

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО

решением Ученого совета ННГУ

протокол № 6 от 31.05.2023 г.

Рабочая программа дисциплины

Физика конденсированного состояния

Уровень высшего образования

Бакалавриат

Направление подготовки / специальность

11.03.04 - Электроника и нанoeлектроника

Направленность образовательной программы

Радиофотоника и оптоэлектроника

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2021 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.О.13 Физика конденсированного состояния относится к обязательной части образовательной программы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности	ОПК-1.1: Знать фундаментальные законы природы и основные физические и математические законы ОПК-1.2: Уметь применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера ОПК-1.3: Владеть навыками использования знаний физики и математики при решении практических задач.	ОПК-1.1: Знать физические законы и математические методы для описания конденсированного состояния. ОПК-1.2: Уметь применять физические законы и математические методы для решения задач по физике конденсированного состояния ОПК-1.3: Владеть навыками использования знаний физики и математики для определения свойств конденсированного состояния	Задачи Коллоквиум	Экзамен: Задачи Контрольные вопросы
ОПК-6 ОС ВО ННГУ: Способность применять фундаментальные знания о физических свойствах систем с пониженной размерностью и учитывать современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной	ОПК-6 ОС ВО ННГУ.1: Знать фундаментальные основы нано-технологий, физические свойства систем с пониженной размерностью. ОПК-6 ОС ВО ННГУ.2: Знать современные тенденции развития нано-технологий в своей профессиональной деятельности. ОПК-6 ОС ВО ННГУ.3: Уметь применять знания об основах нано-технологий и	ОПК-6 ОС ВО ННГУ.1: Знать принципы формирования и физические свойства систем с пониженной размерностью. ОПК-6 ОС ВО ННГУ.2: Знать современные методы нанотехнологий и перспективы применения систем с пониженной размерностью. ОПК-6 ОС ВО ННГУ.3: Уметь определять	Задачи Коллоквиум	Экзамен: Задачи Контрольные вопросы

деятельности	физических свойствах систем с пониженной размерностью в своей профессиональной деятельности.	важнейшие свойства систем с пониженной размерностью.		
--------------	--	--	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	4
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	64
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	32
- КСР	2
самостоятельная работа	10
Промежуточная аттестация	36 экзамен

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/ лабора- торные работы), часы	Всего	
	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о	
Тема 1. Введение	1	1	0	1	0
Тема 2. Методы исследования структуры твердого конденсированного состояния	4.5	2	2	4	0.5
Тема 3. Межатомные взаимодействия в конденсированном состоянии	6.5	4	2	6	0.5
Тема 4. Дефекты в кристаллах	6.5	4	2	6	0.5
Тема 5. Деформация в твердом конденсированном состоянии	5.5	3	2	5	0.5
Тема 6. Упругие волны в кристаллах	2.5	2	0	2	0.5
Тема 7. Собственные колебания кристаллической решетки. Фононы.	2.5	2	0	2	0.5
Тема 8. Динамика кристаллической решетки (фононная модель кристалла).	6.5	4	2	6	0.5
Тема 9. Поляризация диэлектриков.	6.5	4	2	6	0.5

Тема 10. Поляризация диэлектрических кристаллов, не имеющих центра симметрии.	2.5	2	0	2	0.5
Тема 11. Электронные теории Друде-Лоренца и Зоммерфельда.	4.5	2	2	4	0.5
Тема 12. Принципы зонной теории твердого тела.	6.5	6	0	6	0.5
Тема 13. Электрическая проводимости кристаллов в зонной теории.	15	6	8	14	1.0
ТЕМА 14. Оптические свойства конденсированного состояния.	6.5	2	4	6	0.5
Тема 15. Принципы полупроводниковой электроники.	2.5	2	0	2	0.5
Тема 16. Особенности электронных свойств аморфных веществ	2.5	2	0	2	0.5
Тема 17. Магнитные явления в конденсированном состоянии. Диа- и парамагнетизм.	6.5	4	2	6	0.5
Тема 18. Магнитный порядок в конденсированном состоянии.	2.5	2	0	2	0.5
Тема 19. Магнитные резонансы.	4.5	4	0	4	0.5
Тема 20. Сверхпроводимость.	10.5	6	4	10	0.5
Аттестация	36				
КСР	2			2	
Итого	144	64	32	98	10

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Павлов Павел Васильевич. Физика твердого тела : учебник. - 3-е изд., стер. - М. : Высшая школа, 2000. - 494 с. - 78.54.

Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / [пер. под общ. ред. А. А. Гусева]. - Изд. 2-е, стер., перепеч. с изд. 1978 г. - М. : МедиаСтар, 2006. - 792 с. - 525.00.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-1

1. Показать, что решетки ГЦК и ОЦК являются взаимно обратными.
2. Образец железа имеет плотность $\rho_{\text{Fe}}=7800 \text{ кг/см}^3$. Массовое число атома железа $A_{\text{Fe}}=55,84$. По данным рентгенографии здесь кубическая кристаллическая решетка с периодом трансляции в направлении $\langle 100 \rangle$ $a=0,286 \text{ нм}$. Определить тип элементарной кристаллической ячейки.
3. Для кубического кристалла выразить модуль Юнга (E), модуль сдвига (G) и коэффициент Пуассона (ν) через компоненты матрицы упругих коэффициентов (C_{ij}). Скорость звука в меди составляет $V=3830 \text{ м/с}$. Используя приближение Дебая для теплоемкости, оценить частоту и температуру Дебая.
4. Скорость звука в меди составляет $V=3830 \text{ м/с}$. Используя приближение Дебая для теплоемкости, оценить частоту и температуру Дебая.

5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-6 ОС ВО ННГУ

1. Нанокристалл кремния находится в равновесии в аморфной матрице SiO₂ при комнатной температуре. Всю систему нагревают до 700 0С. Коэффициент линейного расширения кремния при этой температуре $\alpha \approx 10^{-5}$ град.⁻¹, что на порядок превышает значение этого параметра для SiO₂. Используя значения упругих коэффициентов для кремния $C_{11}=16,74 \times 10^{11}$ дин/см², $C_{12}=6,52 \times 10^{11}$ дин/см², $C_{44}=7,96 \times 10^{11}$ дин/см², оценить давление на нанокристалл со стороны матрицы. Возникшие напряжения сравнить с пределом прочности кремния.
2. В приближении Дебая получить выражения для спектральной плотности колебаний в одномерной и двумерной моноатомной решетке.
3. В приближении Зоммерфельда получить выражения для плотности электронных состояний в одномерной и двумерной моноатомной решетке.

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Студент свободно владеет теоретическим материалом, ясно понимает условие задачи, самостоятельно находит путь ее решения и получает правильный результат.
отлично	Для понимания условий задачи требуется ознакомление с теоретическим материалом, но при этом студент самостоятельно находит путь ее решения и получает правильный результат.
очень хорошо	Для понимания условий задачи требуется ознакомление с теоретическим материалом, для ее решения нужны некоторые комментарии преподавателя.
хорошо	Для понимания условий задачи требуется ознакомление с теоретическим материалом, для ее решения нужны некоторые комментарии преподавателя, в ходе решения есть не принципиальные ошибки.
удовлетворительно	Для понимания условий задачи и ее решения требуются разъяснения преподавателя, в ходе решения студент допускает ошибки.
неудовлетворительно	Нет понимания условий задачи, студент не может найти путь ее решения даже при пояснениях преподавателя.
плохо	Полное незнание теоретического материала и непонимание условий задачи.

5.1.3 Типовые задания (оценочное средство - Коллоквиум) для оценки сформированности компетенции ОПК-1

1. Принципы геометрической теории дифракции рентгеновских лучей в кристалле.
Построение Эвальда.
2. Межатомное взаимодействие в двухатомной молекуле и в кристалле.
Электроотрицательность. Основные виды химической связи в кристаллах.

3. Подсчет энергии связи в молекулярных кристаллах.
4. Подсчет энергии связи в ионных кристаллах.
5. Принципы расчета энергии связи в ковалентных кристаллах методом ЛКАО (на примере молекулы водорода).
6. Основные типы дефектов в кристаллах. Расчет равновесных концентраций точечных дефектов по Шоттки.
7. Расчет равновесных концентраций точечных дефектов по Френкелю.
8. Дислокации. Контур и вектор Бюргерса. Механизмы движения дислокаций. Источники дислокаций.
9. Упругость твердого тела. Обобщенный закон Гука для кристаллов.
10. Пластические свойства твердых тел. Основные механизмы пластической деформации. Системы скольжения.
11. Упругие волны в кристаллах. Продольные и поперечные моды колебаний в кристаллах кубической сингонии.
- 12.

