

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский  
 государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)

Физический факультет

Кафедра физики полупроводников

Согласовано, декан ФФ



Бондарь А.Е.

2020 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА МОДУЛЯ**  
**«Физика конденсированного состояния»**  
 направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия  
**Курс 2, семестры 3-4**  
 профиль

**Физика конденсированного состояния**

Форма обучения: очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)					Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем				Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Индивидуальная работа с преподавателем/ Консультации в период занятий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Кандидатский экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3-4	360	96	80		24	118	32	2	6		2
Всего 360 часов /10 зачетных единиц из них: - контактная работа 210 часов - в интерактивных формах 104 часа											
Компетенции: УК-1, УК-5, ОПК-1, ПК-1, ПК-2											

Заведующий кафедрой физики полупроводников ФФ  
 академик РАН, д.ф.-м.н., А.В. Латышев

Ответственный за образовательную программу:

д.ф.-м. н., проф. С.В. Цыбуля

Новосибирск, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

Аннотация к рабочей программе модуля «Физика конденсированного состояния» .....	3
РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ Теория твердого тела для аспирантов .....	5
РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ Физические основы нанотехнологии для аспирантов.....	24
РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ Радиационная физика для аспирантов.....	41
РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ Нанодиагностика для аспирантов .....	57
КАНДИДАТСКИЙ ЭКЗАМЕН Модуль «Физика конденсированного состояния».....	73

## **Аннотация**

к рабочей программе модуля «**Физика конденсированного состояния**»

Направление: **03.06.01 Физика и астрономия**

Направленность (профиль): **Физика конденсированного состояния**

Рабочая программа по модулю «Физика конденсированного состояния» составлена в соответствии с требованиями СУОС по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации) и предназначена для аспирантов, обучающихся по профилю «Физика конденсированного состояния». Модуль включает в себя рабочие программы дисциплин «Теория твердого тела для аспирантов», «Физические основы нанотехнологии для аспирантов», «Радиационная физика для аспирантов» и «Нанодиагностика для аспирантов», направленные на подготовку к сдаче кандидатского экзамена по профилю «Физика конденсированного состояния», а также порядок подготовки к сдаче и проведения кандидатского экзамена по профилю «Физика конденсированного состояния».

Основная цель входящих в состав модуля дисциплин познакомить аспирантов с последними научными достижениями в области физики конденсированного состояния и практика презентации собственных научных результатов перед квалифицированной аудиторией.

Модуль направлен на формирование у обучающегося универсальных компетенций УК-1 и УК-5, а также общепрофессиональной компетенции ОПК-1 и профессиональных компетенций ПК-1, ПК-2.

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

### **Знания:**

УК-1.1. Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.

УК-5.1. Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.

ОПК-1.1. Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.

ПК-1.1. Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

ПК-2.1. Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

### **Умения:**

УК-1.2. Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.

УК-5.2. Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития.

ОПК-1.2. Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.

ПК-1.2. Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

ПК-2.2. Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

**Навыки:**

УК-5.3. Владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.

ОПК-1.3. Владеть способностью составлять и оформлять научно-технической документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.

Модуль «Физика конденсированного состояния» реализуется с третьего по четвертый семестры включительно (второй курс аспирантуры).

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции и практические занятия, доклады обучающихся по тематике, связанной с выполнением их научной работы, индивидуальная работа с преподавателем/консультации в период занятий. самостоятельная подготовка обучающихся.

Текущий контроль обеспечивается контролем посещения занятий, сдачей задач и представлением доклада по одному из разделов программы курса.

Промежуточная аттестация по дисциплинам – зачеты, по всему модулю – кандидатский экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы модуля составляет **360** академических часов / **10** зачетных единиц, в том числе:

1. Теория твердого тела для аспирантов - 216 часов/6 зачетных единиц.
- 2.1 Физические основы нанотехнологии для аспирантов - 108 часов/3 зачетных единицы.
- 2.2 Радиационная физика для аспирантов - 108 часов/3 зачетных единицы.
- 2.3 Нанодиагностика для аспирантов - 108 часов/3 зачетных единицы.
3. Кандидатский экзамен – 36 часов/1 зачетная единица.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)

---

Физический факультет

---

Кафедра физики полупроводников

---

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

### Теория твердого тела для аспирантов

направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия

**Курс 2, семестр 3-4**

профиль

**Физика конденсированного состояния**

Форма обучения: **очная**

Заведующий кафедрой физики полупроводников ФФ  
академик РАН, д.ф.-м.н., А.В. Латышев



---

Новосибирск 2020

## Содержание

Аннотация к рабочей программе дисциплины «Теория твердого тела для аспирантов»	7
1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы	9
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы	10
3. Трудоемкость дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающегося	10
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий	11
5. Перечень учебной литературы	14
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся	15
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины	16
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине	16
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине	16
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине	17

**Аннотация**  
**к рабочей программе дисциплины «Теория твердого тела для аспирантов»**  
» Направление: **03.06.01 Физика и астрономия**  
Направленность (профиль): **Физика конденсированного состояния**

Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» реализуется в рамках образовательной программы высшего образования – программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 03.06.01 «Физика и астрономия» профиль подготовки «Физика конденсированного состояния» по очной форме обучения на русском языке. Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» развивает знания, умения и навыки, сформированные у обучающихся по результатам общей базовой подготовки в рамках программ бакалавриата и магистратуры и не требует знаний по другим дисциплинам подготовки для аспирантов. Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» реализуется с третьего по четвертый семестры включительно, в рамках вариативной части дисциплин (модулей) в составе модуля «Физика конденсированного состояния» в качестве обязательной дисциплины и является базовой для осуществления научно-исследовательской деятельности и подготовки научно-квалификационной работы (диссертации).

Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» имеет своей целью дать обучающимся базовые знания по основным разделам физики конденсированного состояния: об атомной структуре, электронных свойствах и основных физических явлениях в твердотельных структурах, подготовить аспирантов к сдаче кандидатского экзамена по специальности. Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» выступает как важный фактор формирования у аспиранта целостного научного мировоззрения и физического мышления, умения использовать базовые физические законы, включая законы квантовой физики, для анализа явлений в конденсированных средах, конструктивных взглядов на решение научно-технических проблем современной полупроводниковой микро- и нанoeлектроники.

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

**Знания:**

УК-1.1. Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.

УК-5.1. Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.

ОПК-1.1. Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.

ПК-1.1. Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

ПК-2.1. Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

**Умения:**

УК-1.2. Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.

УК-5.2. Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития.

ОПК-1.2. Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.

ПК-1.2. Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

ПК-2.2. Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

**Навыки:**

УК-5.3. Владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.

ОПК-1.3. Владеть способностью составлять и оформлять научно-технической документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.

***Текущий контроль успеваемости:***

Текущий контроль успеваемости включает контроль посещаемости обучающимися занятий, сдача заданий, оценку их активности в ходе дискуссий и заключается в презентации аспирантом доклада по одному из разделов программы курса.

***Промежуточная аттестация:***

Промежуточная аттестация по дисциплине «Теория твердого тела для аспирантов» проводится по итогам завершения программы дисциплины в виде зачета, по результатам которого выставляется оценка «зачтено» или «не зачтено». Оценка «зачтено» может быть выставлена по результатам текущего контроля, если в ходе представления самостоятельно подготовленного доклада и ответов на вопросы обучающийся продемонстрировал уровень сформированности компетенций не ниже порогового. Оценка «зачтено» является положительным результатом прохождения промежуточной аттестации. На зачете для дополнительной проверки сформированности отдельных компетенций обучающемуся могут быть заданы вопросы по пройденному материалу.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции и практические занятия, доклады обучающихся по тематике, связанной с выполнением их научной работы, индивидуальная работа с преподавателем/консультации в период занятий. самостоятельная подготовка обучающихся, зачет.

Общий объем дисциплины – 6 зачетных единиц (216 часов).

**1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы**

Код	Компетенции, формируемые в рамках дисциплины
<b>УК-1. Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях</b>	
УК-1.1	Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.
УК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.
<b>УК-5. Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития</b>	
УК-5.1	Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.
УК-5.2	Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития, владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования.
УК-5.3	Обладать знаниями, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.
<b>ОПК-1. Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий</b>	
ОПК-1.1	Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.
ОПК-1.2	Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.
ОПК-1.3	Владеть способностью составлять и оформлять научно-технической документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.
<b>ПК-1. Способность построения теоретических моделей физических явлений и процессов в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>	
ПК-1.1	Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
ПК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
<b>ПК-2. Способность к решению научных и практических задач в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>	
ПК-2.1	Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
ПК-2.2	Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» реализуется в рамках образовательной программы высшего образования – программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 03.06.01 «Физика и астрономия» профиль подготовки «Физика конденсированного состояния» по очной форме обучения на русском языке. Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» развивает знания, умения и навыки, сформированные у обучающихся по результатам общей базовой подготовки в рамках программ бакалавриата и магистратуры и не требует знаний по другим дисциплинам подготовки для аспирантов. Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» реализуется с третьего по четвертый семестры включительно, в рамках вариативной части дисциплин (модулей) в составе модуля «Физика конденсированного состояния» в качестве обязательной дисциплины и является базовой для осуществления научно-исследовательской деятельности и подготовки научно-квалификационной работы (диссертации).

Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» имеет своей целью дать обучающимся базовые знания по основным разделам физики конденсированного состояния: об атомной структуре, электронных свойствах и основных физических явлениях в твердотельных структурах, подготовить аспирантов к сдаче кандидатского экзамена по специальности. Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» выступает как важный фактор формирования у аспиранта целостного научного мировоззрения и физического мышления, умения использовать базовые физические законы, включая законы квантовой физики, для анализа явлений в конденсированных средах, конструктивных взглядов на решение научно-технических проблем современной полупроводниковой микро- и нанoeлектроники.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции и практические занятия, доклады обучающихся по тематике, связанной с выполнением их научной работы, индивидуальная работа с преподавателем/консультации в период занятий. самостоятельная подготовка обучающихся, зачет.

Общий объем дисциплины – 6 зачетных единиц (216 часов).

Дисциплины (практики), для изучения которых необходимо освоение дисциплины Теория твердого тела для аспирантов:

Кандидатский экзамен по модулю Физика конденсированного состояния

## 3. Трудоемкость дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающегося

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)					
		Контактная работа обучающихся с преподавателем				Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Индивидуальная работа с преподавателем/ Консультации в период занятий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Кандидатский экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	108	32	32		6	36			2		

4	108	32	32		6	36			2		
ИТОГО	216	64	64		12	72			4		
Всего 216 часов /6 зачетных единиц из них: - контактная работа 144 часа - в интерактивных формах 56 часов											
Компетенции: УК-1, УК-5, ОПК-1, ПК-1, ПК-2											

#### 4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						Консультации перед экзаменом (в часах)	Промежуточная аттестация (в часах)	
			Всего	Аудиторные часы			Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Сам. работа во время промежуточной аттестации			
				Лекции	Практические занятия	Индивидуальная работа с преподавателем /Консультации в период занятий					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
<b>3 семестр</b>											
1.	Структура твердых тел: кристаллы, квазикристаллы, аморфные материалы, стекла.	1-4	16	4	8		4				
2.	Фононы в кристаллах.	5-9	16	4	8		4				
3.	Электроны в кристаллах.	10-12	16	4	8		4				
4.	Элементарные возбуждения в твердых телах.	13-16	16	4	8		4				
5.	Научные доклады обучающихся по тематикам их научных исследований	1-16	42	16		6	20				
6.	Зачет	17	2							2	
7.	Всего по семестру		108	32	32	6	36			2	
<b>4 семестр</b>											
8.	Кинетика электронов.	1-4	16	4	8		4				
9.	Фазовые переходы в твердых телах.	5-9	16	4	8		4				
10.	Физика квантовых жидкостей.	10-12	16	4	8		4				

11.	Оптика полупроводников.	13-16	16	4	8		4			
12.	Научные доклады обучающихся по тематикам их научных исследований	1-16	42	16		6	20			
13.	Зачет	17	2							2
14.	Всего по семестру		108	32	32	6	36			2
<b>Итого по дисциплине</b>			216	64	64	12	72			4

Лекционные занятия проводятся в интерактивной форме, подразумевающей со стороны преподавателя постановку проблемы по указанным темам, формулировку некоторых практических заданий и задач, подходы к решению которых должны найти обучающиеся в ходе семинара, обсуждение проблемных вопросов, в том числе, с элементами свободной дискуссии с участием обучающихся и преподавателя. На занятиях также заслушиваются доклады обучающихся по заданным темам, сопровождающиеся уточняющими вопросами со стороны преподавателя и других обучающихся. Темы закрепляются в ходе самостоятельной работы обучающегося по решению задач с использованием рекомендованной литературы, а также в процессе научно-исследовательской деятельности.

### Содержание дисциплины:

#### 3 семестр

Темы лекций:

1. Структура конденсированных сред. Колебания решетки. Фононный спектр кристаллов.
2. Электроны в решетке: металлы, полуметаллы, диэлектрики, полупроводники. Топологические изоляторы. Электронный спектр неупорядоченных твердых тел.
3. Элементарные возбуждения (квазичастицы) в твердых телах.
4. Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации.

Темы практических занятий:

1. Химическая связь и атомная структура.

Рассматриваются типы химической связи и атомной структуры кристаллических твердых тел и, в частности, важнейших полупроводников.

2. Колебания решетки. Фононы.

Рассматриваются уравнения движения атомов в кристалле и их решения, закон дисперсии упругих волн, акустические и оптические колебания, квантование колебаний, понятие квазичастицы на примере фонона.

3. Квантование колебаний одномерной решетки. Теплоемкость кристаллической решетки.

Рассматриваются квантование одномерной цепочки. Роль нелинейности (кубический и 4 порядка члены в гамильтониане). Определяется теплоемкость одно- дву- и трехмерной решеток., вклад в теплоемкость от оптических фононов.

4. Основы зонной теории.

Для электрона в поле  $U(x) = U_0 \cos gx$ ,  $g = 2\pi/a$  найти энергетический спектр и волновые функции в приближении почти свободных электронов и приближении сильной связи [7.2]

$$\cos(pa) = \cos(ka) + \frac{m\beta}{\hbar^2 k} \sin(ka)$$

Спектр электронов в модели Кронига-Пенни имеет вид

Получить отсюда приближения почти свободных электронов и приближение сильной связи [7.1]

Получить спектр электронов в приближении сильной связи исходя из гамильтониана  $H = E_0 \sum_n c_n^+ c_n + t \sum_n (c_n^+ c_{n+1} + h.c.)$  Учет прыжков между следующими за ближайшими

соседями в этой задаче приводит к неверному результату. Почему?

5. Взаимодействие между электронами. Экранирование. Плазмоны.

- Задача экранирования (уравнение Пуассона)
- Экранирование невырожденным электронным газом
- Экранирование 2D электронами
- Квантовые эффекты в задаче экранирования (фриделевские осцилляции)
- Плазмоны в трехмерном металле
- Поверхностные плазмоны [20.6]
- Плазмоны в двумерном слое [20.8]

Продемонстрировать наличие щели в задачах 1, 2 и ее отсутствие в задаче 3

6. Электрон-фононное взаимодействие.

- Электрон-фононное взаимодействие в модели Кронига-Пенни
- Электрон-фононное взаимодействие в приближении туннельного гамильтониана
- Электрон-фононное взаимодействие. Пьезоэффект

7. Магнетизм твердых тел.

• Убедиться, что преобразование Холстейна-Примакова приводит к правильным коммутационным соотношениям для операторов спина

• Получить дисперсионное соотношение для ферромагнитных экситонов. Убедиться, что «антиферромагнитная» волновая функция не является собственной для гамильтониана Гайзенберга. Сравнить энергии АФ и синглетного состояний

#### 4 семестр

Темы лекций:

1. Электроны в магнитном поле. Классические и квантовые эффекты Холла. Магнетосопротивление. Циклотронный резонанс.
2. Фазовые переходы в твердых телах. Ферромагнетизм твердых тел. Антиферромагнетизм. Фазовые переходы в сегнетоэлектриках. Переходы Пайердса, Мотта и Андерсена.
3. Теория квантовых жидкостей. Квантовая Бозе-жидкость. Сверхтекучесть. Квантовая Ферми-жидкость. Сверхпроводимость. Сверхпроводники 1 и 2 рода.
4. Поглощение света в полупроводниках. Межзонное поглощение света. Поглощение с участием примесей. Поглощение свободными носителями. Поглощение света в пористых средах и нанокристаллах.

Темы практических занятий:

1. Проводимость металлов.

- Проводимость металла в модели Друде
- Вклад в проводимость от рассеяния на примеси: шар радиуса R – классическая и квантовая задачи

- Электрон-фононное рассеяние. Температурная зависимость. 1D и 2D модели
  2. Кинетическое уравнение Больцмана
    - Найти проводимость электронного газа в приближении времени релаксации
    - Показать, что если электронный газ невырожден, а тепловая скорость электронов больше скорости звука, то рассеяние электронов на акустических фононах является квазиупругим.
    - Решить линеаризованное уравнение Больцмана для электронов в неоднородном электрическом поле.
  3. Электроны в магнитном поле. Эффект Холла. Магнетосопротивление.
    - Найти компоненты тензора электрической проводимости в слабом магнитном поле в приближении времени релаксации
    - Решить задачу 1 в переменном магнитном поле
    - Обсудить задачу 1 в случае 2D электронов в сильном магнитном поле (квантовый эффект Холла)
    - Показать, что в пределе низких температур в однозонном приближении магнетосопротивление равно нулю.
  4. Оптика полупроводников
    - Найти коэффициент поглощения при межзонных переходах прямозонного полупроводника. Обсудить эту же задачу для непрямозонного полупроводника
    - Найти коэффициент поглощения при ионизации водородоподобной примеси (донора или акцептора)
    - Оценить время безызлучательной рекомбинации электронов в прямозонном полупроводнике в случае низких и высоких температур
  5. Электроны в двумерной системе.
    - Обсудить задачу 1 из семинара 10 для 2D электронов (межзонные оптические переходы).
    - Найти электронную теплоемкость двумерного газа.
    - Найти уровни энергии электронов в квантовой проволоке с прямоугольным спектром в присутствии заряженной примеси.
    - Записать гамильтониан Рашбы (спин-орбитальное взаимодействие на изотропной ориентированной поверхности) и найти спектр электронов.
  6. Другие низкоразмерные задачи.
    - Вблизи конической точки электроны в графене описываются гамильтонианом  $\hat{H} = v_F \sigma_x p_x + v_F \sigma_y p_y$ , здесь  $\sigma_x, \sigma_y$  - матрицы Паули, а оператор импульса  $p$  имеет координаты  $x$  и  $y$ . Графен свернут по оси  $y$  в нанотрубку большего радиуса  $R$ . Найти собственные функции и спектр электронов в нанотрубке.
    - Оценить температуру конденсации экситонов в электронно-дырочные капли в кремнии при облучении светом мощностью  $0.1 \text{ Вт/см}^2$ . Коэффициент поглощения  $10^3 \text{ см}^{-1}$ . Положить, воспользоваться уравнением Ван-Дер-Ваальса.
  7. Некристаллические твердые материалы.
 

