конденсированного состояния» (далее – Программа), утвержденного ВАК при Минобрнауки России <https://drive.google.com/drive/folders/1RNYkXhvAzaEF85GqxOH8HhbenJIoUMR7>.

Организация и проведение приема кандидатского экзамена осуществляется в соответствии с установленным в НИ ТГУ порядком.

Подготовка по Программе может осуществляться как самостоятельно, так и в рамках освоения соответствующей программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре НИ ТГУ. Сдача аспирантом кандидатского экзамена является обязательным условием обучения и относится к оценке результатов освоения базовой дисциплины (модуля) образовательного компонента программы, осуществляемой в рамках промежуточной аттестации.

## 2. Структура кандидатского экзамена и шкала оценивания уровня знаний

Кандидатский экзамен проводится в форме устного экзамена по билетам продолжительностью один академический час и состоит из следующих частей:

1. Основные вопросы (билет, включающий не более двух вопросов по содержанию курса «Физика конденсированного состояния»).
2. Дополнительный вопрос (1 вопрос из 2-го раздела содержания Программы).
3. Реферат.



Оценка уровня знаний по каждому вопросу осуществляется по пятибалльной шкале со следующим принципом перерасчета:

- «отлично» – 5 баллов;
- «хорошо» – 4 балла;
- «удовлетворительно» – 3 балла;
- «неудовлетворительно» – 1-2 балла.

При оценивании ответов на каждый из вопросов экзаменационного билета учитываются следующие критерии:

Ответ на вопрос исчерпывающий, продемонстрировано понимание и знание сути вопроса в полном объеме. Замечаний нет.	5 баллов
Ответ на вопрос неполный, но раскрывающий основную суть вопроса, продемонстрировано понимание и знание вопроса в достаточном объеме. Замечания незначительные.	4 балла
Ответ неполный с существенными замечаниями, знания по вопросу фрагментарные и частичные, в том числе и по тематике диссертационного исследования.	3 балла
Ответ на вопрос отсутствует или дан неправильный	1-2 балла

Итоговая оценка за кандидатский экзамен выставляется решением экзаменационной комиссии:

«отлично» – при наличии не менее 80% 5-балльных ответов и отсутствии 3-2-1-балльных ответов;

«хорошо» – при наличии не менее 80% 4-балльных ответов и отсутствии 2-1-балльных ответов;

«удовлетворительно» – при наличии более 20% 3-балльных ответов и отсутствии 2-1-балльных ответов;

«неудовлетворительно» – при наличии 1-2 балльного ответа (или отказа отвечать на вопрос).

### **3. Перечень тем и вопросов для подготовки к сдаче экзамена**

**Раздел 1. Основные вопросы** (по содержанию курса «Физика конденсированного состояния»).

Тема 1. Силы связи в твердых телах

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

2. Химическая связь и ближний порядок. Структура вещества с ненаправленным взаимодействием. Примеры кристаллических структур,

отвечающих плотным упаковкам шаров: простая кубическая, ОЦК, ГЦК, ГПУ, структура типа CsCl, типа NaCl, структура типа перовскита CaTiO<sub>3</sub>.

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

#### Тема 2. Симметрия твердых тел

1. Кристаллические и аморфные твердые тела. Трансляционная инвариантность. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Ячейка Вигнера – Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.

2. Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Операции (преобразования) симметрии.

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

#### Тема 3. Дефекты в твердых телах

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

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

#### Тема 4. Дифракция в кристаллах

1. Распространение волн в кристаллах. Дифракция рентгеновских лучей, нейтронов и электронов в кристалле. Упругое и неупругое рассеяние, их особенности.

2. Брэгговские отражения. Атомный и структурный факторы. Дифракция в аморфных веществах.

#### Тема 5. Колебания решетки

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

#### Тема 6. Тепловые свойства твердых тел

1. Теплоемкость твердых тел. Решеточная теплоемкость. Электронная теплоемкость. Температурная зависимость решеточной и электронной теплоемкости.



2. Классическая теория теплоемкости. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы в классической физике. Границы справедливости классической теории.

3. Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Температура Дебая.

4. Тепловое расширение твердых тел. Его физическое происхождение. Ангармонические колебания.

5. Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана – Франца для электронной теплоемкости и теплопроводности.

#### Тема 7. Электронные свойства твердых тел

1. Электронные свойства твердых тел: основные экспериментальные факты. Проводимость, эффект Холла, термоЭДС, фотопроводимость, оптическое поглощение. Трудности объяснения этих фактов на основе классической теории Друде.