5.1.4 Типовые задания (оценочное средство - Коллоквиум) для оценки сформированности компетенции ОПК-6 ОС ВО ННГУ

Колебания одномерной монокристаллической цепочки. Закон дисперсии.

Упругие колебания одномерной атомной цепочки с базисом.

Акустические и оптические колебания.

Теплоемкость кристаллической решетки в моделях Эйнштейна и Дебая. Спектральная плотность фононов.

Теплопроводность кристаллической решетки. Рассеяние фононов, N- и U-процессы.

Критерии оценивания (оценочное средство - Коллоквиум)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Студент в целом ориентируется в теоретическом материале, при ответе могут быть неточности и негрубые ошибки.
не зачтено	Студент слабо представляет теоретический материал, при ответе допускает грубые ошибки.

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.

<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельным и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации

5.3.1 Типовые задания, выносимые на промежуточную аттестацию:

Оценочное средство - Задачи

Экзамен

Критерии оценивания (Задачи - Экзамен)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Свободно владеет вопросом, которому посвящена задача, ясно понимает условие задачи, быстро находит путь ее решения и получает правильный результат.
отлично	Понимает условие задачи, самостоятельно находит путь ее решения и получает правильный результат.
очень хорошо	Понимает условие задачи, самостоятельно находит путь ее решения, в ходе решения есть неточности.
хорошо	В целом понимает условие задачи, но нужен уточняющий комментарий преподавателя, при ее решении есть не принципиальные ошибки.
удовлетворительно	При решении задачи есть грубые ошибки.
неудовлетворительно	Задача не решена.
плохо	Полное отсутствие понимания предмета.

Типовые задания (Задачи - Экзамен) для оценки сформированности компетенции ОПК-1
(Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности)

Оценить радиус тетраэдрического междоузлия в структуре ГЦК.

Для кубического кристалла выразить модуль Юнга (E), модуль сдвига (G) и коэффициент Пуассона (ν) через компоненты матрицы упругих коэффициентов (C_{ij}).

Для кубического кристалла выразить модуль всестороннего сжатия через компоненты матрицы упругих коэффициентов (C_{ij}).

Типовые задания (Задачи - Экзамен) для оценки сформированности компетенции ОПК-6
ОС ВО ННГУ (Способность применять фундаментальные знания о физических свойствах систем с пониженной размерностью и учитывать современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности)

1. Нанокристалл кремния находится в равновесии в аморфной матрице SiO_2 при комнатной температуре. Всю систему нагревают до 700°C . Коэффициент линейного расширения кремния при этой температуре $\alpha \approx 10^{-5} \text{ град.}^{-1}$, что на порядок превышает значение этого параметра для SiO_2 . Используя значения упругих коэффициентов для кремния $C_{11}=16,74 \times 10^{11} \text{ дин/см}^2$, $C_{12}=6,52 \times 10^{11} \text{ дин/см}^2$, $C_{44}=7,96 \times 10^{11} \text{ дин/см}^2$, оценить давление на нанокристалл со стороны матрицы. Возникшие напряжения сравнить с пределом прочности кремния.
2. В приближении Дебая получить выражения для спектральной плотности колебаний в одномерной и двумерной моноатомной решетке.
3. В приближении Зоммерфельда получить выражения для плотности электронных состояний в одномерной и двумерной моноатомной решетке.

Оценочное средство - Контрольные вопросы

Экзамен

Критерии оценивания (Контрольные вопросы - Экзамен)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Студент свободно владеет теоретическим материалом, уверенно отвечает на дополнительные вопросы.
отлично	Студент владеет теоретическим материалом, в целом правильно отвечает на дополнительные вопросы.
очень хорошо	В целом студент владеет теоретическим материалом, при ответе на дополнительные вопросы есть неуверенность, есть негрубые ошибки.
хорошо	В целом студент владеет теоретическим материалом, но есть негрубые ошибки и неточности, при ответе на дополнительные вопросы есть неуверенность, есть ошибки,
удовлетворительно	Нет свободного владения теоретическим материалом, при ответе на дополнительные вопросы есть грубые ошибки,
неудовлетворительно	Нет понимания теоретического материала, нет ответов на дополнительные вопросы,
плохо	Полное отсутствие понимания предмета.