Рассматриваются атомная структура и особенности энергетического спектра неупорядоченных (аморфных) полупроводников, плотность состояний и локализация электронных состояний, роль ближнего порядка в формировании электронного спектра некристаллических полупроводников, спектры оптического поглощения.

Индивидуальная работа с преподавателем

Перечень работ	Объем, час
Обсуждение плана доклада по избранной теме, рекомендации преподавателя относительно литературных источников, которые можно использовать при подготовке доклада, индивидуальные консультации по ходу подготовки доклада. Обсуждение задач, стоящих перед аспирантом в рамках его научно-исследовательской работы, и возможных способов их решения с привлечением различных методов.	12

#### Самостоятельная работа обучающихся

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Самостоятельная подготовка к лекционным и практическим занятиям с использованием учебной литературы. Подготовка доклада по избранной теме. Поиск литературных источников, работа с научным текстом, анализ литературных данных. Подготовка к практическим занятиям. Решение практических заданий.	72

### **5. Перечень учебной литературы**

#### 5.1 Основная литература

1. Займан Дж. Физика твердого тела [Электронный ресурс] Электрон. дан. Ижевск: Регуляр. и хаотич. динамика, 2002. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM):
2. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела: [учебник: для студентов естественнонаучных и инженерных факультетов вузов] / Ч. Киттель; пер. с англ. под общ. ред. А.А. Гусева Изд. 2-е, стер Москва : Альянс, 2013. 791 с..

#### 5.2 Дополнительная литература

3. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников: [Учеб. пособие для физ. спец. вузов] / А.И. Ансельм 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука., 1978. 615 с.
4. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твёрдого тела. Т. I, II. М.: Мир, 1979.
5. Кузнецов Е.А., Шапиро Д.А. Методы математической физики: курс лекций, НГУ, 2011.

### **6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся**

6. А.В. Ненашев, В.Л. Альперович, Колебания кристаллической решетки. Учебное пособие. РИЦ НГУ, Новосибирск, 2015.
7. Левинштейн М.Е., Симин Г.С. Барьеры. М.: Наука, 1987. Библиотечка "Квант", вып. 65.
8. Брагинский Л. С. , Магарилл Л. И., Махмудиан М. М., Погосов А. Г. , Чаплик А. В., Энтин М. В. Сборник задач по теории твердого тела. Новосибирск, НГУ, 2013.
9. Галицкий В. М., Карнаков Б. М., Коган В. И. Задачи по квантовой механике. М.: Наука, 1981.

Обучающийся в аспирантуре должен уметь самостоятельно осуществлять научный поиск литературы, необходимой при подготовке доклада по избранной теме.

Обучающиеся полностью обеспечены необходимой научной литературой за счет фондов библиотеки НГУ (<http://libra.nsu.ru/>). Обучающимся, проходящим практику в Институтах СО РАН, предоставляется доступ к информационным ресурсам на тех же основаниях, что и научным сотрудникам этих институтов на основании договоров о прохождении практической подготовки.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины**

Освоение дисциплины используются следующие ресурсы:

- раздел "Образование" сайта ИФП СО РАН - URL:  
<http://www.isp.nsc.ru/obrazovanie/aspirantura/obshchaya-informatsiya>
- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

Взаимодействие обучающегося с преподавателем (синхронное и (или) асинхронное) осуществляется через личный кабинет студента в ЭИОС.

### 7.1 Современные профессиональные базы данных:

1. Полнотекстовые журналы Springer Journals за 1997-2020 г., электронные книги (2005-2020 гг.), коллекция научных биомедицинских и биологических протоколов SpringerProtocols, коллекция научных материалов в области физических наук и инжиниринга SpringerMaterials, реферативная БД по чистой и прикладной математике zbMATH.
2. Электронная библиотека диссертаций Российской государственной библиотеки (ЭБД РГБ).
3. Полнотекстовые электронные ресурсы Freedom Collection издательства Elsevier (Нидерланды) (23 предметные коллекции).
4. Электронные ресурсы Web of Science Core Collection (Thomson Reuters Scientific LLC.), Journal Citation Reports + ESI.
5. Электронные БД JSTOR (США). 15 предметных коллекций: Arts & Sciences I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, Life Sciences, Health & General Science, Mathematics & Statistics, Ecology & Botany, Language & Literature, Business I, II.).
6. БД Scopus (Elsevier).

### 7.2. Информационные справочные системы

7. Поисковая платформа "Web of Knowledge"

[http://apps.webofknowledge.com/WOS\\_GeneralSearch\\_input.do?product=WOS&search\\_mode=GeneralSearch&SID=S2kBCc@.@5IIfkFB7B9a&preferencesSaved=&highlighted\\_tab=WOS](http://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=S2kBCc@.@5IIfkFB7B9a&preferencesSaved=&highlighted_tab=WOS)

8. <http://wokinfo.com/russian>

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

## **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации;
2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## **10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине и индикаторов их достижения, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы по дисциплине представлен в разделе 1.

### **10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

#### **Текущий контроль успеваемости:**

Текущий контроль включает контроль посещаемости обучающимися еженедельных занятий, оценку их активности в ходе дискуссий, презентация аспирантом доклада по одному из разделов программы курса.

#### **Промежуточная аттестация:**

Промежуточная аттестация по дисциплине «Теория твердого тела для аспирантов» проводится по итогам завершения программы дисциплины в виде зачета, по результатам которого выставляется оценка «зачтено» или «не зачтено». Оценка «зачтено» может быть выставлена по результатам текущего контроля, если в ходе представления самостоятельно подготовленного доклада и ответов на вопросы обучающийся продемонстрировал уровень сформированности компетенций не ниже порогового. Оценка «зачтено» является положительным результатом прохождения промежуточной аттестации. На зачете для дополнительной проверки сформированности отдельных компетенций обучающемуся могут быть заданы вопросы по пройденному материалу.

### **Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине Теория твердого тела для аспирантов**

Таблица 10.1

Код компетенции	Результат обучения по дисциплине	Оценочное средство
<b>УК-1.</b>	<b>Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях</b>	Работа на занятиях Представление доклада Зачет
УК-1.1	Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.	
УК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа	

	современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.	
<b>УК-5 Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития</b>		
УК-5.1	Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.	Работа на занятиях Представление доклада Зачет
УК-5.2	Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития.	
УК-5.3	Владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.	
<b>ОПК-1. Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий</b>		
ОПК-1.1	Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.	Работа на занятиях Представление доклада Зачет
ОПК-1.2	Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.	
ОПК-1.3	Владеть способностью составлять и оформлять научно-техническую документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.	
<b>ПК-1. Способность построения теоретических моделей физических явлений и процессов в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>		
ПК-1.1	Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	Работа на занятиях Представление доклада Зачет
ПК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	
<b>ПК-2. Способность к решению научных и практических задач в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>		
ПК-2.1	Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	Работа на занятиях Представление доклада Зачет
ПК-2.2	Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (не зачтено)	Пороговый уровень (зачтено)	Базовый уровень (зачтено)	Продвинутый уровень (зачтено)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	УК 1.1 УК 5.1 ОПК 1.1 ПК 1.1 ПК 2.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	УК 1.2 УК 5.2 ОПК 1.2 ПК 1.2 ПК 2.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	УК 5.3 ОПК 1.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы

		грубых ошибок.			знания по решению нестандартных задач.
--	--	----------------	--	--	--

***Типовые контрольные задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения***

**Тематика докладов дисциплины «Теория твердого тела для аспирантов».**

Ниже приведена примерная тематика докладов дисциплины (конкретная тема доклада определяется преподавателем совместно с обучающимся с учетом специфики научных исследования аспиранта).

1. Экспериментальные методы изучения колебаний решетки: поглощение и комбинационное рассеяние света, рассеяние нейтронов.
2. Движение электронов и дырок во внешних полях. Определение эффективных масс из циклотронного резонанса.
3. Поверхностные и контактные явления в полупроводниках. Работа выхода и электронное сродство. Методы определения работы выхода.
4. Кинетические явления в полупроводниках: проводимость, эффект Холла и термо-ЭДС. Механизмы рассеяния носителей заряда: рассеяние на заряженных примесях, акустических и оптических фононах.
5. Электронный транспорт в низкоразмерных структурах: квантование контактанса в квантовых проволоках, эффект Шубникова-де Гааза в двумерном электронном газе, квантовый эффект Холла.
6. Полупроводниковые гетеропереходы. Энергетические зонные диаграммы гетеропереходов. Применения гетеропереходов в микро- и оптоэлектронике.

**Контрольные вопросы и задания по разделам программы курса**

**Раздел 1.** Структура твердых тел: кристаллы, квазикристаллы, аморфные материалы, стекла

1. Структура жидких и твердых тел. Твердые тела : кристаллические, аморфные, поликристаллические, квазикристаллические
2. Типы кристаллических решеток. Решетки Бравэ.
3. Прямая и обратная решетки. Свойства обратной решетки
4. Теорема Блоха

**Раздел 2.** Фононы в кристаллах

1. Колебания решетки. Фононный спектр решетки с одним атомом в элементарной ячейке
2. Колебания решетки. Фононный спектр решетки с двумя атомами в элементарной ячейке
3. Динамика решетки графена
4. Квантование решеточных мод. Фононы
5. Теплоемкость кристаллической решетки
6. Дифракция на решетке

**Раздел 3.** Электроны в кристаллах

1. Электроны в кристаллической решетке. Модель почти свободных электронов
2. Электроны в кристаллической решетке. Модель сильной связи
3. Статистика электронов в кристалле. Электронный вклад в теплоемкость
4. Зонная структура кристаллов. Металлы, полуметаллы, диэлектрики, полупроводники.
5. Зонная структура графена. Топологические изоляторы.

**Раздел 4.** Элементарные возбуждения в твердых телах

1. Элементарные возбуждения в твердых телах. Экситоны, плазмоны.

2. Элементарные возбуждения в твердых телах. Поляроны
3. Взаимодействие с внешним электро-магнитным полем. Поляритоны
4. Спин во внешнем поле. Магноны.

### Раздел 5. Кинетика электронов

1. Кинетическое уравнение Больцмана. Электропроводность
2. Кинетическое уравнение Больцмана. Теплопроводность.
3. Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации. Рассеяние на кулоновской примеси.
4. Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации. Рассеяние на фононах.
5. Электроны в магнитном поле. Эффект Холла. Циклотронный резонанс. Магнетосопротивление.
6. Электроны в квантующем магнитном поле. Уровни Ландау. Квантовый эффект Холла.

### Раздел 6. Фазовые переходы в твердых телах

1. Фазовые переходы в твердых телах. Теория Ландау. Ферромагнетизм.
2. Фазовые переходы в твердых телах. Теория Ландау. Переходы в сегнетоэлектриках
3. Фазовые переходы в твердых телах. Переходы Мотта, Андерсена, Пайерлса.

### Раздел 7. Физика квантовых жидкостей

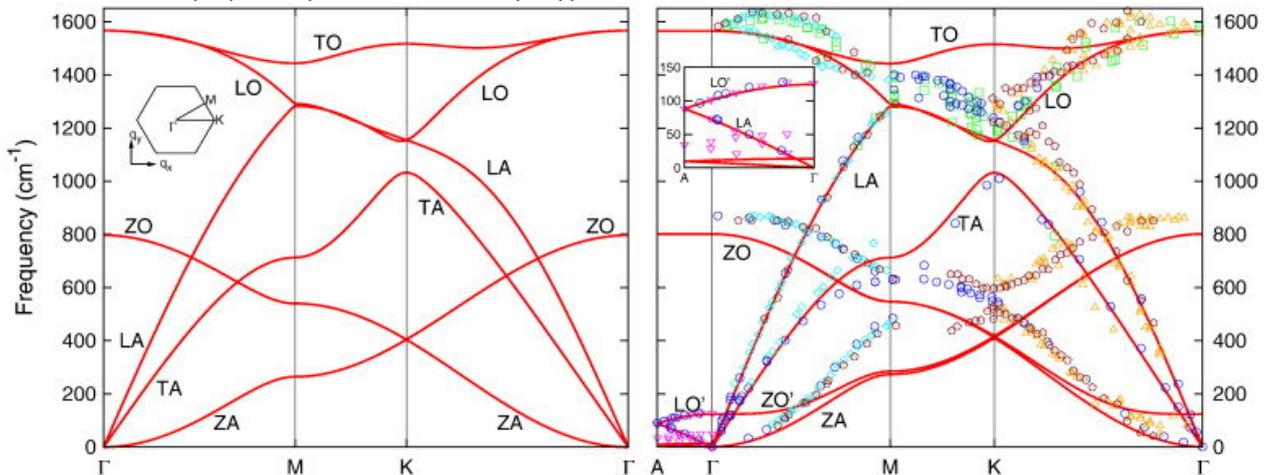
1. Квантовая Бозе-жидкость. Сверхтекучесть.
2. Квантовая Ферми-жидкость. Сверхпроводимость. Модель БКШ.
3. Квантовая Ферми-жидкость. Сверхпроводимость. Сверхпроводник в магнитном поле. Сверхпроводники I и II рода

### Раздел 8 Оптика полупроводников

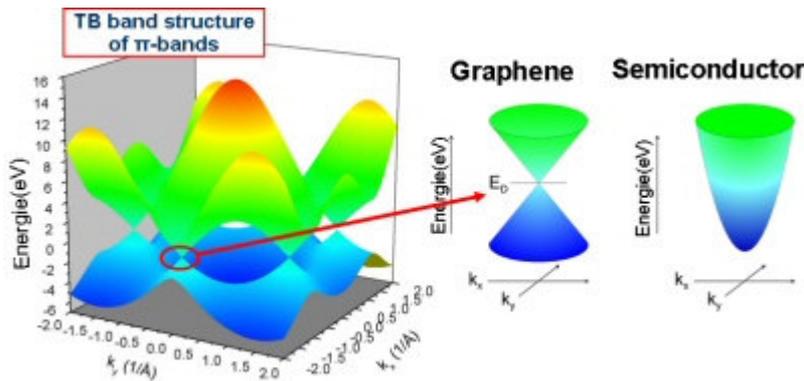
1. Поглощение на свободных носителях
2. Поглощение с участием примеси
3. Межзонное поглощение света в прямозонном материале
4. Межзонное поглощение в непрямозонном материале
5. Поглощение света в нанокристаллах

### 5.3 Задачи для самостоятельного решения

1. На Рис. 1 Показан фононный спектр графена. Нижняя ZA мода  $\omega = \beta k^2$  ( $\beta = 6 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ) соответствует колебаниям в направлении, перпендикулярном плоскости листа. Предполагая наличие только этой ветви, определить температурную зависимость фононной компоненты теплоемкости графена при низких температурах.



2. На Рис. 2 показана электронная зонная структура графена. Фермиевская скорость  $v_F$  вблизи точки Дирака ( $E = \hbar v_F \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ ) равна  $10^6 \text{ м/с}$ . Предполагая уровень Ферми совпадающим с точкой Дирака, определить температурную зависимость электронной компоненты теплоемкости графена при низких температурах.



3. Фононный спектр одномерной решетки имеет вид

$$\omega = 2\sqrt{\frac{\alpha}{m}} \left| \sin \frac{ka}{2} \right|.$$

Определить температурную зависимость фононной компоненты теплоемкости при низких температурах.

4. Электронный спектр одномерной решетки имеет вид

$$\varepsilon(k) = 2t \cos ka.$$

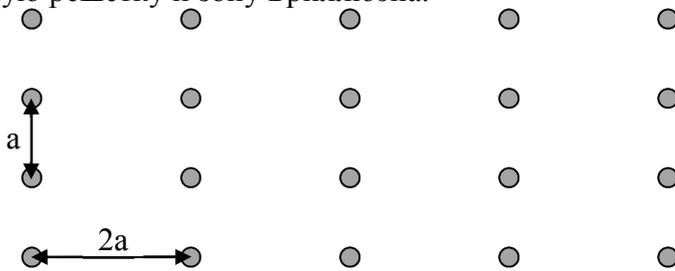
Считая уровень Ферми заданным, определить температурную зависимость электронной компоненты теплоемкости при низких температурах.

5. Электронный спектр двумерной решетки сильной связи имеет вид

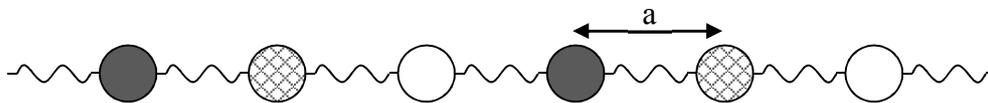
$$\varepsilon(\mathbf{k}) = 2t(\cos k_x a + \cos k_y a).$$

Определить эффективную массу дна зоны проводимости. Предполагая последнюю заполненной наполовину, изобразить поверхность Ферми.

