

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

Кафедра физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол № 6 от «31» мая 2023 г.

**Рабочая программа дисциплины
Практикум по физике конденсированного
состояния**

Уровень высшего образования
бакалавриат

Направление подготовки: 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль): твердотельная электроника и нанoeлектроника

Форма обучения: очная

Нижегород, 2023

1. Место и цели дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Практикум по физике конденсированного состояния» относится к дисциплинам обязательной части образовательной программы по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника». Для усвоения данного курса необходимо изучить такие модули (дисциплины) в рамках образовательной программы бакалавра как «Общая физика», «Кристаллография» и иметь базовые представления об основных физических явлениях.

Цель освоения дисциплины " Практикум по физике конденсированного состояния "

- формирование у студентов понимания основных физических явлений и специфики применения физических законов для их описания в веществе, находящемся в конденсированном состоянии;
- развитие навыков в экспериментальном определении и количественных оценках важнейших характеристик конденсированного состояния;
- формирование представлений о практической значимости разнообразных свойств конденсированного состояния вещества.

Знания, полученные в ходе изучения дисциплины «Практикум по физике конденсированного состояния», необходимы для дальнейшего освоения других дисциплин учебного плана и выполнения выпускной квалификационной работы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

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	
ОПК 1. Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности	ОПК 1.1. Знает фундаментальные законы природы и основные физические и математические законы применительно к физике конденсированного состояния	Знать фундаментальные законы природы для описания физических явлений и эффектов в конденсированном состоянии Уметь применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера	Вопросы по темам/разделам дисциплины. Комплект заданий к лабораторному практикуму.
	ОПК 1.2. Умеет применять физические законы и математические методы для решения	Владеть навыками использования знаний физики и математики при решении практических	

	задач теоретического и прикладного характера ОПК 1.3. Владеет навыками использования знаний физики и математики при решении практических задач	задач	
ОПК ОС-6. Способен применять фундаментальные знания о физических свойствах систем с пониженной размерностью и учитывать современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности	ОПК ОС-6.1. Знает фундаментальные физические свойства систем с пониженной размерностью. ОПК ОС-6.2. Знает современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности ОПК ОС-6.3. Умеет применять знания об основах нанотехнологий и физических свойствах систем с пониженной размерностью в своей профессиональной деятельности	<i>Знать</i> фундаментальные физические свойства систем с пониженной размерностью. <i>Знать</i> современные тенденции развития физики конденсированного состояния с перспективой их применения в нанотехнологиях. <i>Уметь</i> применять знания о физических свойствах систем с пониженной размерностью для развития нанотехнологий <i>Владеть</i> навыками применения методов исследования систем с пониженной размерностью	Вопросы по темам/разделам дисциплины. Комплект заданий к лабораторному практикуму.

3. Структура и содержание дисциплины «Практикум по физике конденсированного состояния»

3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	2 ЗЕТ
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа): - занятия лабораторного типа - контроль самостоятельной работы (отчеты по лабораторным работам)	32 1
самостоятельная работа	39 (работа в семестре)

Промежуточная аттестация	6 семестр – зачет
--------------------------	-------------------

3.2. Содержание дисциплины

№ п/п	Раздел Дисциплины	С е м е с т р	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	Занятия лабораторного типа	Всего	
1	Межатомное взаимодействие в конденсированном состоянии. Природа химической связи в конденсированном состоянии	6	8			4	4	4
2	Дефекты в кристаллах	6	10			4	4	6
3	Деформация твердых тел	6	10			4	4	6
4	Электрическая поляризация конденсированного состояния	6	10			4	4	6
5	Электрическая проводимость твердых тел	6	10			4	4	6
6	Оптические свойства конденсированного состояния	6	8			4	4	4
7	Магнитные явления в конденсированном состоянии	6	15			8	8	7
	Промежуточная аттестация - зачет (по итогам выполнения лабораторных работ)							

Содержание разделов дисциплины

1. Межатомное взаимодействие в конденсированном состоянии. Природа химической связи в конденсированном состоянии.