2. Основные приближения зонной теории. Граничные условия Борна – Кармана. Теорема Блоха. Блоховские функции. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны.

3. Брэгговское отражение электронов при движении по кристаллу. Полосатый спектр энергии.

4. Приближение сильносвязанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии. Тензор обратных эффективных масс.

5. Приближение почти свободных электронов. Брэгговские отражения электронов.

6. Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Полуметаллы.

#### Тема 8. Магнитные свойства твердых тел

1. Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Законы Кюри и Кюри – Вейсса. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости.

2. Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика.

3. Ферромагнитные домены. Причины появления доменов. Доменные границы (Блоха, Нееля).

4. Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферримагнетики. Магнитная структура ферримагнетиков.

5. Спиновые волны, магноны.

6. Движение магнитного момента в постоянном и переменном магнитных полях. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.

Тема 9. Оптические и магнитооптические свойства твердых тел

1. Комплексная диэлектрическая проницаемость и оптические постоянные. Коэффициенты поглощения и отражения. Соотношения Крамерса—Кронига.

2. Поглощения света в полупроводниках (межзонное, примесное поглощение, поглощение свободными носителями, решеткой). Определение основных характеристик полупроводника из оптических исследований.

3. Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта и Керра).

4. Проникновение высокочастотного поля в проводник. Нормальный и аномальный скин-эффекты. Толщина скин-слоя.

Тема 10. Сверхпроводимость

1. Сверхпроводимость. Критическая температура. Высокотемпературные сверхпроводники. Эффект Мейснера. Критическое поле и критический ток.

2. Сверхпроводники первого и второго рода. Их магнитные свойства. Вихри Абрикосова. Глубина проникновения магнитного поля в образец.

3. Эффект Джозефсона.

4. Куперовское спаривание. Длина когерентности. Энергетическая щель.

### Рекомендуемая литература

1. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
2. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. Т. I, II. М.: Мир, 1979.
3. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. М.: Мир, 1969.
4. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974.
5. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высш. шк., 2000.
6. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.
7. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1979.
8. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводимости. МЦ НМО, М., 2000.

### Раздел 2. Дополнительные вопросы.

Область исследования: **Аморфные и ультрадисперсные металлические системы**

1. Атомная структура границ. Геометрические модели, О-нуль решетка, решетка совпадающих узлов, полная решетка наложений, решетка зернограницных сдвигов. Принципы построения энергетических моделей границ зерен.



2. Дефекты межзеренных границ, собственные и вторичные (внесенные) зернограницные дислокации. Границы зерен специального и общего типа, их свойства.

3. Субмикроструктурные и нанокристаллические компактные металлические материалы. Способы их получения. Современные представления о структуре этих материалов. Явление сверхпластичности в субмикроструктурных состояниях, феноменология и механизмы.

4. Механические и физические свойства нанокристаллических компактных металлических сплавов. Фазовые и структурные состояния в ультрадисперсных средах. Физические свойства ультрадисперсных сред.

5. Аморфные металлические сплавы. Способы получения металлических стекол. Классификация аморфизирующихся систем. Основные особенности электронной структуры аморфных материалов. Термодинамические структурные и кинетические критерии, аморфизации металлических систем. Структура металлических стекол. Структурные модели и результаты экспериментальных исследований. Механические и физические свойства аморфных металлов.

#### **Рекомендуемая литература.**

1. Орлов А. Н. Границы зерен в металлах / А. Н. Орлов, В. Н. Переверзев, В. В. Рыбин. – М.: Металлургия, 1980. – 156 с.
2. Кайбышев О. А. Границы зерен и свойства металлов / О. А. Кайбышев, Р. З. Валиев. – М.: Металлургия, 1987. – 214 с.
3. Лихачев В. А. Континуальная теория дефектов / В. А. Лихачев, А. Е. Волков, В. Е. Шудегов. – Ленинград: Изд. Ленинградского университета, 1986. – 232 с.
4. Аморфные металлические сплавы / под ред. Ф. Е. Люборского. – М.: Металлургия, 1987. – 584 с.
5. Судзуки К. Аморфные металлы / К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото. – М.: Металлургия, 1987.
6. Займан Дж. Модели беспорядка / Дж. Займан – М.: Мир, 1982.
7. Валиев Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
8. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2007. – 416 с.
9. Meyers M. A. Mechanical properties of nanocrystalline materials / M. A. Meyers, A. Mishra, D. J. Benson // Progress in Materials Science. – 2006. – Vol. 51. – P. 427-556.
10. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: Издательский центр "Академия", 2005. – 192 с.