6. Для изображенной здесь двумерной решетки нарисуйте ячейку Вигнера-Зейтца, обратную решетку и зону Бриллюэна.



7. Изобразите (качественно) закон дисперсии продольных колебаний одномерной цепочки, состоящей из атомов трёх типов:



Считать, что массы атомов разных типов близки друг к другу, но не равны.

### Вопросы к экзамену:

1. Структура жидких и твердых тел. Твердые тела: кристаллические, аморфные, поликристаллические, квазикристаллические
2. Типы кристаллических решеток. Решетки Бравэ.
3. Прямая и обратная решетки. Свойства обратной решетки
4. Теорема Блоха
5. Колебания решетки. Фононный спектр решетки с одним атомом в элементарной ячейке
6. Колебания решетки. Фононный спектр решетки с двумя атомами в элементарной ячейке

7. Квантование решеточных мод. Фононы
8. Теплоемкость кристаллической решетки
9. Дифракция на решетке
10. Электроны в кристаллической решетке. Модель почти свободных электронов
11. Электроны в кристаллической решетке. Модель сильной связи
12. Статистика электронов в кристалле. Электронный вклад в теплоемкость
13. Зонная структура кристаллов. Металлы, полуметаллы, диэлектрики, полупроводники.
14. Зонная структура графена. Топологические изоляторы.
15. Элементарные возбуждения в твердых телах. Экситоны, плазмоны.
16. Спин во внешнем поле. Магноны.
17. Оптические свойства твердых тел. Поглощение света в полупроводниках.
18. Кинетическое уравнение Больцмана. Электропроводность
19. Кинетическое уравнение Больцмана. Теплопроводность.
20. Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации. Рассеяние на кулоновской примеси.
21. Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации. Рассеяние на фононах.
22. Электроны в магнитном поле. Эффект Холла. Циклотронный резонанс. Магнетосопротивление.
23. Электроны в квантующем магнитном поле. Уровни Ландау.
24. Фазовые переходы в твердых телах. Теория Ландау. Ферромагнетизм.
25. Фазовые переходы в твердых телах. Теория Ландау. Переходы в сегнетоэлектриках
26. Фазовые переходы в твердых телах. Переходы Мотта, Андерсена, Пайерлса.
27. Квантовая Бозе-жидкость. Сверхтекучесть.
28. Квантовая Ферми-жидкость. Сверхпроводимость. Модель БКШ.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)

Физический факультет

---

Кафедра физики полупроводников

---

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

### Физические основы нанотехнологии для аспирантов

направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия

Курс 2, семестр 3

профиль

Физика конденсированного состояния

Форма обучения: очная

Разработчик:

д.ф.-м.н., профессор, член - корр. РАН

А.В. Двуреченский

Заведующий кафедрой физики полупроводников ФФ  
академик РАН, д.ф.-м.н.,

А.В. Латышев

Новосибирск 2020

## Содержание

Аннотация к рабочей программе дисциплины «Физические основы нанотехнологии для аспирантов».....	26
1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы.....	28
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.....	29
3. Трудоемкость дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающегося.....	29
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий.....	30
5. Перечень учебной литературы.....	33
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.....	34
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.....	34
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.....	35
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....	35
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.....	35

## **Аннотация**

к рабочей программе дисциплины «**Физические основы нанотехнологии для аспирантов**»

Направление: **03.06.01 Физика и астрономия**

Направленность (профиль): **Физика конденсированного состояния**

Дисциплина «Физические основы нанотехнологии для аспирантов» реализуется в рамках образовательной программы высшего образования – программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 03.06.01 «Физика и астрономия» профиль подготовки «Физика конденсированного состояния» по очной форме обучения на русском языке. Дисциплина «Физические основы нанотехнологии для аспирантов» развивает знания, умения и навыки, сформированные у обучающихся по результатам общей базовой подготовки в рамках программ бакалавриата и магистратуры, и не требует знаний по другим дисциплинам подготовки для аспирантов. Курс входит в набор вариативных дисциплин, направленных на подготовку к сдаче экзаменов кандидатского минимума и подготовки научно-квалификационной работы (диссертации), для аспирантов, обучающихся по профилю подготовки «Физика конденсированного состояния».

Основными задачами, стоящими перед изучением данной дисциплины является углубленное изучение теоретических вопросов физики полупроводников, развитие практических навыков решения задач в области физики полупроводников, применения квантово-оптических методов в системах анализа вещества, передачи и обработки информации, в технологических и измерительных оптических системах, формирование у аспирантов представления о современных фундаментальных и прикладных проблемах физики полупроводников, её связи с лазерной физикой, проблемах приложения квантово-оптических методов исследования в науке и технике, Формирование у аспирантов представления о теоретических основах квантово-оптических методов обработки информации (квантовые вычисления и квантовая коммуникация), об основных идеях и достижениях в этой области.

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

### **Знания:**

УК-1.1. Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.

УК-5.1. Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.

ОПК-1.1. Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.

ПК-1.1. Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

ПК-2.1. Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

### **Умения:**

УК-1.2. Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки

актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.

УК-5.2. Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития.

ОПК-1.2. Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.

ПК-1.2. Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

ПК-2.2. Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

### **Навыки:**

УК-5.3. Владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.

ОПК-1.3. Владеть способностью составлять и оформлять научно-технической документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.

### ***Текущий контроль успеваемости:***

Текущий контроль успеваемости включает контроль посещаемости обучающимися занятий, сдачу заданий, оценку их активности в ходе дискуссий и заключается в презентации аспирантом доклада по одному из разделов программы курса.

### ***Промежуточная аттестация:***

Промежуточная аттестация по дисциплине «Физические основы нанотехнологии для аспирантов» проводится по итогам завершения программы дисциплины в виде зачета, по результатам которого выставляется оценка «зачтено» или «не зачтено». Оценка «зачтено» может быть выставлена по результатам текущего контроля, если в ходе представления самостоятельно подготовленного доклада и ответов на вопросы обучающийся продемонстрировал уровень сформированности компетенций не ниже порогового. Оценка «зачтено» является положительным результатом прохождения промежуточной аттестации. На зачете для дополнительной проверки сформированности отдельных компетенций обучающемуся могут быть заданы вопросы по пройденному материалу.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции и практические занятия, доклады обучающихся по тематике, связанной с выполнением их научной работы, индивидуальная работа с преподавателем/консультации в период занятий. самостоятельная подготовка обучающихся, зачет.

Общий объем дисциплины – 3 зачетных единицы (108 часов).

**1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы**

Код	Компетенции, формируемые в рамках дисциплины
<b>УК-1. Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях</b>	
УК-1.1	Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.
УК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.
<b>УК-5. Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития</b>	
УК-5.1	Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.
УК-5.2	Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития, владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования.
УК-5.3	Обладать знаниями, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.
<b>ОПК-1. Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий</b>	
ОПК-1.1	Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.
ОПК-1.2	Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.
ОПК-1.3	Владеть способностью составлять и оформлять научно-технической документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.
<b>ПК-1. Способность построения теоретических моделей физических явлений и процессов в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>	
ПК-1.1	Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
ПК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
<b>ПК-2. Способность к решению научных и практических задач в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>	
ПК-2.1	Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
ПК-2.2	Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Физические основы нанотехнологии для аспирантов» реализуется в рамках образовательной программы высшего образования – программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 03.06.01 «Физика и астрономия» профиль подготовки «Физика конденсированного состояния» по очной форме обучения на русском языке. Дисциплина «Физические основы нанотехнологии для аспирантов» развивает знания, умения и навыки, сформированные у обучающихся по результатам общей базовой подготовки в рамках программ бакалавриата и магистратуры, и не требует знаний по другим дисциплинам подготовки для аспирантов. Курс входит в набор вариативных дисциплин, направленных на подготовку к сдаче экзаменов кандидатского минимума и подготовки научно-квалификационной работы (диссертации), для аспирантов, обучающихся по профилю подготовки «Физика конденсированного состояния».

Основными задачами, стоящими про изучении данной дисциплины - дать обучающимся базовые знания по основным разделам нанотехнологии полупроводников: методы и подходы, обеспечивающие создание материалов (структур), содержащие элементы с размерами нанометрового диапазона (1-100 нм), приводящими к принципиально новым свойствам и характеристикам, методы формирования наноструктур на поверхности полупроводниковых кристаллов в рамках развития технологии молекулярно-лучевой эпитаксии, нанесение металлических и диэлектрических пленок при физическом, химическом и плазменном осаждении материала, микролитографии, анизотропном селективном травлении..

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции и практические занятия, доклады обучающихся по тематике, связанной с выполнением их научной работы, индивидуальная работа с преподавателем/консультации в период занятий. самостоятельная подготовка обучающихся, зачет.

Общий объем дисциплины – 3 зачетных единицы (108 часов).

Дисциплины (практики), для изучения которых необходимо освоение дисциплины Физические основы нанотехнологии для аспирантов:

Кандидатский экзамен по модулю Физика конденсированного состояния

## 3. Трудоемкость дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающегося

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)					Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем				Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Индивидуальная работа с преподавателем/консультации в период занятий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Кандидатский экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	108	32	16		12	46			2		
Всего 108 часов /3 зачетных единицы, из них: - контактная работа 62 часа - в интерактивных формах 28 часов											
Компетенции: УК-1, УК-5, ОПК-1, ПК-1, ПК-2											

**4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий**

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						Консультации перед экзаменом	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы			Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции	Практические занятия	Индивидуальная работа с преподавателем /Консультации в период занятий				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	Фронт нанотехнологических исследований: естественные границы развития существующей микроэлектроники; создание объектов по принципам «сверху-вниз» и «снизу-вверх».	1-2	6	2	2		2			
2.	Методы молекулярно-лучевой эпитаксии и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений.	3-4	6	2	2		2			
3.	Нанесение металлических и диэлектрических пленок при физическом распылении	5-6	6	2	2		2			
4.	Стимулированное плазмой осаждение из газовой фазы.	7	6	2	2		2			
5.	Позитивные и негативные резисты. Фоторезисты: фотохимические свойства, фоточувствительность, растворимость, разрешающая способность. Радиационные резисты: рентгеновские, ионные, электронные.	8-9	6	2	2		2			
6.	Оптическая литография: элементы дифракционной теории формирования изображений; разрешение, практическое разрешение.	10	6	2	2		2			

	Внешний и внутренний эффекты близости.									
7.	Электронная литография: рассеяние пучка электронов при экспонировании резистов. Рентгеновская литография.	11	4	2			2			
8.	Ионно-лучевая литография. Ионно-лучевое травление.	12	6	2	2		2			
9.	Реактивное ионно-лучевое травление. Реактивное ионное травление. Травление под действием ультрафиолетового излучения.	13-14	4	2			2			
10.	Чистые комнаты, их классификация	15	6	2	2		2			
11.	Требования к оборудованию и технологическим процессам	16	4	2			2			
12.	Научные доклады обучающихся по тематикам их научных исследований	1-16	46	10		12	24			
13.	Зачет	17	2							2
<b>Всего</b>			108	32	16	12	46			2

### Программа курса по разделам и темам

#### 1. *Введение в физические основы нанотехнологии.*

- 1.1 Фронт нанотехнологических исследований: естественные границы развития существующей микроэлектроники;
- 1.2 Создание объектов по принципам «сверху-вниз» и «снизу-вверх».

#### 2. *Размерные зависимости свойств материалов.*

- 2.1 Особенности термодинамических свойств наносред.
- 2.2 Изменение фазовых равновесий в наноразмерных системах.
- 2.3 Изменение температуры плавления в наноматериалах.
- 2.4 Зависимость периода кристаллической решетки от размера материала.
- 2.5 Поверхность, границы, морфология наноматериалов.
- 2.6 Ферромагнитные свойства наноматериалов.
- 2.7 Особенности тепловых свойств наноматериалов.
- 2.8 Оптические и электрические свойства наноматериалов.

#### 3. *Эпитаксия, нанесение металлов и диэлектриков. Ионная имплантация.*

- 3.1 Методы молекулярно-лучевой эпитаксии и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений.
- 3.2 Получение  $\delta$ -легированных слоев, латеральных сверхрешеток. Физические причины размытия границ раздела слоев и примесных профилей. Предельные возможности создания атомарно-гладких гетерограниц и сверхрезких примесных профилей при эпитаксии.
- 3.3 Получение структур с квантовыми нитями и квантовыми точками. Спонтанное упорядочение полупроводниковых наноструктур (самоорганизация). Трехмерные массивы когерентно напряженных островков.

3.4 Нанесение металлических и диэлектрических пленок при физическом распылении. Стимулированное плазмой осаждение из газовой фазы.

#### **4. Микролитография.**

4.1 Позитивные и негативные резисты. Фоторезисты: фотохимические свойства, фоточувствительность, растворимость, разрешающая способность. Радиационные резисты: рентгеновские, ионные, электронные.

4.2 Нанесение резистных пленок: центрифугирование, способ Ленгмюра - Блоджет, осаждение из газовой фазы.

4.3 Оптическая литография: элементы дифракционной теории формирования изображений; разрешение, практическое разрешение; экспонирование фоторезистов; контактная печать и печать с зазором, проекционная печать, совмещение, фотошаблоны, сенситометрия. Внутренний и внешний эффекты близости. Перспективы развития оптической литографии.

4.4 Электронная литография: рассеяние пучка электронов при экспонировании резистов, коэффициенты прохождения пучка электронов сквозь тонкую пленку и отражения от мишени; распределение плотности энергии, выделенной электронами в слое резиста; эффект близости, методы коррекции эффекта близости; передаточная функция трафаретных масок.

4.5 Рентгеновская литография: элементы рентгеновской оптики; источники излучения; свойства синхротронного излучения; рентгено-литографические системы теневого переноса изображения с зазором; системы совмещения, контраст теневых масок, рентгеновские резисты, разрешающая способность.

4.6 Ионно-лучевая литография: физические процессы ионно-лучевой литографии; источники: жидкометаллические, плазменные; экспонирование резистов ионными пучками; проекционные ионно-лучевые системы и системы для печати с зазором.

4.7 Формирование наноструктур с помощью сканирующей туннельной микроскопии и атомно-силовой микроскопии.

#### **5. Анизотропное селективное травление.**

5.1 Реактивное ионное травление: общие принципы, параметры процесса, селективность, анизотропность, скорость травления, травление некоторых материалов и структур, оборудование.

5.2 Ионно-лучевое травление: физика ионно-лучевого распыления (травления), зависимость коэффициента распыления от угла падения пучка, пере осаждение материала; области применения, оборудование.

5.3 Реактивное ионно-лучевое травление: физико-химические основы, ионные источники, применение.

5.4 Травление под действием ультрафиолетового излучения.

#### **6. Чистые комнаты, их классификация. Требования к оборудованию и технологическим процессам.**

Теоретический материал курса освещается в ходе лекций. В лекциях обсуждается как необходимый математический аппарат и теоретические аспекты алгоритмов, так и реальные примеры использования обсуждаемых методов из практики наиболее известных экспериментов в мировой науке. Практикуется обсуждение проблемных вопросов, в том числе, с элементами свободной дискуссии с участием обучающихся и преподавателя. На занятиях также заслушиваются доклады обучающихся по заданным темам, сопровождающиеся уточняющими вопросами со стороны преподавателя и других обучающихся. Темы закрепляются в ходе самостоятельной работы обучающегося по решению задач с использованием рекомендованной литературы, а также в процессе научно-исследовательской деятельности. Материал всех лекций доступен в электронном виде. В

ходе лекций широко используются компьютерные демонстрации.

#### Индивидуальная работа с преподавателем

Перечень работ	Объем, час
Обсуждение плана доклада по избранной теме, рекомендации преподавателя относительно литературных источников, которые можно использовать при подготовке доклада, индивидуальные консультации по ходу подготовки доклада. Обсуждение задач, стоящих перед аспирантом в рамках его научно-исследовательской работы, и возможных способов их решения с привлечением различных методов.	12

#### Самостоятельная работа обучающихся

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Самостоятельная подготовка к лекционным и практическим занятиям с использованием учебной литературы. Подготовка доклада по избранной теме. Поиск литературных источников, работа с научным текстом, анализ литературных данных. Подготовка к практическим занятиям. Решение практических заданий.	46

### 5. Перечень учебной литературы

#### 5.1 Основная литература

1. Нанотехнологии: [Учеб. пособие для вузов по направлению "Нанотехнологии"] / Ч. Пул, Ф. Оуэнс; Пер. с англ. под ред. Ю.И. Головина = Introduction to Nanotechnology. М.: Техносфера, 2004. 327 с.
2. Методы получения и свойства нанобъектов: учебное пособие: [для студентов, обучающихся по специальности "Нанотехнологии" / Н.И. Минько, В.В. Строкова, И.В. Жерновский, В.М. Нарцев]. Москва: Флинта: Наука, 2009. 162.

#### 5.2 Дополнительная литература

3. Валиев К.А. Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике / К. А. Валиев, А. В. Раков Москва : Радио и связь, 1984, 350 с.
4. Наноэлектроника / [К.А. Валиев, В.В.Вьюрков, В.А. Гридчин и др.] ; под ред. акад. А.А. Орликовского Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009-24 см.(Электроника в техническом университете, Прикладная электроника / под общ. ред. И.Б. Федорова)
5. Плазменная технология в производстве СБИС / [Толливер Д., Новицки Р., Хесс Д. и др.]; под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна; пер. с англ. Ю.М. Золотарева, В.В. Юдина; под ред. Е.С. Машковой Москва : Мир, 1987 469 с.
6. Моро У. Микролитография: принципы, методы, материалы: в 2 ч. Ч.1. / У. Моро; пер. с англ. под ред. Р.Х. Тимерова; с предисл. К.А. Валиева М: Мир, 1990606 с.: ил.; 22 см. ISBN 5-03-001716-X.
7. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / [Л. Эсаки, Б.А. Джойс, Р. Хекингботтом и др.]; под ред. Л. Ченга, К Плога; пер. с англ. под ред. Ж.И. Алферова, Ю.В. Шмарцева Москва: Мир, 1989582 с. : ил. ; 21 см. ISBN 5-03-000737-7.