Типовые задания (Контрольные вопросы - Экзамен) для оценки сформированности компетенции ОПК-1 (Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности)

1. Дислокации. Контур и вектор Бюргерса. Механизмы движения дислокаций. Источники дислокаций.
2. Упругость твердого тела. Обобщенный закон Гука для кристаллов.
3. Пластические свойства твердых тел. Основные механизмы пластической деформации. Системы скольжения.

Типовые задания (Контрольные вопросы - Экзамен) для оценки сформированности компетенции ОПК-6 ОС ВО ННГУ (Способность применять фундаментальные знания о физических свойствах систем с пониженной размерностью и учитывать современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности)

1. Уравнение Шредингера для электронов в кристалле. Адиабатическое, валентное и одноэлектронное приближение. Циклические граничные условия Борна-Кармана.
2. Свойства волновой функции электрона в кристалле. Теорема Блоха.
3. Свойства волнового вектора электрона в кристалле. Квазиимпульс.

4. Энергетический спектр электрона в кристалле. Зонная структура. Зоны Бриллюэна.
5. Влияние дефектов на энергетический спектр электрона в кристалле. Поверхностные состояния (уровни Тамма).
6. Эффективная масса электрона в кристалле.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Павлов Павел Васильевич. Физика твердого тела : [учеб. пособие для вузов по специальности "Физика"]. - М. : Высшая школа, 1985. - 384 с. : ил. - 1.10., 34 экз.
2. Павлов Павел Васильевич. Физика твердого тела : учеб. для вузов, обучающихся по направлению "Физика" и специальностям "Физика и технология материалов и компонентов электронной техники", "Микроэлектроника и полупроводниковые приборы". - Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 1993. - 491 с. - ISBN 5-230-03839-x : 5000.00., 384 экз.
3. Павлов Павел Васильевич. Физика твердого тела : учебник. - 3-е изд., стер. - М. : Высшая школа, 2000. - 494 с. - 78.54., 33 экз.
4. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / [пер. под общ. ред. А. А. Гусева]. - Изд. 2-е, стер., перепеч. с изд. 1978 г. - М. : МедиаСтар, 2006. - 792 с. - 525.00., 45 экз.
5. Киттель Чарлз. Введение в физику твердого тела / пер. с 4-го америк. изд.: А. А. Гусева, А. В. Пахнева ; под общ. ред. А. А. Гусева. - М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. - 791 с. : ил. - 2.10., 28 экз.

Дополнительная литература:

1. Блейкмор Дж. Физика твердого тела / пер. с англ. под ред. Д. Г. Андрианова, В. И. Фистуля. - М. : Мир, 1988. - 608 с. : ил. - Расшир. и доп. изд. кн. "Физика твердого состояния". - ISBN 5-03-001256-7 : 3.00., 4 экз.
2. Анималу А. О. Е. Квантовая теория кристаллических твердых тел / пер. с англ. Е. Л. Ивченко, А. Л. Эфроса. - М. : Мир, 1981. - 574 с. : ил. - 2.60., 5 экз.
3. Гуртов Валерий Алексеевич. Физика твердого тела для инженеров : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям 210100 "Электроника и нанoeлектроника", 223200 "Техн. физика". - Изд. 2-е, испр. и доп. - М. : Техносфера, 2012. - 560 с. - (Мир физики и техники ; 2 - 27). - ISBN 978-5-94836-327-1 : 400.00., 1 экз.
4. Гуртов Валерий Алексеевич. Физика твердого тела для инженеров : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности 210101 "Физ. электроника" / науч. ред. Л. А. Алешина. - М. : Техносфера, 2007. - 520 с. - (Мир физики и техники ; 2 - 08). - ISBN 978-5-94386-141-3 : 130.00., 1 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

Учебные аудитории оснащены компьютерами с установленными программными пакетами и доступом в сеть "Интернет"

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: Видеопроектор, экран.

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

Программа составлена в соответствии с требованиями ОС ННГУ по направлению 11.03.04 - Электроника и нанoeлектроника.

Автор(ы): Карзанов Вадим Вячеславович, кандидат физико-математических наук, доцент.

Рецензент(ы): Бурдов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Павлов Дмитрий Алексеевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 20.05.2023, протокол № б/н.