Межатомное взаимодействие в двухатомных молекулах и кристаллах. Потенциалы притяжения и отталкивания. Энергетические параметры атомов, применяемых для описания межатомных взаимодействий. Основные типы химической связи в конденсированном состоянии. Ионность по Филиппсу. Степень ионности, ковалентности и металличности ковалентных связей по Харисону.

2. Дефекты в кристаллах.

Понятие дефекта в кристалле. Классификация дефектов по размерности, природе возникновения. Дефекты по Френкелю и по Шоттки. Дислокации.

3. Деформация твердых тел.

Понятия деформации и механического напряжения, их тензорный характер. Упругая деформация: закон Гука, модуль Юнга, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, модуль всестороннего сжатия. Упругая деформация монокристаллов. Матрица упругих коэффициентов. Виды пластической деформации. Твердость и микротвердость. Системы скольжения.

4. Электрическая поляризация конденсированного состояния

Основные величины, описывающие поляризацию. Механизмы электрической поляризации диэлектриков. Реальные и мнимые части поляризуемости, их зависимость от частоты переменного электрического поля. Уравнение Клаузиуса-Мосотти. Спектральная зависимость диэлектрической проницаемости. Диэлектрические потери. Поляризация нецентросимметричных диэлектриков. Сегнетоэлектрики. «Поляризационная катастрофа». Применение теории фазовых переходов Гинзбурга-Ландау для описания перехода «параэлектрик-сегнетоэлектрик».

5. Электрическая проводимость твердых тел.

Применение результатов зонной теории для описания температурной зависимости проводимости в металлах, собственных и легированных полупроводниках. Принципы полупроводниковой электроники. Особенности проводимости в аморфных полупроводниках. Особенности проводимости в диэлектриках.

6. Оптические свойства конденсированного состояния.

Основные определения и понятия. Механизмы излучения и поглощения света в конденсированном состоянии. Принципы оптоэлектроники. Солнечные элементы. Твердотельные лазеры.

7. Магнитные явления в конденсированном состоянии.

Диамагнетики и парамагнетики, закон Кюри. Магнетизм электронов проводимости. Электроны в сильных магнитных полях (эффекты де Гааза-ван Альфена, Шубникова-де Гааза).

Обменное взаимодействие как причина возникновения магнитного порядка. Ферро-, антиферро- и ферримагнетики, спиновые стекла. Модель усредненного обменного поля, закон Кюри-Весса. Доменная структура магнитоупорядоченных магнетиков.

Магнитные резонансы в конденсированном состоянии. ЭПР и ЯМР. Циклотронный резонанс. Ферро- и антиферромагнитный резонанс.

4. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине проводят в форме лабораторных занятий, а также в форме самостоятельной работы студентов. В ходе лабораторных занятий студенты осваивают экспериментальные методы исследования свойств вещества в конденсированном состоянии.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.

Самостоятельная работа студентов включает в себя активное изучение лекционного материала вместе с решением задач при использовании соответствующих разделов учебных пособий и описаний лабораторных работ.

Оценочными средствами для контроля текущей успеваемости являются текущие оценки в ходе регулярной и равномерной для каждой группы студентов работы на лабораторных занятиях и индивидуальные оценки после выполнения всего цикла лабораторных работ.

Для прохождения аттестации по предмету проводится зачет по итогам выполнения лабораторных работ.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

6.1 Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина, с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности 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, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность	При решении стандартных задач не продемонстрировано	Продemonстрированы основные умения.	Продemonстрированы все основные умения.	Продemonстрированы все основные умения.	Продemonстрированы все основные умения.	Продemonстрированы все основные умения.

	ть оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	ированы основные умения. Имели место грубые ошибки.	Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.	умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Решены все основные задачи . Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	умения, решены все основные задачи с отдельным и несущественным недочетами , выполнены все задания в полном объеме.	Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. 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 некоторыми 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

6.2. Описание шкал оценивания

Промежуточный контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде зачета, на котором определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала;
- способности студентов использовать полученные знания для выполнения конкретных заданий.

Зачет проводится по итогам выполнения лабораторных работ. Результаты оформляются в виде отчетов по лабораторным работам.