## **6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся**

Размещение учебных материалов: Адрес страницы кафедры ИФП СО РАН «Нанотехнологии» – URL: <http://www.isp.nsc.ru/obrazovanie/aspirantura/obshchaya-informatsiya>

Обучающиеся полностью обеспечены необходимой научной литературой за счет фондов библиотеки НГУ (<http://libra.nsu.ru/>). Обучающимся, проходящим практику в Институтах СО РАН, предоставляется доступ к информационным ресурсам на тех же основаниях, что и научным сотрудникам этих институтов на основании договоров о прохождении практической подготовки.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины**

Освоение дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет;
- [http://www.ph4s.ru/book\\_nano.html](http://www.ph4s.ru/book_nano.html)

Поисковая платформа "Web of Knowledge

[http://apps.webofknowledge.com/WOS\\_GeneralSearch\\_input.do?product=WOS&search\\_mode=GeneralSearch&SID=S2kBCc@@@5IIfkFB7B9a&preferencesSaved=&highlighted\\_tab=WOS](http://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=S2kBCc@@@5IIfkFB7B9a&preferencesSaved=&highlighted_tab=WOS);  
<http://wokinfo.com/russian>

Взаимодействие обучающегося с преподавателем (синхронное и (или) асинхронное) осуществляется через личный кабинет студента в ЭИОС.

### 7.1 Современные профессиональные базы данных:

1. Полнотекстовые журналы Springer Journals за 1997-2020 г., электронные книги (2005-2020 гг.), коллекция научных биомедицинских и биологических протоколов SpringerProtocols, коллекция научных материалов в области физических наук и инжиниринга SpringerMaterials, реферативная БД по чистой и прикладной математике zbMATH.
2. Электронная библиотека диссертаций Российской государственной библиотеки (ЭБД РГБ).
3. Полнотекстовые электронные ресурсы Freedom Collection издательства Elsevier (Нидерланды) (23 предметные коллекции).
4. Электронные ресурсы Web of Science Core Collection (Thomson Reuters Scientific LLC.), Journal Citation Reports + ESI.
5. Электронные БД JSTOR (США). 15 предметных коллекций: Arts & Sciences I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, Life Sciences, Health & General Science, Mathematics & Statistics, Ecology & Botany, Language & Literature, Business I, II).
6. БД Scopus (Elsevier).

### 7.2. Информационные справочные системы

Не используются

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

## **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации;
2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## **10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине и индикаторов их достижения, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы по дисциплине представлен в разделе 1.

### ***10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине***

#### ***Текущий контроль успеваемости:***

Текущий контроль включает контроль посещаемости обучающимися еженедельных занятий, оценку их активности в ходе дискуссий и проверки заданий для самостоятельного решения, на основании чего выставляется оценка «зачтено» или «не зачтено». Текущий контроль успеваемости учитывается в рамках промежуточной аттестации.

#### ***Промежуточная аттестация:***

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится по итогам завершения программы дисциплины в виде зачета. По результатам зачета выставляется оценка «зачтено» или «не зачтено». Оценка «зачтено» является положительным результатом прохождения промежуточной аттестации.

### ***Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине***

Таблица 10.1

Код компетенции	Результат обучения по дисциплине	Оценочное средство
<b>УК-1. Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях</b>		Работа на занятиях Представление доклада Зачет
УК-1.1	Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.	
УК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.	
<b>УК-5 Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития</b>		Работа на занятиях Представление доклада Зачет
УК-5.1	Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.	
УК-5.2	Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития.	
УК-5.3	Владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.	
<b>ОПК-1. Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий</b>		Работа на занятиях Представление доклада Зачет
ОПК-1.1	Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.	
ОПК-1.2	Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.	
ОПК-1.3	Владеть способностью составлять и оформлять научно-техническую документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.	
<b>ПК-1. Способность построения теоретических моделей физических явлений и процессов в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>		Работа на занятиях Представление доклада Зачет
ПК-1.1	Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и	

	процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	
ПК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	
<b>ПК-2. Способность к решению научных и практических задач в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>		Работа на занятиях Представление доклада Зачет
ПК-2.1	Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	
ПК-2.2	Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (не зачтено)	Пороговый уровень (зачтено)	Базовый уровень (зачтено)	Продвинутый уровень (зачтено)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	УК 1.1 УК 5.1 ОПК 1.1 ПК 1.1 ПК 2.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	УК 1.2 УК 5.2 ОПК 1.2 ПК 1.2 ПК 2.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном

			негрубые ошибки.		объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	УК 5.3 ОПК 1.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

***Типовые контрольные задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения***

**Тематика докладов дисциплины «Физические основы нанотехнологии для аспирантов».**

Ниже приведена примерная тематика докладов дисциплины (конкретная тема доклада определяется преподавателем совместно с обучающимся с учетом специфики научных исследования аспиранта).

1. Методы молекулярно-лучевой эпитаксии и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений.
2. Нанесение металлических и диэлектрических пленок при физическом распылении. Стимулированное плазмой осаждение из газовой фазы.
3. Получение структур с квантовыми нитями и квантовыми точками. Спонтанное упорядочение полупроводниковых наноструктур (самоорганизация). Трехмерные массивы квантовых точек.
4. Оптическая литография: элементы дифракционной теории формирования изображений; разрешение, проекционная печать, совмещение, фотошаблоны. Внутренний и внешний эффекты близости. Перспективы развития оптической литографии.
5. Реактивное ионное травление: общие принципы, параметры процесса, селективность, анизотропность, скорость травления, травление некоторых материалов и структур, оборудование.

**Контрольные вопросы и задания по разделам программы курса**

Перечень задач и вопросов для самостоятельного решения (задание) по курсу «Физические основы нанотехнологии для аспирантов»:

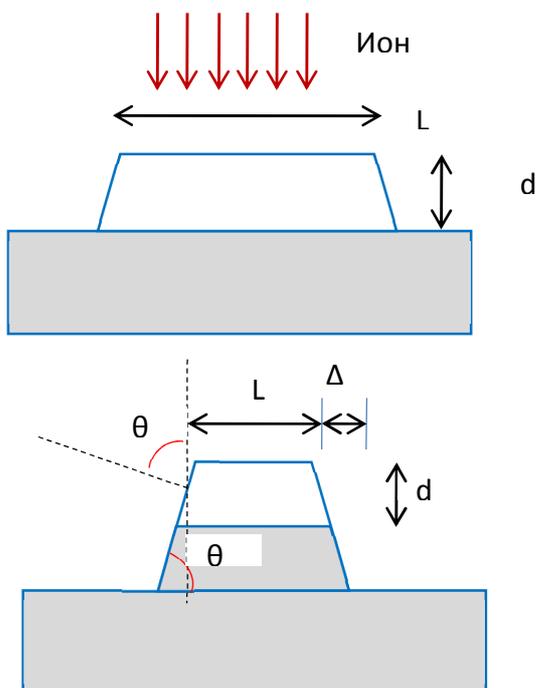
1. Оценить силы тяжести для нанообъекта и сопоставить гравитационное и электромагнитное взаимодействие.
2. Оценить отношение силы тяжести и поверхностного натяжения для нано- и

макрообъектов.

3. Нарисовать качественно структуру ближнего порядка молекул воды. Какой тип связи ответственен за ближний порядок в воде.
4. Оцените длину свободного пробега молекулярного пучка из эффузионной ячейки в условиях сверхвысокого вакуума.
5. Каков физический механизм улучшения адгезии при стимулированном плазмой осаждении пленок из газовой фазы. Движущие силы проявления этого механизма.
6. На поверхность полупроводника с ямками прямоугольной формы проводится осаждение пленки какого-либо материала. При каких физических параметрах системы осаждаемая пленка будет следовать рельефу поверхности по толщине.
7. Нарисовать качественно схемы устройств, обеспечивающих повышение разрешения оптической литографии: смещение фазы, иммерсионная литография. Проблемы иммерсионной литографии
8. Нарисовать качественно схему источника экстремального ультрафиолета.
9. Характерный размер пространственного распределения энергии в резисте при электронной литографии с обычно используемыми энергиями электронов (десятки кэВ) составляет порядка десяти микрон. Как в таких условиях достичь разрешения на уровне 10 нм?
10. В чем заключается природа внутреннего и внешнего эффектов близости при оптической литографии. Сравнить с ионной литографией.
11. Сравнить вклады скоростей физического и химического травления материала при реактивном ионном травлении.
12. В чем заключается физический механизм управления скоростью травления при реактивном ионном травлении.
13. Показать, что разрешение при ионно-лучевом травлении описывается формулой:

$$\frac{L - L'}{2} = \Delta L = (d - d') \left[ \frac{S(\theta_m) / (S(0) - 1)}{\operatorname{tg} \theta_m} \right]$$

где  $L$  и  $d$  длина и толщина маски в исходном состоянии и после ионного травления ( $L'$ ,  $d'$ ),  $S$  - коэффициент физического распыления материала маски при нормальном падении пучка ионов и при угле  $\theta_m$ , соответствующем максимальному коэффициенту распыления маски (см. рис.).



14. Оценить предел разрешения при использовании в литографических процессах пучков синхротронного излучения.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)

Физический факультет

---

Кафедра физики полупроводников

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

### Радиационная физика полупроводников для аспирантов

направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия

**Курс 2, семестр 3**

профиль

**Физика конденсированного состояния**

Форма обучения: очная

Разработчик:

д.ф.-м.н., профессор, член - корр. РАН



А.В. Двуреченский

Заведующий кафедрой физики полупроводников ФФ  
академик РАН, д.ф.-м.н.,



А.В. Латышев

Новосибирск 2020

## Содержание

Аннотация к рабочей программе дисциплины «Радиационная физика для аспирантов» ...	43
1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы.....	45
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.....	46
3. Трудоемкость дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающегося .....	46
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий.....	47
5. Перечень учебной литературы .....	50
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся	51
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины .....	51
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине .....	52
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине .....	52
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.....	52

## **Аннотация**

к рабочей программе дисциплины «**Радиационная физика для аспирантов**»  
» Направление: **03.06.01 Физика и астрономия**  
Направленность (профиль): **Физика конденсированного состояния**

Дисциплина «Радиационная физика для аспирантов» реализуется в рамках образовательной программы высшего образования – программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 03.06.01 «Физика и астрономия» профиль подготовки «Физика конденсированного состояния» по очной форме обучения на русском языке. Дисциплина «Радиационная физика для аспирантов» развивает знания, умения и навыки, сформированные у обучающихся по результатам общей базовой подготовки в рамках программ бакалавриата и магистратуры, и не требует знаний по другим дисциплинам подготовки для аспирантов. Курс входит в набор вариативных дисциплин, направленных на подготовку к сдаче экзаменов кандидатского минимума и подготовки научно-квалификационной работы (диссертации), для аспирантов, обучающихся по профилю подготовки «Физика конденсированного состояния».

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

### **Знания:**

УК-1.1. Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.

УК-5.1. Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.

ОПК-1.1. Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.

ПК-1.1. Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

ПК-2.1. Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

### **Умения:**

УК-1.2. Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.

УК-5.2. Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития.

ОПК-1.2. Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.

ПК-1.2. Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

ПК-2.2. Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

### **Навыки:**

УК-5.3. Владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.

ОПК-1.3. Владеть способностью составлять и оформлять научно-технической документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.

Цели дисциплины – овладение аспирантами основными понятиями, теоретическими моделями, методами и базовыми экспериментальными результатами в области физики конденсированного состояния и знакомство с современным состоянием данной области науки. В задачи входит углубленное изучение теоретических основ физики конденсированного состояния, развитие практических навыков решения задач и чтения оригинальной журнальной литературы в области физики конденсированного состояния, формирование у аспирантов представления о современных фундаментальных и прикладных проблемах физики конденсированного состояния, проблемах приложения методов физики конденсированного состояния в фундаментальных исследованиях и в приложениях, связанных с навигацией и связью. Дисциплина предназначена для аспирантов, область будущей профессиональной деятельности которых включает научные исследования, метрология и инженерная деятельность с использованием физики конденсированного состояния.

Дисциплина «Радиационная физика для аспирантов» реализуется в третьем семестре (второй курс аспирантуры).

***Текущий контроль успеваемости:***

Текущий контроль успеваемости включает контроль посещаемости обучающимися занятий, сдачу заданий, оценку их активности в ходе дискуссий и заключается в презентации аспирантом доклада по одному из разделов программы курса.

***Промежуточная аттестация:***

Промежуточная аттестация по дисциплине «Радиационная физика для аспирантов» проводится по итогам завершения программы дисциплины в виде зачета, по результатам которого выставляется оценка «зачтено» или «не зачтено». Оценка «зачтено» может быть выставлена по результатам текущего контроля, если в ходе представления самостоятельно подготовленного доклада и ответов на вопросы обучающийся продемонстрировал уровень сформированности компетенций не ниже порогового. Оценка «зачтено» является положительным результатом прохождения промежуточной аттестации. На зачете для дополнительной проверки сформированности отдельных компетенций обучающемуся могут быть заданы вопросы по пройденному материалу.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции и практические занятия, доклады обучающихся по тематике, связанной с выполнением их научной работы, индивидуальная работа с преподавателем/консультации в период занятий. самостоятельная подготовка обучающихся, зачет.

Общий объем дисциплины – 3 зачетных единицы (108 часов).

**1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы**

Код	Компетенции, формируемые в рамках дисциплины
<b>УК-1. Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях</b>	
УК-1.1	Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.
УК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.
<b>УК-5. Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития</b>	
УК-5.1	Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.
УК-5.2	Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития, владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования.
УК-5.3	Обладать знаниями, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.
<b>ОПК-1. Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий</b>	
ОПК-1.1	Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.
ОПК-1.2	Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.
ОПК-1.3	Владеть способностью составлять и оформлять научно-технической документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.
<b>ПК-1. Способность построения теоретических моделей физических явлений и процессов в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>	
ПК-1.1	Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
ПК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
<b>ПК-2. Способность к решению научных и практических задач в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>	
ПК-2.1	Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
ПК-2.2	Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.



3	108	32	16		12	46		2		
Всего 108 часов /3 зачетных единицы из них: - контактная работа 62 часа - в интерактивных формах 28 часов										
Компетенции: УК-1, УК-5, ОПК-1, ПК-1, ПК-2										

#### 4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						Консультации перед экзаменом	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы			Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции	Практические занятия	Индивидуальная работа с преподавателем /Консультации в период занятий				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	Физические процессы в твердых телах при радиационных воздействиях.	1-2	6	2	2		2			
2.	Упругие и неупругие соударения	3-4	6	2	2		2			
3.	Каналирование в монокристаллах	5-6	6	2	2		2			
4.	Радиационные дефекты при облучении ионами и нейтронами.	7-8	6	2	2		2			
5.	Процессы на поверхности полупроводников при облучении ионами низких энергий	9-10	6	2	2		2			
6.	Термическая стабильность радиационных изменений кристаллов	11-12	6	2	2		2			
7.	Оборудование для облучения электронами, ионами и нейтронами. МОП-приборы	13-14	6	2	2		2			
8.	Анализ структуры и состава твердых тел на основе радиационных процессов	15-16	6	2	2		2			
9.	Научные доклады обучающихся по тематикам их	1-16	58	16		12	30			

	научных исследований								
10.	Зачет	17	2						2
<b>Всего</b>			108	32	16	12	46		2

### Программа курса по разделам и темам

**Раздел 1.** Введение в радиационную физику твердого тела. Условия классического и квантовомеханического описания взаимодействия быстрых частиц с твердым телом; приближение парных столкновений.

**Раздел 2.** Физические процессы в твердых телах при радиационных воздействиях (фотоны, мягкое рентгеновское излучение, низкоэнергетические электроны, тяжелые заряженные частицы, быстрые нейтроны, высокоэнергетические электроны, гамма – кванты, медленные нейтроны). Первичные и вторичные процессы.

**Раздел 3.** Кинематика упругих соударений. Максимальная переданная энергия атомам мишени. Пороговая энергия смещения атома в твердом теле. Сечение рассеяния. Пробег частиц в твердом теле.

**Раздел 4.** Потери энергии быстрых частиц в веществе на неупругие и упругие соударения. Тормозное рентгеновское излучение, черенковское излучение. Определение неупругих потерь энергии в твердом теле для быстрых частиц (приближение Н.Бора).

**Раздел 5.** Потенциалы ионно-атомного взаимодействия, модель атома Томаса-Ферми, заряд иона при движении в твердом теле, определение неупругих и упругих потерь энергии в твердом теле для любых значений энергий.

**Раздел 6.** Каналирование в монокристаллах. Рассеяние быстрых частиц на дефектах и примесях, смещенных из узлов решетки.

**Раздел 7.** Пробеги ионов в твердых телах, распределение пробегов; распределение имплантируемых элементов по глубине с учетом эффекта каналирования;

**Раздел 8.** Радиационные дефекты при облучении ионами и нейтронами. Пространственное распределение радиационных дефектов. Введение дефектов при облучении нейтронами. Число смещенных атомов при облучении ионами и нейтронами, распределение дефектов по глубине; соотношение между средним проецированным пробегом ионов и положением максимума концентрации дефектов.

**Раздел 9.** Подпороговое дефектообразование в полупроводниках: экситонный и электронно-дырочный механизмы; ионизационный механизм; электростатический механизм.

**Раздел 10.** Атомная конфигурация точечных дефектов. Типы точечных дефектов в твердом теле при облучении быстрыми частицами и взаимодействии компонентов пар Френкеля между собой и с примесями: вакансии, дивакансии, тетра-, пентавакансии, расщепленные междоузельные атомы, димеждоузельные конфигурации, цепочки междоузельных атомов.

**Раздел 11.** Предельная концентрация точечных дефектов при облучении различными частицами. Переход кристалл-аморфное состояние. Зависимость процесса аморфизации от температуры и массы налетающей частицы.