#### **Область исследования: Структурные фазовые переходы**

1. Изменение симметрии при фазовых переходах. Переходы типа смещения и



типа, упорядочения. Деформационные переходы. Статические волны смещения.

2. Кристаллографические схемы переходов. Позиционное (атомное) и ориентационное упорядочение. Сверхструктуры и статические концентрационные волны.

3. Звезды волновых векторов. Лифшицевские и нелифшицевские звезды. Соразмерные и несоизмерные структуры

4. Параметры порядка (диссимметричности) и неравновесный потенциал Ландау. Термодинамическая теория фазовых переходов. Переходы первого и второго рода.

5. Переходы первого рода, близкие ко второму роду. Переходы во внешнем потенциальном поле. Обобщенная восприимчивость и ее особенности в области фазового перехода.

6. Предпереходные явления. Динамика решетки в области фазовых переходов.

7. Параметр порядка, зависящий от координаты. Теория Гинзбурга-Ландау.

#### **Рекомендуемая литература.**

1. Ландау Л. Д. Статистическая физика, ч. 1 / Л. Д. Ландау, И. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1976. – 548 с.
2. Эффекты памяти формы и их применение в медицине / В. Э. Гюнтер, В. И. Итин, Л. А. Монасевич, Ю. И. Паскаль и др. – Новосибирск: Наука. 1992. – 842 с.
3. Хачатурян А. Т. Теория фазовых превращений и структура твердых растворов / А. Т. Хачатурян. – М.: Наука, 1974. – 384 с.
4. Хаимзен Б. В. Волны концентраций и смещений. Общий анализ / Б. В. Хаимзен, А. И. Потеекаев, Ю. И. Паскаль // Изв. Вузов. Физика. – 1993, № 6. – С. 3-19.
5. Паскаль Ю. И. О содержании понятий "фаза" и "фазовый переход" / Ю. И. Паскаль // Изв. Вузов. Физика. – 1968. – № 8. – С. 67-71.
6. Бруе А. Структурные фазовые переходы / А. Бруе, Р. Кауме. – М.: Мир, 1984. – 408 с.

#### **Область исследования: Электронная теория сплавов**

1. Энергетический спектр, плотность состояний, рентгеновские и оптические спектры сплавов.
2. Полная энергия и связанные с ней физические свойства.
3. Методы расчета электронной структуры неупорядоченных сплавов – методы виртуального кристалла, средней t-матрицы, когерентного потенциала.
4. Колебательные спектры в неупорядоченных сплавах.
5. Принципы электронной теории антиферромагнетизма.
6. Особенности электронной структуры аморфных материалов.

7. Фазовые переходы типа "беспорядок - порядок" и "смещения" в сплавах.
8. Связь электронной структуры с фазовыми переходами.

#### **Рекомендуемая литература.**

1. Брус К. А. Структурные фазовые переходы / К. А. Брус, Р. Каули. – М.: Мир, 1984. – 408 с.
2. Уайт Р. Дальний порядок в твердых телах / Р. Уайт, Т. Джебелл. – М.: Мир, 1982. – 448 с.
3. Эренрэйх Г. Электронная структура сплавов / Г. Эренрэйх, Л. Шварц. – М.: Мир, 1979. – 200 с.
4. Займан Дж. Модели беспорядка / Дж. Займан. – М.: Мир, 1982.
5. Теория и свойства неупорядоченных материалов : сб. статей / пер. с англ. под ред. В. Л. Бонч-Бруевича / Новости физики твердого тела; вып. 7 – М. : Мир, 1977. – 294 с.
6. Физическое материаловедение: В 3-х т. : пер. с англ. / под ред. Кана Р. У. – М.: Металлургия, 1987. – Т. 1: Атомное строение металлов и сплавов. – 640 с.

#### **4. Пример экзаменационного билета**

##### **БИЛЕТ № 1**

1. Кристаллические и аморфные тела. Трансляционная инвариантность. Ячейка Вигнера -Зейтца. Решетка Бравэ.
2. Теплоемкость по Энштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур.

Дополнительный вопрос из 2-го раздела содержания Программы в зависимости от выбранной области исследования.