**Раздел 12.** Процессы на поверхности полупроводников при облучении ионами низких энергий: распыление, зависимость распыления от энергии и массы ионов, угла падения частиц на поверхность; механизмы послойного ионного травления полупроводников.

**Раздел 13.** Термическая стабильность радиационных изменений кристаллов. Механизмы отжига.

**Раздел 14.** Импульсный отжиг полупроводников: рекристаллизация имплантированных слоев, диффузия и сегрегация примесей; диффузионный синтез соединений при импульсном воздействии на двухслойную или многослойную структуру.

**Раздел 15.** Оборудование для облучения электронами, ионами и нейтронами. Фотонные фабрики.

**Раздел 16.** Ионное легирование. Основные преимущества метода. МОП-приборы: самосовмещенный затвор, снижение порогового напряжения; КМОП-транзисторы. Синтез захороненных слоев. Ионное перемешивание.

**Раздел 17.** Трансмутационное легирование полупроводников при облучении нейтронами. Активационный анализ. Спектрометрия обратного резерфордовского рассеяния. Масс-спектрометрия вторичных ионов и нейтральных частиц. Оже-спектрометрия.

### **План практических занятий**

1. Введение в радиационную физику твердого тела. Условия классического и квантовомеханического описания взаимодействия быстрых частиц с твердым телом; приближение парных столкновений. Физические процессы в твердых телах при радиационных воздействиях (фотоны, мягкое рентгеновское излучение, низкоэнергетические электроны, тяжелые заряженные частицы, быстрые нейтроны, высокоэнергетические электроны, гамма – кванты, медленные нейтроны). Первичные и вторичные процессы.
2. Кинематика упругих соударений. Максимальная переданная энергия атомам мишени. Пороговая энергия смещения атома в твердом теле. Сечение рассеяния. Пробег частиц в твердом теле.
3. Потери энергии быстрых частиц в веществе на неупругие и упругие соударения. Тормозное рентгеновское излучение, черенковское излучение. Определение неупругих потерь энергии в твердом теле для быстрых частиц (приближение Н.Бора).
4. Потенциалы ионно-атомного взаимодействия, модель атома Томаса-Ферми, заряд иона при движении в твердом теле, определение неупругих и упругих потерь энергии в твердом теле для любых значений энергий.
5. Каналирование в монокристаллах. Рассеяние быстрых частиц на дефектах и примесях, смещенных из узлов решетки. Пробеги ионов в твердых телах, распределение пробегов; распределение имплантируемых элементов по глубине с учетом эффекта каналирования
6. Радиационные дефекты при облучении ионами и нейтронами. Пространственное распределение радиационных дефектов. Введение дефектов при облучении нейтронами. Число смещенных атомов при облучении ионами и нейтронами, распределение дефектов по глубине; соотношение между средним проецированным пробегом ионов и положением максимума концентрации дефектов.
- 7.; Подпороговое дефектообразование в полупроводниках: экситонный и электронно-дырочный механизмы; ионизационный механизм; электростатический механизм
8. Атомная конфигурация точечных дефектов. Типы точечных дефектов в твердом теле при облучении быстрыми частицами и взаимодействии компонентов пар Френкеля между собой и с примесями: вакансии, дивакансии, тетра-, пентавакансии, расщепленные междоузельные атомы, димеждоузельные конфигурации, цепочки междоузельных атомов
- 9.. Предельная концентрация точечных дефектов при облучении различными частицами. Переход кристалл-аморфное состояние. Зависимость процесса аморфизации от температуры и массы налетающей частицы.
- 10.. Процессы на поверхности полупроводников при облучении ионами низких энергий: распыление, зависимость распыления от энергии и массы ионов, угла падения частиц на поверхность; механизмы послойного ионного травления полупроводников.
11. Термическая стабильность радиационных изменений кристаллов. Механизмы отжига. Импульсный отжиг полупроводников: рекристаллизация имплантированных слоев, диффузия и сегрегация примесей; диффузионный синтез соединений при импульсном воздействии на двухслойную или многослойную структуру
- 12.. Оборудование для облучения электронами, ионами и нейтронами. Фотонные фабрики. Ионное легирование. Основные преимущества метода. МОП-приборы: самосовмещенный затвор, снижение порогового напряжения; КМОП-транзисторы. Синтез захороненных слоев. Ионное перемешивание

13.. Трансмутационное легирование полупроводников при облучении нейтронами. Активационный анализ. Спектрометрия обратного резерфордского рассеяния. Масс-спектрометрия вторичных ионов и нейтральных частиц. Оже-спектрометрия.

Теоретический материал курса освещается в ходе лекций. В лекциях обсуждается как необходимый математический аппарат и теоретические аспекты алгоритмов, так и реальные примеры использования обсуждаемых методов из практики наиболее известных экспериментов в мировой науке. Практикуется обсуждение проблемных вопросов, в том числе, с элементами свободной дискуссии с участием обучающихся и преподавателя. На занятиях также заслушиваются доклады обучающихся по заданным темам, сопровождающиеся уточняющими вопросами со стороны преподавателя и других обучающихся. Темы закрепляются в ходе самостоятельной работы обучающегося по решению задач с использованием рекомендованной литературы, а также в процессе научно-исследовательской деятельности. Материал всех лекций доступен в электронном виде. В ходе лекций широко используются компьютерные демонстрации.

#### Индивидуальная работа с преподавателем

Перечень работ	Объем, час
Обсуждение плана доклада по избранной теме, рекомендации преподавателя относительно литературных источников, которые можно использовать при подготовке доклада, индивидуальные консультации по ходу подготовки доклада. Обсуждение задач, стоящих перед аспирантом в рамках его научно-исследовательской работы, и возможных способов их решения с привлечением различных методов.	12

#### Самостоятельная работа обучающихся

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Самостоятельная подготовка к лекционным и практическим занятиям с использованием учебной литературы. Подготовка доклада по избранной теме. Поиск литературных источников, работа с научным текстом, анализ литературных данных. Подготовка к практическим занятиям. Решение практических заданий.	46

### **5. Перечень учебной литературы**

#### 5.1 Основная литература

1. Магомедов М.Н. Изучение межатомного взаимодействия, образования вакансий и самодиффузии в кристаллах / М.Н. Магомедов Москва: Физматлит, 2010, 543 с.: ил., табл.; 22 см. ISBN 978-5-9221-1246-8.
2. Эланго М.А. Элементарные неупругие радиационные процессы / М. А. Эланго Москва: Наука, 1988, 148, [2] с.: ил. ; 22 см. ISBN 5-02-013831-2.
3. Фелдман Л, Майер Д. Основы анализа поверхности и тонких пленок / Пер.с англ. В.А. Аркадьева, Л.И. Огнева; Под ред. В.В. Белошицкого М: Мир, 1989, 342 с.: ил. ISBN 5030010173.

#### 5.2 Дополнительная литература

4. Ланно М., Бургуэн Ж. Точечные дефекты в полупроводниках: экспериментальные аспекты / Жак Бургуэн, Мишель Ланно; пер. с англ. Ю.М. Гальперина [и др.]; под ред. [и с предисл.] В.Л. Гуревича Москва: Мир, 1985, 304 с..

#### **6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся**

Размещение учебных материалов: Адрес страницы кафедры ИФП СО РАН  
<http://www.isp.nsc.ru/obrazovanie/aspirantura/obshchaya-informatsiya>.

Обучающиеся полностью обеспечены необходимой научной литературой за счет фондов библиотеки НГУ (<http://libra.nsu.ru/>). Обучающимся, проходящим практику в Институтах СО РАН, предоставляется доступ к информационным ресурсам на тех же основаниях, что и научным сотрудникам этих институтов на основании договоров о прохождении практической подготовки.

#### **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины**

Освоение дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет;
- Электронный архив: «Новые полупроводниковые материалы: Характеристики и свойства» - URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/rintroduction.html>
- Раздел "Образование" сайта ИФП СО РАН - URL: [http://www.isp.nsc.ru/index.php?ACTION=part&id\\_part=4&sub\\_part=81](http://www.isp.nsc.ru/index.php?ACTION=part&id_part=4&sub_part=81)
- Поисковая платформа "Web of Knowledge" [http://apps.webofknowledge.com/WOS\\_GeneralSearch\\_input.do?product=WOS&search\\_mode=GeneralSearch&SID=S2kBCc@@@5IIfkFB7B9a&preferencesSaved=&highlighted\\_tab=WOS](http://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=S2kBCc@@@5IIfkFB7B9a&preferencesSaved=&highlighted_tab=WOS);
- <http://wokinfo.com/russian>

Взаимодействие обучающегося с преподавателем (синхронное и (или) асинхронное) осуществляется через личный кабинет студента в ЭИОС.

#### 7.2 Современные профессиональные базы данных:

1. Полнотекстовые журналы Springer Journals за 1997-2020 г., электронные книги (2005-2020 гг.), коллекция научных биомедицинских и биологических протоколов SpringerProtocols, коллекция научных материалов в области физических наук и инжиниринга SpringerMaterials, реферативная БД по чистой и прикладной математике zbMATH.
2. Электронная библиотека диссертаций Российской государственной библиотеки (ЭБД РГБ).
3. Полнотекстовые электронные ресурсы Freedom Collection издательства Elsevier (Нидерланды) (23 предметные коллекции).
4. Электронные ресурсы Web of Science Core Collection (Thomson Reuters Scientific LLC.), Journal Citation Reports + ESI.
5. Электронные БД JSTOR (США). 15 предметных коллекций: Arts & Sciences I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, Life Sciences, Health & General Science, Mathematics & Statistics, Ecology & Botany, Language & Literature, Business I, II).
6. БД Scopus (Elsevier).

#### 7.2. Информационные справочные системы

Не используются

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

## **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации;
2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## **10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине и индикаторов их достижения, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы по дисциплине представлен в разделе 1.

### ***10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине***

#### ***Текущий контроль успеваемости:***

Текущий контроль включает контроль посещаемости обучающимися еженедельных занятий, оценку их активности в ходе дискуссий и проверки заданий для самостоятельного решения, презентации аспирантом доклада по одному из разделов программы курса. Текущий контроль успеваемости учитывается в рамках промежуточной аттестации.

#### ***Промежуточная аттестация:***

Промежуточная аттестация по дисциплине «Радиационная физика для аспирантов» проводится по итогам завершения программы дисциплины в виде зачета, по результатам которого выставляется оценка «зачтено» или «не зачтено». Оценка «зачтено» может быть выставлена по результатам текущего контроля, если в ходе представления самостоятельно подготовленного доклада и ответов на вопросы обучающийся продемонстрировал уровень сформированности компетенций не ниже порогового. Оценка «зачтено» является положительным результатом прохождения промежуточной аттестации. На зачете для дополнительной проверки сформированности отдельных компетенций обучающемуся могут быть заданы вопросы по пройденному материалу.

**Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине Радиационная физика для аспирантов**

Таблица 10.1

Код компетенции	Результат обучения по дисциплине	Оценочное средство
<b>УК-1. Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях</b>		
УК-1.1	Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.	Работа на занятиях Представление доклада Зачет
УК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.	
<b>УК-5 Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития</b>		
УК-5.1	Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.	Работа на занятиях Представление доклада Зачет
УК-5.2	Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития.	
УК-5.3	Владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.	
<b>ОПК-1. Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий</b>		
ОПК-1.1	Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.	Работа на занятиях Представление доклада Зачет
ОПК-1.2	Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.	
ОПК-1.3	Владеть способностью составлять и оформлять научно-техническую документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.	
<b>ПК-1. Способность построения теоретических моделей физических явлений и процессов в области физики в зависимости</b>		

<b>от специфики профиля подготовки.</b>		Представление доклада Зачет
ПК-1.1	Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	
ПК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	
<b>ПК-2. Способность к решению научных и практических задач в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>		Работа на занятиях Представление доклада Зачет
ПК-2.1	Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	
ПК-2.2	Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (не зачтено)	Пороговый уровень (зачтено)	Базовый уровень (зачтено)	Продвинутый уровень (зачтено)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	УК 1.1 УК 5.1 ОПК 1.1 ПК 1.1 ПК 2.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	УК 1.2 УК 5.2 ОПК 1.2 ПК 1.2 ПК 2.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные	Продемонстрированы частично основные умения. Решены	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные	Продемонстрированы все основные умения. Решены

		задачи. Имеют место грубые ошибки.	типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	УК 5.3 ОПК 1.3	Отсутствие владения материалом по темам/раздела м дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимал ьный набор навыков при решении стандартны х задач с некоторым и недочетами .	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартны х задач без ошибок и недочетов. Продемонс трированы знания по решению нестандарт ных задач.

***Типовые контрольные задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения***

**Тематика докладов дисциплины «Радиационная физика для аспирантов».**

Ниже приведена примерная тематика докладов дисциплины (конкретная тема доклада определяется преподавателем совместно с обучающимся с учетом специфики научных исследований аспиранта).

1. Механизмы передачи энергии при движении быстрых частиц (электронов, ионов) в твердом теле. Максимальная переданная энергия атомам мишени. Пороговая энергия смещения атома в твердом теле

2. Потенциалы ионно-атомного взаимодействия, модель атома Томаса-Ферми, заряд иона при движении в твердом теле. Зависимость потерь энергии иона на единицу длины при движении в твердом теле в упругих и неупругих взаимодействиях в зависимости от его энергии.

3. Каналирование быстрых ионов в монокристаллах. Рассеяние быстрых частиц на дефектах и примесях, смещенных из узлов решетки.

4. Пробег ионов в твердых телах, распределение пробегов; распределение имплантируемых элементов по глубине с учетом эффекта каналирования

5. Ионное легирование. Основные преимущества метода. Использование для МОП-приборов: самосовмещенный затвор, снижение порогового напряжения.

**Перечень задач для самостоятельного решения по курсу «Радиационная физика для аспирантов»:**

1. Пучок ионов гелия с энергией 2 МэВ падает на серебряную фольгу толщиной и испытывает кулоновское рассеяние в соответствии с формулой Резерфорда. Каково расстояние наибольшего сближения атомов гелия с атомами мишени? Какая часть падающих ионов рассеивается назад (т.е. под углом, большим 90°)

2. Пленка углерода содержит поверхностные примеси Au, Ag и Si. Нарисуйте спектр обратного рассеяния, указав энергии и относительные амплитуды различных пиков.

3. Пользуясь законами сохранения энергии и импульса, вывести выражение для энергии, передаваемой от падающего на мишень иона атому мишени.
4. Нарисовать (качественно) зависимость потерь на единицу длины энергии быстрого иона, движущегося в твердом теле, в зависимости от его скорости.
5. Определить количество смещенных атомов при внедрении единичного иона фосфора с энергией 100 кэВ в кремний.
6. Оценить потери энергии на единицу длины ( $\text{эВ}/\text{А}^\circ$ ) для ионов гелия с энергией 1 МэВ в кремнии.
7. Получить аналитическое выражение распределение пробегов быстрых ионов в твердом теле пользуясь законами статистической физики.
8. На основе каких физических свойств можно зафиксировать появление тонких (доли мкм) слоев расплава на поверхности полупроводников.
9. В результате импульсного воздействия мощного лазерного излучения на поверхности полупроводника образовался тонкий расплавленный слой. Как определить толщину расплавленного слоя?
10. Чему равен пробег иона фосфора с энергией 40 кэВ в кремнии в условиях каналирования?
11. Нарисуйте атомную конфигурацию точечных дефектов: вакансии, дивакансии, тетра-, пентавакансии, расщепленный междоузельный атом, димеждоузельные конфигурации, комплексы, включающие примесные атомы.
12. Выведите аналитическую зависимость дозы, необходимой для аморфизации облучаемого слоя, от температуры и массы налетающей частицы.
13. Нарисуйте последовательность технологических процессов для получения самосовмещенного затвора в МДП-транзисторе.
14. Определить дозу облучения кремния тепловыми нейтронами для введения фосфора с концентрацией  $10^{12} / \text{см}^3$ .
15. Найти пробег ионов мышьяка в германии с энергией 20 кэВ в предположении, что преобладают ядерные потери энергии и что сечение торможения не зависит от энергии.
16. Нарисуйте качественно пространственное распределение пробегов ионов в твердом теле и вводимых дефектов для двух случаев: а) масса налетающего иона много меньше массы атома мишени; б) обратный случай.
17. Нарисуйте качественно зависимость потерь энергии иона на ионизацию и упругие столкновения при его движении в твердом теле для быстрых ионов (движущихся со скоростью, близкой к скорости Бора) и ионов средних энергий.
18. Оцените минимальное время выхода атома из узла решетки при упругом взаимодействии с налетающей частицей и сравните с минимальным временем выхода атома из узла решетки за счет тепловых колебаний
19. Сформулируйте условия выхода атома из узла решетки за счет ионизации атомов в соседних ее узлах. Оцените характерное время выхода атома из узла решетки в таких условиях.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)

Физический факультет

---

Кафедра физики полупроводников

---

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

### Нанодиагностика для аспирантов

направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия

**Курс 2, семестр 3**

профиль

**Физика конденсированного состояния**

Форма обучения: **очная**

Разработчик:  
академик РАН, д.ф.-м.н. А.В. Латышев



Заведующий кафедрой физики полупроводников ФФ  
академик РАН, д.ф.-м.н., А.В. Латышев



Новосибирск 2020

## Содержание

<b>Аннотация</b> к рабочей программе дисциплины « <b>Нанодиагностика для аспирантов</b> »	59
1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы	61
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы	62
3. Трудоемкость дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающегося	62
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий	63
5. Перечень учебной литературы	66
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся	67
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины	67
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине	68
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине	68
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине	68

## **Аннотация**

к рабочей программе дисциплины «**Нанодиагностика для аспирантов**»»

Направление: **03.06.01 Физика и астрономия**

Направленность (профиль): **Физика конденсированного состояния**

Дисциплина «Нанодиагностика для аспирантов» реализуется в рамках образовательной программы высшего образования – программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 03.06.01 «Физика и астрономия» профиль подготовки «Физика конденсированного состояния» по очной форме обучения на русском языке. Дисциплина «Нанодиагностика для аспирантов» развивает знания, умения и навыки, сформированные у обучающихся по результатам общей базовой подготовки в рамках программ бакалавриата и магистратуры, и не требует знаний по другим дисциплинам подготовки для аспирантов. Курс входит в набор вариативных дисциплин, направленных на подготовку к сдаче экзаменов кандидатского минимума и подготовки научно-квалификационной работы (диссертации), для аспирантов, обучающихся по профилю подготовки «Физика конденсированного состояния».

Основные задачи преподавания данной дисциплины состоят в формировании у аспирантов углубленных знаний о современных методах диагностики и развитие навыков проведения самостоятельных исследований структуры, химического состава, оптических и электрофизических свойств поверхности твердого тела, микро- и наносистем, умения анализировать информацию и использовать ее для качественных и количественных характеристик исследуемых объектов, ознакомление с основами метрологии твердотельных низкоразмерных систем и развития физических основ полупроводниковых нанотехнологий.

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

### **Знания:**

УК-1.1. Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.

УК-5.1. Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.

ОПК-1.1. Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.

ПК-1.1. Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

ПК-2.1. Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

### **Умения:**

УК-1.2. Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.

УК-5.2. Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития.

ОПК-1.2. Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.

ПК-1.2. Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

ПК-2.2. Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

**Навыки:**

УК-5.3. Владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.

ОПК-1.3. Владеть способностью составлять и оформлять научно-технической документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.

Дисциплина «Нанодиагностика для аспирантов» реализуется в третьем семестре (второй курс аспирантуры).

***Текущий контроль успеваемости:***

Текущий контроль успеваемости включает контроль посещаемости обучающимися занятий, сдачу заданий, оценку их активности в ходе дискуссий и заключается в презентации аспирантом доклада по одному из разделов программы курса.

***Промежуточная аттестация:***

Промежуточная аттестация по дисциплине «Нанодиагностика для аспирантов» проводится по итогам завершения программы дисциплины в виде зачета, по результатам которого выставляется оценка «зачтено» или «не зачтено». Оценка «зачтено» может быть выставлена по результатам текущего контроля, если в ходе представления самостоятельно подготовленного доклада и ответов на вопросы обучающийся продемонстрировал уровень сформированности компетенций не ниже порогового. Оценка «зачтено» является положительным результатом прохождения промежуточной аттестации. На зачете для дополнительной проверки сформированности отдельных компетенций обучающемуся могут быть заданы вопросы по пройденному материалу.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции и практические занятия, доклады обучающихся по тематике, связанной с выполнением их научной работы, индивидуальная работа с преподавателем/консультации в период занятий. самостоятельная подготовка обучающихся, зачет.

Общий объем дисциплины – 3 зачетных единицы (108 часов).

**1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы**

Код	Компетенции, формируемые в рамках дисциплины
<b>УК-1. Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях</b>	
УК-1.1	Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.
УК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.
<b>УК-5. Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития</b>	
УК-5.1	Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.
УК-5.2	Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития, владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования.
УК-5.3	Обладать знаниями, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.
<b>ОПК-1. Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий</b>	
ОПК-1.1	Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.
ОПК-1.2	Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.
ОПК-1.3	Владеть способностью составлять и оформлять научно-технической документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.
<b>ПК-1. Способность построения теоретических моделей физических явлений и процессов в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>	
ПК-1.1	Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
ПК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
<b>ПК-2. Способность к решению научных и практических задач в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>	
ПК-2.1	Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
ПК-2.2	Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Нанодиагностика для аспирантов» реализуется в рамках образовательной программы высшего образования – программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 03.06.01 «Физика и астрономия» профиль подготовки «Физика конденсированного состояния» по очной форме обучения на русском языке. Дисциплина «Нанодиагностика для аспирантов» развивает знания, умения и навыки, сформированные у обучающихся по результатам общей базовой подготовки в рамках программ бакалавриата и магистратуры, и не требует знаний по другим дисциплинам подготовки для аспирантов. Курс входит в набор вариативных дисциплин, направленных на подготовку к сдаче экзаменов кандидатского минимума и подготовки научно-квалификационной работы (диссертации), для аспирантов, обучающихся по профилю подготовки «Физика конденсированного состояния».

Основные задачи преподавания данной дисциплины состоят в формировании у аспирантов углубленных знаний о современных методах диагностики и развитие навыков проведения самостоятельных исследований структуры, химического состава, оптических и электрофизических свойств поверхности твердого тела, микро- и наносистем, умения анализировать информацию и использовать ее для качественных и количественных характеристик исследуемых объектов, ознакомление с основами метрологии твердотельных низкоразмерных систем и развития физических основ полупроводниковых нанотехнологий.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции и практические занятия, доклады обучающихся по тематике, связанной с выполнением их научной работы, индивидуальная работа с преподавателем/консультации в период занятий. самостоятельная подготовка обучающихся, зачет.

Общий объем дисциплины – 3 зачетных единицы (108 часов).

Дисциплины (практики), для изучения которых необходимо освоение дисциплины Радиационная физика для аспирантов:

Кандидатский экзамен по модулю Физика конденсированного состояния

## 3. Трудоемкость дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающегося

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)					Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем				Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Индивидуальная работа с преподавателем/ Консультации в период занятий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Кандидатский экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	108	32	16		12	46			2		
Всего 108 часов /3 зачетных единицы, из них:											
- контактная работа 62 часа; - в интерактивных формах 28 часов											
Компетенции: УК-1, УК-5, ОПК-1, ПК-1, ПК-2											

**4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий**

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						Консультации перед экзаменом	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы			Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции	Практические занятия	Индивидуальная работа с преподавателем /Консультации в период занятий				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	Прецизионная структурная диагностика наносистем	1-2	6	2	2		2			
2.	Нанодиагностика и нанометрология.	3-4	6	2	2		2			
3.	Взаимодействие электронного пучка с образцом	5-6	6	2	2		2			
4.	Электронная и ионная микроскопия.	7-8	6	2	2		2			
5.	Просвечивающая электронная микроскопия.	9-10	6	2	2		2			
6.	Сканирующая зондовая микроскопия	11-12	6	2	2		2			
7.	Технологии изготовления твердотельных систем пониженной размерности.	13-14	6	2	2		2			
8.	Интерферометрия и спектроскопия твердых тел	15-16	6	2	2		2			
9.	Научные доклады обучающихся по тематикам их научных исследований	1-16	58	16		26	16			
10.	Зачет	17	2							2
<b>Всего</b>			108	32	16	26	32			2

**Программа курса по разделам и темам**

*Прецизионная структурная диагностика наносистем.*

Анализ атомного строения, химического состава и дефектов структуры. Анализ основных закономерностей роста и дефектообразования в системах пониженной размерности. Установление корреляционных зависимостей между структурой и свойствами. Методы измерений параметров наноматериалов. Методы диагностики конденсированных материалов.

*Нанодиагностика и нанометрология.*

Разработка стандартных образцов, методик измерений и государственных стандартов для обеспечения единства измерений в нанометровом диапазоне. Методы метрологии и сертификации. Метрология наноструктур. Международный стандарт. Государственный первичный и вторичный эталон. Методика выполнения измерений. Калибровка. Систематическая и случайная погрешность измерения.

*Взаимодействие электронного пучка с образцом.*

Упругое и неупругое рассеяние. Область взаимодействия пучка электронов с твердым телом. Дифракция быстрых и медленных электронов. Электронография. Кикучи-линии. Расшифровка дифракционных картин. Осцилляции интенсивности ДБЭ.

*Электронная и ионная микроскопия*

Электромагнитная и электростатическая линза. Сферическая и хроматическая aberrации. Астигматизм. Источники электронов. In situ методы характеристики. Сканирующая электронная микроскопия. Микроскопия медленных электронов. Ионная микроскопия.

*Просвечивающая электронная микроскопия.*

Высокоразрешающая электронная микроскопия. Аналитическая микроскопия. Основы дифракционного и фазового контраста. Предельное разрешение. Глубина поля и глубина фокуса. Темное и светлое поле. Препарирование образцов для ПЭМ. Отражательная электронная микроскопия. Моделирование и расчет электронно-микроскопических изображений. Анализ атомного строения наноструктур с помощью высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии с коррекцией сферической aberrации.

*Современная сканирующая зондовая микроскопия.*

Сканирующая туннельная микроскопия. Атомно-силовая микроскопия и спектроскопия. Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля. Магнитно-силовой микроскоп. Сканирующий электростатический микроскоп.

*Технологии изготовления твердотельных систем пониженной размерности.*

Методы наноструктурирования на основе электронной и ионной литографии. Зондовые методы литографии. Литографический шаблон. Рентгеновская литография. Технология Ленгмюра-Блоджет.

*Интерферометрия и спектроскопия твердых тел*

Интерферометрия. Лазерная эллипсометрия. Инфракрасная спектроскопия. Фурье-спектроскопия. Спектроскопия комбинационного рассеяния. Метод EXAFS. Оже-спектроскопия. Электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА), рентгено-фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Рентгеновские дифракционные методы

## **План практических занятий**

1. Прецизионная структурная диагностика наносистем. Анализ атомного строения, химического состава и дефектов структуры. Анализ основных закономерностей роста и дефектообразования в системах пониженной размерности. Установление корреляционных зависимостей между структурой и свойствами. Методы измерений параметров наноматериалов. Методы диагностики конденсированных материалов.
2. Нанодиагностика и нанометрология. Разработка стандартных образцов, методик измерений и государственных стандартов для обеспечения единства измерений в нанометровом диапазоне. Методы метрологии и сертификации. Метрология наноструктур. Международный стандарт. Государственный первичный и вторичный эталон. Методика выполнения измерений. Калибровка. Систематическая и случайная погрешность измерения.
3. Взаимодействие электронного пучка с образцом. Упругое и неупругое рассеяние. Область взаимодействия пучка электронов с твердым телом. Дифракция быстрых и

медленных электронов. Электронография. Кикучи-линии. Расшифровка дифракционных картин. Осцилляции интенсивности ДБЭ.

4. Электромагнитная и электростатическая линза. Сферическая и хроматическая aberrации. Астигматизм. Источники электронов. In situ методы характеристики. Сканирующая электронная микроскопия. Микроскопия медленных электронов. Ионная микроскопия.

5. Просвечивающая электронная микроскопия. Высокорастворяющая электронная микроскопия. Аналитическая микроскопия. Основы дифракционного и фазового контраста. Предельное разрешение. Глубина поля и глубина фокуса. Темное и светлое поле. Препарирование образцов для ПЭМ. Отражательная электронная микроскопия. Моделирование и расчет электронно-микроскопических изображений. Анализ атомного строения наноструктур с помощью высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии с коррекцией сферической aberrации.

6. Современная сканирующая зондовая микроскопия. Сканирующая туннельная микроскопия. Атомно-силовая микроскопия и спектроскопия. Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля. Магнитно-силовой микроскоп. Сканирующий электростатический микроскоп.

7. Технологии изготовления твердотельных систем пониженной размерности. Методы наноструктурирования на основе электронной и ионной литографии. Зондовые методы литографии. Литографический шаблон. Рентгеновская литография. Технология Ленгмюра-Блоджет.

8. Интерферометрия. Лазерная эллипсометрия. Инфракрасная спектроскопия. Фурье-спектроскопия. Спектроскопия комбинационного рассеяния. Метод EXAFS. Оже-спектроскопия. Электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА), рентгено-фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Рентгеновские дифракционные методы

В ходе реализации учебного процесса материал курса увязывается с передовыми исследованиями всюду, где это допускается уровнем знаний и подготовки аспирантов. Специально указываются темы, активно обсуждающиеся в текущей профессиональной научной литературе.

Методическая новизна базовой части курса состоит в изложении с единых позиций оптических свойств различных твердых тел – полупроводников, диэлектриков и металлов. Это позволяет студентам глубже осознать, с одной стороны, фундаментальные различия между откликом металлов и диэлектриков на электромагнитное излучение и, с другой стороны, понять случаи «металлического» поведения оптических спектров полупроводников и влияния межзонных переходов в металлах на их оптические свойства. По сравнению с известными учебниками, при изложении материала более широко используются графики и диаграммы, иллюстрирующие микроскопические механизмы поглощения света, релаксацию импульса, энергии и спина фотоэлектронов, возникновение фототоков и фото-ЭДС, а также фотоэмиссию электронов из кристалла в вакуум. В курсе детально рассмотрены физические основы и экспериментальные реализации методов модуляционной спектроскопии полупроводников, в том числе электропоглощение, электро- и фотоотражение.

Еще одно отличие данного курса от традиционных курсов по физике конденсированного состояния состоит в детальном рассмотрении современных методов исследования поверхности твердых тел, основанных на использовании видимого, ультрафиолетового и рентгеновского излучения. В числе таких методов рассмотрены фотоэмиссионная спектроскопия и спектроскопия анизотропного отражения света.

Лекционные и практические занятия проводятся в интерактивной форме,

подразумевающей со стороны преподавателя постановку проблемы по указанным темам, формулировку некоторых практических заданий и задач, подходы к решению которых должны найти обучающиеся в ходе занятия. Практикуется обсуждение проблемных вопросов, в том числе, с элементами свободной дискуссии с участием обучающихся и преподавателя. На занятиях также заслушиваются доклады обучающихся по заданным темам, сопровождающиеся уточняющими вопросами со стороны преподавателя и других обучающихся. Темы закрепляются в ходе самостоятельной работы обучающегося по решению задач с использованием рекомендованной литературы, а также в процессе научно-исследовательской деятельности.

Для лучшего усвоения материала, в середине семестра проводится письменный тест, а конце семестра – коллоквиум по наиболее сложным, требующим дополнительного обсуждения вопросам курса. По курсу подготовлено задание, состоящее из 6 задач.

#### Индивидуальная работа с преподавателем

Перечень работ	Объем, час
Обсуждение плана доклада по избранной теме, рекомендации преподавателя относительно литературных источников, которые можно использовать при подготовке доклада, индивидуальные консультации по ходу подготовки доклада. Обсуждение задач, стоящих перед аспирантом в рамках его научно-исследовательской работы, и возможных способов их решения с привлечением различных методов.	12

#### Самостоятельная работа обучающихся

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Самостоятельная подготовка к лекционным и практическим занятиям с использованием учебной литературы. Подготовка доклада по избранной теме. Поиск литературных источников, работа с научным текстом, анализ литературных данных. Подготовка к практическим занятиям. Решение практических заданий.	46

### **5. Перечень учебной литературы**

#### 5.1 Основная литература

- 1 Нанотехнологии: [Учеб. пособие для вузов по направлению "Нанотехнологии"] / Ч. Пул, Ф. Оуэнс; Пер. с англ. под ред. Ю.И. Головина = Introduction to Nanotechnology. М.: Техносфера, 2004. 327 с.
- 2 Рыков С.А. Сканирующая зондирования микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур: [Учеб. пособие для вузов по направлению "Техн. физика"] / С.А. Рыков; Под общ. ред. В.И. Ильина, А.Я. ШикаСПб.: Наука, 200152 с.: ил.; 21 см. (Новые разделы физики полупроводников) ISBN 5-02-024956-4.
- 3 Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля: учебное пособие для вузов по направлению подготовки "Прикладная математика и физика" / Д. Брандон, У. Каплан; пер. с англ. под ред. С.Л. Баженова; с доп. О.В. Егоровой Москва: Техносфера, 2004, 377 с.: ил.; 25 см. (Мир материалов и технологий; VI; 02) ISBN 0-471-98501-5.

#### 5.2 Дополнительная литература

- 4 Юбилейный сборник избранных трудов Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (1964 - 2014) / Федер. гос. бюджет. учреждение науки Ин-т физики

полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН; [отв. ред. А.В. Латышев, А.В. Двуреченский, А.Л. Асеев] Новосибирск: Параллель, 2014, 843 с.: ил.; 25 см. ISBN 978-5-98901-144-5.

5. Методы получения и свойства нанообъектов: учебное пособие: [для студентов, обучающихся по специальности "Нанотехнологии" / Н.И. Минько, В.В. Строкова, И.В. Жерновский, В.М. Нарцев] Москва: Флинта: Наука, 2009162, [1] с.: ил., табл.; 21 см. ISBN 978-5-9765-0326-7 ISBN 978-5-02-034741-0 Вудраф, Д. Современные методы исследования поверхности / Д. Вудраф, Т. Делчар; Пер. с англ. Е.Ф. Шека / Под ред. В.И. Раховского = Modern Techniques of Surface Science. М.: Мир, 1989. 568 с.

6. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: Учеб. пособие для вузов / В. Миронов; РАН, Ин-т физики микроструктур М.: Техносфера, 2004, 143 с.: ил.; 22 см. (Мир физики и техники; II; 02) ISBN 5-94836-034-2.

7. Уикли, Бренда С. Электронная микроскопия для начинающих / Б. С. Уикли ; пер. с англ. И. В. Викторова; под ред. и с предисл. В. Ю. Полякова Москва : Мир, 1975, 324 с..

## **6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся**

Размещение учебных материалов:

Адрес в интернете, по которому размещены учебные материалы дисциплины:

<http://www.isp.nsc.ru/obrazovanie/aspirantura/obshchaya-informatsiya>

Обучающиеся полностью обеспечены необходимой научной литературой за счет фондов библиотеки НГУ (<http://libra.nsu.ru/>). Обучающимся, проходящим практику в Институтах СО РАН, предоставляется доступ к информационным ресурсам на тех же основаниях, что и научным сотрудникам этих институтов на основании договоров о прохождении практической подготовки.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины**

Освоение дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет;

Взаимодействие обучающегося с преподавателем (синхронное и (или) асинхронное) осуществляется через личный кабинет студента в ЭИОС.

### 7.1 Современные профессиональные базы данных:

1. Полнотекстовые журналы Springer Journals за 1997-2020 г., электронные книги (2005-2020 гг.), коллекция научных биомедицинских и биологических протоколов SpringerProtocols, коллекция научных материалов в области физических наук и инжиниринга SpringerMaterials, реферативная БД по чистой и прикладной математике zbMATH.

2. Электронная библиотека диссертаций Российской государственной библиотеки (ЭБД РГБ).

3. Полнотекстовые электронные ресурсы Freedom Collection издательства Elsevier (Нидерланды) (23 предметные коллекции).

4. Электронные ресурсы Web of Science Core Collection (Thomson Reuters Scientific LLC.), Journal Citation Reports + ESI.

5. Электронные БД JSTOR (США). 15 предметных коллекций: Arts & Sciences I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, Life Sciences, Health & General Science, Mathematics & Statistics, Ecology & Botany, Language & Literature, Business I, II.).
6. БД Scopus (Elsevier).

#### 7.2. Информационные справочные системы

1. Раздел "Образование" сайта ИФП СО РАН - URL:  
[http://www.isp.nsc.ru/index.php?ACTION=part&id\\_part=4&sub\\_part=81](http://www.isp.nsc.ru/index.php?ACTION=part&id_part=4&sub_part=81)

Поисковая платформа "Web of Knowledge

[http://apps.webofknowledge.com/WOS\\_GeneralSearch\\_input.do?product=WOS&search\\_mode=GeneralSearch&SID=S2kBCc@@5IIfkFB7B9a&preferencesSaved=&highlighted\\_tab=WOS](http://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=S2kBCc@@5IIfkFB7B9a&preferencesSaved=&highlighted_tab=WOS).

### **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

### **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации;
2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

### **10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине и индикаторов их достижения, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы по дисциплине представлен в разделе 1.

#### ***10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине***

##### ***Текущий контроль успеваемости:***

Текущий контроль включает контроль посещаемости обучающимися еженедельных занятий, оценку их активности в ходе дискуссий и проверки заданий для самостоятельного решения.

Для организации и контроля самостоятельной работы аспирантов, а также проведения консультаций применяются информационно-коммуникационные технологии. Накануне каждого занятия аспирантам по электронной почте высылаются файлы с детальным планом занятия, контрольными вопросами и заданиями по теме, точным указанием страниц учебников и пособий, которые рекомендуется прочесть для активного усвоения материала на занятии.

Электронный адрес преподавателя: [alper\\_isp@mail.ru](mailto:alper_isp@mail.ru)

Текущий контроль успеваемости учитывается в рамках промежуточной аттестации.

#### **Промежуточная аттестация:**

Промежуточная аттестация по дисциплине «Нанодиагностика для аспирантов» проводится по итогам завершения программы дисциплины в виде зачета, по результатам которого выставляется оценка «зачтено» или «не зачтено». Оценка «зачтено» может быть выставлена по результатам текущего контроля, если в ходе представления самостоятельно подготовленного доклада и ответов на вопросы обучающийся продемонстрировал уровень сформированности компетенций не ниже порогового. Оценка «зачтено» является положительным результатом прохождения промежуточной аттестации. На зачете для дополнительной проверки сформированности отдельных компетенций обучающемуся могут быть заданы вопросы по пройденному материалу.

#### **Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине Нанодиагностика для аспирантов**

Таблица 10.1

Код компетенции	Результат обучения по дисциплине	Оценочное средство
<b>УК-1. Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях</b>		Работа на занятиях Представление доклада Зачет
УК-1.1	Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.	
УК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.	
<b>УК-5 Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития</b>		Работа на занятиях Представление доклада Зачет
УК-5.1	Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.	
УК-5.2	Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития.	
УК-5.3	Владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в	

	применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.	
<b>ОПК-1. Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий</b>		Работа на занятиях Представление доклада Зачет
ОПК-1.1	Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.	
ОПК-1.2	Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.	
ОПК-1.3	Владеть способностью составлять и оформлять научно-технической документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.	
<b>ПК-1. Способность построения теоретических моделей физических явлений и процессов в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>		Работа на занятиях Представление доклада Зачет
ПК-1.1	Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	
ПК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	
<b>ПК-2. Способность к решению научных и практических задач в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>		Работа на занятиях Представление доклада Зачет
ПК-2.1	Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	
ПК-2.2	Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (не зачтено)	Пороговый уровень (зачтено)	Базовый уровень (зачтено)	Продвинутый уровень (зачтено)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	УК 1.1 УК 5.1 ОПК 1.1 ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований.	Минимально допустимый уровень	Уровень знаний соответствует программе	Уровень знаний соответствует

	ПК 2.1	Имеют место грубые ошибки.	знаний. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	УК 1.2 УК 5.2 ОПК 1.2 ПК 1.2 ПК 2.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	УК 5.3 ОПК 1.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

***Типовые контрольные задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения***

**Тематика докладов дисциплины «Нанодиагностика для аспирантов».**

Ниже приведена примерная тематика докладов дисциплины (конкретная тема доклада определяется преподавателем совместно с обучающимся с учетом специфики научных исследования аспиранта).

1. Структурная диагностика низкоразмерных систем методами электронной микроскопии.

2. Атомная структура границ раздела и атомные конфигурации дефектов в полупроводниковых гетероструктурах
3. Сканирующие зондовые методы для характеристики полупроводниковых структур.
4. Полупроводниковые нанотехнологии создания модельных квантовых наносистем, составляющих основу нового поколения элементной базы нанoeлектроники
5. Современные технологии синтеза полупроводниковых структур и методы их структурно-химической характеристики

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)

Физический факультет

---

Кафедра физики полупроводников

---

## КАНДИДАТСКИЙ ЭКЗАМЕН

**Модуль**

**«Физика конденсированного состояния»**

направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия

**Курс 2, семестр 4**

профиль

**Физика конденсированного состояния**

Форма обучения: **очная**

Заведующий кафедрой физики полупроводников ФФ  
академик РАН, д.ф.-м.н., А.В. Латышев



Новосибирск 2020

## Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по модулю, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы -----	75
2. Место модуля в структуре образовательной программы -----	76
3. Трудоемкость модуля в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающегося -----	77
4. Содержание модуля, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий -----	77
5. Перечень учебной литературы -----	78
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся -----	78
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения модуля -----	79
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по модулю -----	79
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине -----	79
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине -----	80

## 1.Перечень планируемых результатов обучения по модулю, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

В рамках промежуточной аттестации (сдачи кандидатского экзамена) по модулю «Физика конденсированного состояния» проводится оценка универсальных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций (портфолио), полученных в рамках прохождения дисциплин «Теория твердого тела для аспирантов», «Физические основы нанотехнологии для аспирантов», «Радиационная физика для аспирантов» и «Нанодиагностика для аспирантов», направленные на подготовку к сдаче кандидатского экзамена по профилю «Физика конденсированного состояния», а также порядок подготовки к сдаче и проведения кандидатского экзамена по профилю «Физика конденсированного состояния». В состав портфолио входят перечень типовых задач для самостоятельного решения, перечень и презентации докладов, подготовленных обучающимся самостоятельно в рамках освоения дисциплин модуля.

Код	Компетенции, формируемые в рамках дисциплины
<b>УК-1. Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях</b>	
УК-1.1	Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.
УК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.
<b>УК-5 Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития</b>	
УК-5.1	Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.
УК-5.2	Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития, владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования.
УК-5.3	Обладать знаниями, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.
<b>ОПК-1. Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий</b>	
ОПК-1.1	Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.
ОПК-1.2	Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.
ОПК-1.3	Владеть способностью составлять и оформлять научно-технической документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.

<b>ПК-1. Способность построения теоретических моделей физических явлений и процессов в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>	
ПК-1.1	Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
ПК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
<b>ПК-2. Способность к решению научных и практических задач в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>	
ПК-2.1	Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
ПК-2.2	Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

## **2. Место модуля в структуре образовательной программы**

Модуль «Физика конденсированного состояния» составлен в соответствии с требованиями СУОС по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации) и предназначен для аспирантов, обучающихся по профилю «Физика конденсированного состояния». Модуль включает в себя рабочие программы дисциплин «Теория твердого тела для аспирантов», «Физические основы нанотехнологии для аспирантов», «Радиационная физика для аспирантов» и «Нанодиагностика для аспирантов», направленные на подготовку к сдаче кандидатского экзамена по профилю «Физика конденсированного состояния», а также порядок подготовки к сдаче и проведения кандидатского экзамена по профилю «Физика конденсированного состояния».

Основная цель входящих в состав модуля дисциплин познакомить аспирантов с последними научными достижениями в области физики конденсированного состояния и практика презентации собственных научных результатов перед квалифицированной аудиторией.

Дисциплины (практики), изучение которых необходимо для освоения модуля Физика конденсированного состояния:

1. Теория твердого тела для аспирантов
- b. Физические основы нанотехнологии для аспирантов (дисциплина по выбору)
- c. Радиационная физика для аспирантов (дисциплина по выбору)
- d. Нанодиагностика для аспирантов (дисциплина по выбору)

Дисциплины (практики), для изучения которых необходимо освоение модуля Физика конденсированного состояния:

Подготовка научно-квалификационной работы (диссертации);

Подготовка к сдаче и сдача государственного экзамена;

Представление научного доклада об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы (диссертации).

**3. Трудоемкость модуля в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающегося**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)					
		Контактная работа обучающихся с преподавателем				Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Индивидуальная работа с преподавателем/ Консультации в период занятий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Кандидатский экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3-6	360	96	80		24	118	32	2	6		2
Всего 360 часов /10 зачетных единиц из них: - контактная работа 210 часов - в интерактивных формах 104 часа											
Компетенции: УК-1, УК-5, ОПК-1, ПК-1, ПК-2											

**4. Содержание модуля, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий**

№ п/п	Раздел модуля	Семестр	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						Консультации перед экзаменом	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы			Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции	Практические занятия	Индивидуальная работа с преподавателем /Консультации в период занятий				
1	2	3	4	5	6		7	8	9	10
1.	Б.1.В. ОД.									
1.1.	Теория твердого тела для аспирантов	3,4	216	64	64	12	72			4
2	Б.1.В. ВД.									
2.1.	Физические основы нанотехнологии для аспирантов	3	108	32	16	12	46			2
2.2.	Радиационная физика для аспирантов	3	108	32	16	12	46			2
2.3	Нанодиагностика для аспирантов	3	108	32	16	12	46			2
3.	Кандидатский экзамен	4	36					32	2	2
<b>Всего</b>			360	96	80	24	118	32	2	8
Общий объем контактной работы составляет 210 часов, в интерактивных формах – 104 часа										

Самостоятельная работа обучающихся

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к кандидатскому экзамену по специальности	32

## 5. Перечень учебной литературы

### 5.1 Основная литература

1. Брагинский Л. С., Магарилл Л. И., Махмудиан М. М., Погосов А. Г., Чаплик А. В., Энтин М. В. Сборник задач по теории твердого тела: учебное пособие : [для студентов 4-6 курсов Физ. фак. НГУ специальностей "Физика конденсированных сред", "Физика полупроводников", "Физика низких температур", "Квантовая оптика "] / Л.С. Брагинский, Л.И. Магарилл, М.М. Махмудиан [и др.]; М-во образования и науки РФ, Новосиб. гос. ун-т, Физ. фак., Каф. физики полупроводников Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, 2013, 121 с.: ил.; 20 см. ISBN 978-5-4437-0199-8
2. А. В. Ненашев, В. Л. Альперович. Колебания кристаллической решетки: учебное пособие: [для студентов и аспирантов физических специальностей вузов] / А.В. Ненашев, В.Л. Альперович; М-во образования и науки РФ, Новосиб. гос. ун-т, Физ. фак. Новосибирск : Редакционно-издательский центр НГУ, 2015 98 с. : ил. ; 20 см. ISBN 978-5-4437-0417-3.
3. Займан Дж. Физика твердого тела [Электронный ресурс] Электрон. дан. Ижевск: Регуляр. и хаотич. динамика, 2002. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM):
4. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела: [учебник: для студентов естественнонаучных и инженерных факультетов вузов] / Ч. Киттель; пер. с англ. под общ. ред. А.А. Гусева Изд. 2-е, стер Москва: Альянс, 2013. 791 с.

### 5.2 Дополнительная литература

5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников: [Учеб. пособие для физ. спец. вузов] / А.И. Ансельм 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука., 1978. 615 с.
6. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твёрдого тела. Т. I, II. М.: Мир, 1979.
7. Нанотехнологии: [Учеб. пособие для вузов по направлению "Нанотехнологии"] / Ч. Пул, Ф. Оуэнс; Пер. с англ. под ред. Ю.И. Головина = Introduction to Nanotechnology. М.: Техносфера, 2004. 327 с.
8. Методы получения и свойства нанообъектов: учебное пособие: [для студентов, обучающихся по специальности "Нанотехнологии" / Н.И. Минько, В.В. Строкова, И.В. Жерновский, В.М. Нарцев]. Москва: Флинта: Наука, 2009. 162.
9. Валиев К.А. Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике / К. А. Валиев, А. В. Раков Москва : Радио и связь, 1984, 350 с.
10. Наноэлектроника / [К.А. Валиев, В.В. Вьюрков, В.А. Гридчин и др.]; под ред. акад. А.А. Орликовского Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009-24 см. (Электроника в техническом университете, Прикладная электроника / под общ. ред. И.Б. Федорова)
11. Плазменная технология в производстве СБИС / [Толливер Д., Новицки Р., Хесс Д. и др.]; под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна; пер. с англ. Ю.М. Золотарева, В.В. Юдина; под ред. Е.С. Машковой Москва: Мир, 1987 469 с.
12. Моро У. Микролитография: принципы, методы, материалы: в 2 ч. Ч.1. / У. Моро; пер. с англ. под ред. Р.Х. Тимерова; с предисл. К.А. Валиева М: Мир, 1990 606 с.: ил.; 22 см. ISBN 5-03-001716-X.
13. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / [Л. Эсаки, Б.А. Джойс, Р. Хекингботтом и др.]; под ред. Л. Ченга, К Плога; пер. с англ. под ред. Ж.И. Алферова, Ю.В. Шмарцева Москва: Мир, 1989 582 с. : ил. ; 21 см. ISBN 5-03-000737-7.

## 6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся

Размещение учебных материалов: Адрес страницы кафедры ИФП СО РАН

Раздел "Образование" сайта ИФП СО РАН - URL:

<http://www.isp.nsc.ru/obrazovanie/aspirantura/obshchaya-informatsiya>

Обучающиеся полностью обеспечены необходимой научной литературой за счет фондов библиотеки НГУ (<http://libra.nsu.ru/>). Обучающимся, проходящим практику в Институтах СО РАН, предоставляется доступ к информационным ресурсам на тех же основаниях, что и научным сотрудникам этих институтов на основании договоров о прохождении практической подготовки.

#### **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения модуля**

Освоение дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

Взаимодействие обучающегося с преподавателем (синхронное и (или) асинхронное) осуществляется через личный кабинет студента в ЭИОС.

##### 7.1 Современные профессиональные базы данных:

1. Полнотекстовые журналы Springer Journals за 1997-2020 г., электронные книги (2005-2020 гг.), коллекция научных биомедицинских и биологических протоколов SpringerProtocols, коллекция научных материалов в области физических наук и инжиниринга SpringerMaterials, реферативная БД по чистой и прикладной математике zbMATH.
2. Электронная библиотека диссертаций Российской государственной библиотеки (ЭБД РГБ).
3. Полнотекстовые электронные ресурсы Freedom Collection издательства Elsevier (Нидерланды) (23 предметные коллекции).
4. Электронные ресурсы Web of Science Core Collection (Thomson Reuters Scientific LLC.), Journal Citation Reports + ESI.
5. Электронные БД JSTOR (США). 15 предметных коллекций: Arts & Sciences I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, Life Sciences, Health & General Science, Mathematics & Statistics, Ecology & Botany, Language & Literature, Business I, II).
6. БД Scopus (Elsevier).

##### 7.2. Информационные справочные системы

7. Электронный архив: «Новые полупроводниковые материалы: Характеристики и свойства» - URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/rintroduction.html>

#### **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по модулю**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

#### **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Для реализации дисциплин по модулю используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации;
2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете.

## **10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

Перечень планируемых результатов обучения по модулю и индикаторов их достижения, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы по дисциплине представлен в разделе 1.

### ***10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по модулю***

#### ***Текущий контроль успеваемости:***

Текущий контроль успеваемости по модулю «Физика конденсированного состояния» представляет собой контроль результатов освоения дисциплин, входящих в состав модуля: «Теория твердого тела для аспирантов», «Физические основы нанотехнологии для аспирантов», «Радиационная физика для аспирантов» и «Нанодиагностика для аспирантов» и осуществляется в форме презентации аспирантом доклада по одному из разделов программы дисциплины.

#### ***Промежуточная аттестация:***

Промежуточная аттестация проводится в форме кандидатского экзамена. Кандидатский экзамен проводится по программе, соответствующей примерной программе, утвержденной Министерством образования и науки Российской Федерации.

Для приема кандидатского экзамена создается комиссия по приему кандидатских экзаменов (экзаменационная комиссия), состав которой утверждается приказом ректора НГУ. Состав экзаменационной комиссии формируется из числа научно-педагогических работников (в том числе работающих по совместительству) НГУ в количестве не более 5 человек, и включает в себя председателя, заместителя председателя и членов экзаменационной комиссии.

В состав экзаменационной комиссии могут включаться научно-педагогические работники других организаций.

Для оценивания знаний обучающегося в рамках проведения кандидатского экзамена используются следующие оценочные средства:

1. Портфолио - целевая подборка работ студентов, раскрывающая его индивидуальные образовательные достижения в одной или нескольких учебных дисциплинах;
2. Экзаменационный билет - комплекс вопросов и задач.

Кандидатский экзамен проводится экзаменационной комиссией по билетам (программам), утверждаемым деканом физического факультета НГУ. Для подготовки экзаменуемый использует листы ответа, которые хранятся в деле обучающегося вместе с протоколом экзамена.

В случае неявки экзаменуемого на кандидатский экзамен по уважительной причине

(при наличии подтверждающих документов) он может быть допущен приказом ректора к сдаче кандидатского экзамена в течение текущего периода приема экзаменов.

В случае получения неудовлетворительной оценки пересдача кандидатского экзамена в течение текущего периода приема экзаменов не допускается. Пересдача кандидатского экзамена с положительной оценки на другую положительную оценку не допускается. Оценка уровня знаний экзаменуемого определяется экзаменационными комиссиями по пятибалльной шкале.

Оценка выставляется простым большинством голосов членов экзаменационной комиссии. При равенстве голосов решающей считается оценка председателя.

Экзаменуемым может быть в двухдневный срок подана апелляция ректору о несогласии с решением экзаменационной комиссии.

Экзаменационная комиссия по приему кандидатского экзамена по специальной дисциплине правомочна принимать кандидатский экзамен по специальной дисциплине, если в ее заседании участвуют не менее 3 специалистов, имеющих ученую степень кандидата или доктора наук по научной специальности, соответствующей специальной дисциплине, в том числе не менее одного доктора наук.

Решение экзаменационной комиссии оформляется протоколом, в котором указываются, в том числе, код и наименование направления подготовки, по которой сдавались кандидатские экзамены; шифр и наименование научной специальности, наименование отрасли науки, по которой подготавливается научно-квалификационная работа (диссертация).

***Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по модулю Физика конденсированного состояния***

Таблица 10.2 Критерии оценки сформированности компетенций<sup>1</sup> в рамках промежуточной аттестации по модулю

Шифр компетенций	Структурные элементы оценочных средств	Показатель сформированности	Не сформирован (неудовлетворительно)	Пороговый уровень (удовлетворительно)	Базовый уровень (хорошо)	Продвинутый уровень (отлично)
УК - 1	Портфолио (презентация), устное сообщение	Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности. (УК-1.1) Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования. (УК-1.2)	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки. Отсутствуют умения при решении поставленных задач.	Минимально допустимый уровень знаний. Допускается значительное количество негрубых ошибок. Наличие минимального уровня умений при решении поставленных задач.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок либо не полностью отвечает на дополнительные вопросы. Демонстрирует умения при решении поставленных задач.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы. Демонстрирует умения при решении поставленных задач на высоком уровне.
УК -5	Портфолио (презентация), устное сообщение	Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки. Отсутствуют умения при	Минимально допустимый уровень знаний. Допускается значительное количество негрубых	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины.

<sup>1</sup> Выбор показателя сформированности компетенции (укрупненной характеристики компетенции) из представленных для оценки осуществляется случайным образом

		<p>профессионально-значимых задач. (УК-5.1).          Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития. (УК-5.2).          Владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования. (УК-5.3).</p>	<p>выявлении и формулировке проблемы собственного профессионального развития.          Отсутствуют навыки владения приемами выполнения научных исследований на современном мировом уровне.</p>	<p>ошибок.          Наличие минимального уровня умений при выявлении и формулировке проблемы собственного профессионального развития.          Наличие минимального уровня владения приемами выполнения научных исследований на современном мировом уровне</p>	<p>Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок либо не полностью отвечает на дополнительные вопросы.          Демонстрирует умения при выявлении и формулировке проблемы собственного профессионального развития.          Демонстрирует навыки владения приемами выполнения научных исследований на современном мировом уровне</p>	<p>Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.          На высоком уровне демонстрирует умения при выявлении и формулировке проблемы собственного профессионального развития.          На высоком уровне демонстрирует навыки владения приемами выполнения научных исследований на современном мировом уровне</p>
ОПК - 1	<p>Портфолио (презентация), устное сообщение</p>	<p>Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности. (ОПК-1.1).          Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные</p>	<p>Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.          Отсутствуют умения при определении применения современных научных методов исследования и информационно-</p>	<p>Минимально допустимый уровень знаний.          Допускается значительное количество негрубых ошибок.          Наличие минимального уровня умений при определении применения</p>	<p>Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины.          Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок либо не отвечает на дополнительные вопросы.</p>	<p>Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины.          Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.</p>

		<p>технологии в зависимости от специфики объекта исследования (ОПК-1.2). Владеть способностью составлять и представлять научные обзоры, доклады (ОПК-1.3).</p>	<p>коммуникационные технологий. Доклад не последователен, не ясна суть работы</p>	<p>современных научных методов исследования и информационно-коммуникационные технологий. Доклад не в полной мере отражает суть работы, нарушена последовательность</p>	<p>Минимально допустимый уровень знаний. Допускается значительное количество негрубых ошибок. Демонстрирует умения при определении применения современных научных методов исследования и информационно-коммуникационные технологий. Доклад отражает суть работы, но нарушена последовательность</p>	<p>На высоком уровне демонстрирует умения при определении применения современных научных методов исследования и информационно-коммуникационные технологий. Доклад отражает суть работы, последователен.</p>
ПК-1	Вопрос экзаменационного билета	<p>Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования (ПК-1.1) Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования. (ПК-1.2).</p>	<p>Не демонстрирует либо демонстрирует отдельные несвязанные знания и умения в профессиональной области деятельности</p>	<p>Демонстрирует общие знания и умения базовых понятий в профессиональной области деятельности</p>	<p>Демонстрирует хорошие знания и умения базовых понятий в профессиональной области деятельности, но допускает некоторые несущественные ошибки, неточности в формулировках</p>	<p>Демонстрирует углубленные знания и умения базовых понятий и моделей в профессиональной области деятельности</p>

ПК-2	<p>Вопрос экзаменационного билета</p>	<p>Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования. (ПК-2.1)          Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования. (ПК-2.2)</p>	<p>Не владеет (знания, умения) основными физическими понятиями и законами в профессиональной области деятельности</p>	<p>Владеет базовыми (знания, умения) понятиями в профессиональной области деятельности</p>	<p>Владеет(знания, умения) всеми понятиями, в профессиональной области деятельности, и понимает их взаимосвязь, но допускает некоторые несущественные ошибки, неточности в формулировках</p>	<p>Свободно владеет (знания, умения) всеми понятиями, в профессиональной области деятельности, понимает их взаимосвязь и границы применимости</p>
------	---------------------------------------	---	---	--	--	---

## Критерии выставления оценок по результатам промежуточной аттестации по модулю

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается комиссией. Каждая решённая задача и каждый вопрос категории оценивается от 2 до 5 баллов. Соответствие уровня сформированности компетенции и оценки определяются следующим образом: не сформирована - 2 балла («неудовлетворительно»), пороговый уровень - 3 балла («удовлетворительно»), базовый уровень - 4 балла («хорошо») и продвинутый уровень - 5 баллов («отлично»).

Положительная оценка (3 балла и выше) ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Для получения положительной оценки необходимо продемонстрировать пороговый уровень при решении не менее двух задач из разных категорий. Если решено более двух задач из разных категорий, при дальнейшем расчете итоговой оценки учитывают два лучших результата решения задач из разных категорий.

Итоговая оценка за кандидатский экзамен выставляется комиссией как среднее арифметическое баллов, полученных за решение задач и за ответы на вопросы с округлением по математическим правилам. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Оценка	Критерии выставления оценки (содержательная характеристика)
«неудовлетворительно» (уровень компетенций не сформирован)	Аспирант не владеет теоретическим материалом, допуская грубые ошибки, испытывает затруднения в формулировке основных понятий в профессиональной области, не демонстрирует либо демонстрирует отдельные несвязанные знания
«удовлетворительно» (сформирован пороговый уровень компетенций)	Аспирант демонстрирует общие знания базовых понятий и моделей в профессиональной области, критичных для понимания основных явлений и экспериментов, но допускает существенные ошибки по содержанию рассматриваемых (обсуждаемых) вопросов
«хорошо» (сформирован базовый уровень компетенций)	Аспирант в основном демонстрирует углубленные знания базовых понятий, моделей, теорий, свободно владеет всеми основными разделами современной физики в профессиональной области, но допускает незначительные ошибки при ответах на дополнительные вопросы
«отлично» (сформирован продвинутый уровень компетенций)	Аспирант демонстрирует углубленные знания базовых понятий, моделей, гипотез и концепций, свободно владеет всеми основными разделами современной физики конденсированного состояния

**Типовые контрольные задания и иные материалы, необходимые для оценки  
результатов обучения**

**1. Форма экзаменационного билета и перечень экзаменационных задач и вопросов.**

Форма экзаменационного билета представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1.

<p><b>Новосибирский государственный университет</b></p> <p><b>Кандидатский экзамен</b></p> <hr/> <p>наименование модуля</p> <hr/> <p>наименование образовательной программы</p> <p><b>ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ №</b></p> <p>1. Вопрос 1 из программы. 2. Вопрос 2 из программы. 3. Задача из программы</p> <p>Составитель: _____ И. О. Фамилия (подпись)</p> <p>Ответственный за образовательную программу: _____ И. О. Фамилия (подпись)</p> <p>« ____ » _____ 20 ____ г.</p>
---

**Программа кандидатского экзамена:**

**1. Силы связи в твердых телах**

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

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>.

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.

**2. Симметрия твердых тел**

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.

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

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

### **3. Дефекты в твердых телах**

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

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

### **4. Дифракция в кристаллах**

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

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

### **5. Колебания решетки**

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.

### **6. Тепловые свойства твердых тел**

Теплоемкость твердых тел. Решеточная теплоемкость. Электронная теплоемкость.

Температурная зависимость решеточной и электронной теплоемкости.

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

Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Температура Дебая. Тепловое расширение твердых тел. Его физическое происхождение. Ангармонические колебания. Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана – Франца для электронной теплоемкости и теплопроводности.

### **7. Электронные свойства твердых тел**

Электронные свойства твердых тел: основные экспериментальные факты.

Проводимость, эффект Холла, термоЭДС, фотопроводимость, оптическое поглощение.

Трудности объяснения этих фактов на основе классической теории Друде.

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

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

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

Приближение почти свободных электронов. Брэгговские отражения электронов.

Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний.

Металлы, диэлектрики и полупроводники. Полуметаллы.

### **8. Магнитные свойства твердых тел**

Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Законы Кюри и Кюри – Вейсса. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости.

Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика. Ферромагнитные домены. Причины появления доменов. Доменные границы (Блоха, ееля).

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

Спиновые волны, магноны.

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

### **9. Оптические и магнитооптические свойства твердых тел**

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

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

Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта и Керра).

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

### **10. Сверхпроводимость**

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

Сверхпроводники первого и второго рода. Их магнитные свойства. Вихри Абрикосова.

Глубина проникновения магнитного поля в образец.

Эффект Джозефсона.

Куперовское спаривание. Длина когерентности. Энергетическая щель.

### **Дополнительная программа**

**Раздел 1.** Методы создания и структурно-химическая диагностика на атомарном уровне полупроводниковых систем пониженной размерности.

**Раздел 2** Оптическая диагностика полупроводниковых квантово-размерных наноструктур с высоким пространственным разрешением.

**Раздел 3** Сканирующая зондовая микроскопия, растровая электронная микроскопия.

**Раздел 4.** Фурье- спектроскопия

**Раздел 5** Нанолитография и нанометрология

**Раздел 6** Квантовые явления в низкоразмерных системах и наноструктурах

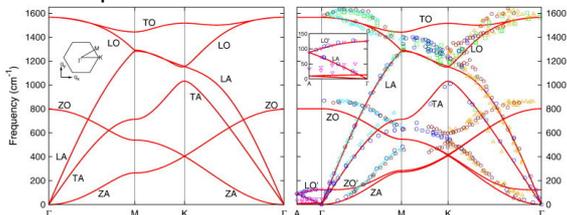
### **3.2 Перечень примерных вопросов к кандидатскому экзамену по модулю «Физика конденсированного состояния»**

29. Структура жидких и твердых тел. Твердые тела : кристаллические, аморфные, поликристаллические, квазикристаллические
30. Типы кристаллических решеток. Решетки Бравэ.
31. Прямая и обратная решетки. Свойства обратной решетки
32. Теорема Блоха
33. Колебания решетки. Фононный спектр решетки с одним атомом в элементарной ячейке
34. Колебания решетки. Фононный спектр решетки с двумя атомами в элементарной ячейке
35. Динамика решетки графена
36. Квантование решеточных мод. Фононы
37. Теплоемкость кристаллической решетки
38. Дифракция на решетке
39. Электроны в кристаллической решетке. Модель почти свободных электронов
40. Электроны в кристаллической решетке. Модель сильной связи
41. Статистика электронов в кристалле. Электронный вклад в теплоемкость
42. Зонная структура кристаллов. Металлы, полуметаллы, диэлектрики, полупроводники.
43. Зонная структура графена. Топологические изоляторы.
44. Элементарные возбуждения в твердых телах. Экситоны, плазмоны.
45. Элементарные возбуждения в твердых телах. Поляроны

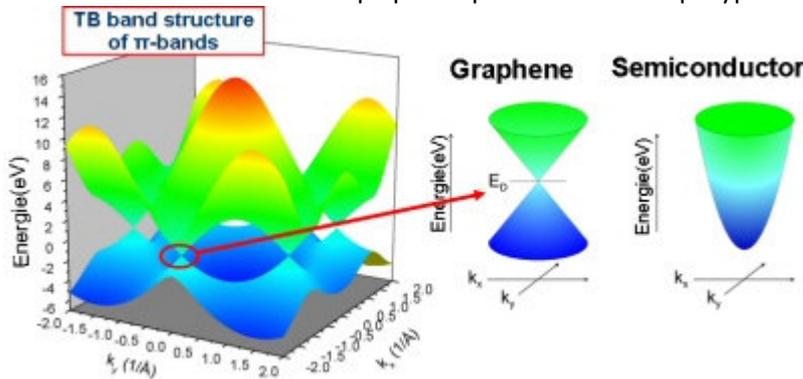
46. Взаимодействие с внешним электро-магнитным полем. Поляритоны
47. Спин во внешнем поле. Магноны.
48. Оптические свойства твердых тел. Поглощение света в полупроводниках.
49. Кинетическое уравнение Больцмана. Электропроводность
50. Кинетическое уравнение Больцмана. Теплопроводность.
51. Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации. Рассеяние на кулоновской примеси.
52. Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации. Рассеяние на фононах.
53. Электроны в магнитном поле. Эффект Холла. Циклотронный резонанс. Магнетосопротивление.
54. Электроны в квантующем магнитном поле. Уровни Ландау. Квантовый эффект Холла.
55. Фазовые переходы в твердых телах. Теория Ландау. Ферромагнетизм.
56. Фазовые переходы в твердых телах. Теория Ландау. Переходы в сегнетоэлектриках
57. Фазовые переходы в твердых телах. Переходы Мотта, Андерсена, Пайерлса.
58. Квантовая Бозе-жидкость. Сверхтекучесть.
59. Квантовая Ферми-жидкость. Сверхпроводимость. Модель БКШ.
60. Квантовая Ферми-жидкость. Сверхпроводимость. Сверхпроводник в магнитном поле. Сверхпроводники I и II рода

**Перечень примерных задач к экзамену  
по модулю «Физика конденсированного состояния»**

1. На Рис. 1 Показан фононный спектр графена. Нижняя ZA мода  $\omega = \beta k^2$  ( $\beta = 6 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ) соответствует колебаниям в направлении, перпендикулярном плоскости листа. Предполагая наличие только этой ветви, определить температурную зависимость фоновой компоненты теплоемкости графена при низких температурах.



2. На Рис. 2 показана электронная зонная структура графена. Фермиевская скорость  $v_F$  вблизи точки Дирака ( $E = \hbar v_F \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ ) равна  $10^6 \text{ м/с}$ . Предполагая уровень Ферми совпадающим с точкой Дирака, определить температурную зависимость электронной компоненты теплоемкости графена при низких температурах.



3. Фононный спектр одномерной решетки имеет вид

$$\omega = 2 \sqrt{\frac{\alpha}{m}} \left| \sin \frac{ka}{2} \right|.$$

Определить температурную зависимость фононной компоненты теплоемкости при низких температурах.

4. Электронный спектр одномерной решетки имеет вид

$$\varepsilon(k) = 2t \cos ka.$$

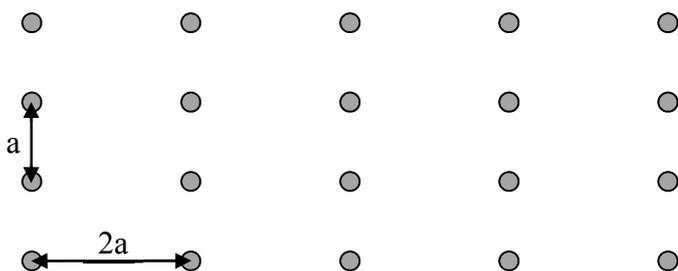
Считая уровень Ферми заданным, определить температурную зависимость электронной компоненты теплоемкости при низких температурах.

5. Электронный спектр двумерной решетки сильной связи имеет вид

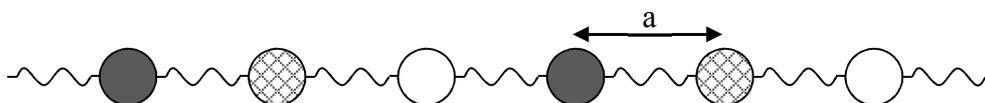
$$\varepsilon(\mathbf{k}) = 2t (\cos k_x a + \cos k_y a).$$

Определить эффективную массу дна зоны проводимости. Предполагая последнюю заполненной наполовину, изобразить поверхность Ферми.

6. Для изображенной здесь двумерной решетки нарисуйте ячейку Вигнера-Зейтца, обратную решетку и зону Бриллюэна.



7. Изобразите (качественно) закон дисперсии продольных колебаний одномерной цепочки, состоящей из атомов трёх типов:



Считать, что массы атомов разных типов близки друг к другу, но не равны.

Набор экзаменационных билетов формируется и утверждается в установленном порядке в начале учебного года при наличии контингента обучающихся, осваивающих модуль «Физика конденсированного состояния» в текущем учебном году.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по модулю требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