Критерии выставления оценки при сдаче зачета:

Зачтено	Выполнены все задания лабораторной работы. Отчеты оформлены правильно, полно и аккуратно. Представлены все необходимые рисунки, схемы и графики. Оформление графиков полностью соответствует общепринятым требованиям. Могут присутствовать незначительные недочёты, которые студент после замечания преподавателя способен исправить самостоятельно.
---------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	Студент отвечает полностью на вопросы по тематике лабораторных работ, показывая удовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
Не зачтено	Не выполнены отчеты по лабораторным работам, одно или более заданий лабораторных работ. Отчеты выполнены с ошибками, не все рисунки и схемы представлены. Оформление графиков не соответствует общепринятым требованиям. Требования к оформлению отчетов не соблюдены. Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий.

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующие этапы формирования компетенций

Для оценивания результатов обучения в виде *знаний, умений и владений* используются следующие процедуры и технологии:

- для оценивания результатов обучения в виде *знаний* используется фронтальный опрос на лабораторных работах;
- для оценивания результатов обучения в виде *умений* используются задачи и простые задания для выполнения лабораторных работ, включающих несколько вопросов в виде краткой формулировки действий (комплекса действий) для проведения необходимых операций и измерений, которые следует выполнить, или описание результата, который можно считать достоверным.
- для оценивания результатов обучения в виде *владений* используются комплексные задания лабораторных работ, требующие поэтапного решения в типичной ситуации и развернутого ответа.
- для проведения *итогового контроля* сформированности компетенции используются оформление и защита отчетов по лабораторным работам.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя контрольные вопросы, содержащиеся в учебно-методических пособиях по лабораторным работам. Эти вопросы используются при допуске к выполнению экспериментальной части работ. По итогам проверки отчётов о выполнении работ заполняется контрольный лист, в котором преподаватели, проводившие лабораторные занятия выставляют отметку о выполнении. Лабораторный практикум по курсу считается пройденным, если в контрольном листе набрано 4 отметки о выполнении лабораторных работ.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

Типовые вопросы для фронтальных опросов:

1. Записать условия Вульфа-Брегга-Лауэ.

2. Перечислить основные типы химических связей в конденсированном состоянии.
3. В чем отличие модели тепловых дефектов Шоттки от модели Френкеля?
4. Перечислить основные свойства дислокаций.
5. Что такое «система скольжения» для пластической деформации.
6. Определение 1-ой зоны Бриллюэна.
7. Почему массивный образец железа находится во многодоменном состоянии, а железные опилки однодоменные?

Типовые задания для лабораторных работ:

1. Определить ориентацию монокристалла кремния по измерениям микротвердости.
2. Определить тип проводимости полупроводника по знаку термо-эдс.
3. По температурной зависимости намагниченности ферромагнетика определить температуру Кюри.
4. Используя оптический микроскоп, определить показатель преломления оптически прозрачного материала

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Практикум по физике конденсированного состояния»

а) основная литература:

1. П.В.Павлов, А.Ф.Хохлов. Физика твердого тела.- М.: ВШ, 2000; Нижний Новгород: изд.ННГУ, 1993 (интернет-версия: <https://mexalib.com/view/17666>)
2. В.А.Гуртов, Р.Н.Осауленко. Физика твердого тела для инженеров. – М.: Техносфера, 2007 (интернет-версия: <https://nashol.com/2017120397793/fizika-tverdogo-tela-dlya-injenerov-gurtov-v-a-osaulenko-r-n-2012.html>)
3. Ч.Киттель. Введение в физику твердого тела. – М.: Наука, 1978 (интернет-версия: <http://alexandr4784.narod.ru/kittelftt.html>).
4. Дж.Блейкмор. Физика твердого тела. - М.: Мир, 1988 (интернет-версия: <http://bookfi.net/book/725627>).
5. Задачи по физике твердого тела./ Под ред. Г.Дж.Голдсмида.- М.:Наука, 1976 (интернет-версия: <http://bookfi.net/book/687258>).

б) дополнительная литература:

1. А.Анималу. Квантовая теория кристаллических твердых тел. – М.: Мир, 1981. (интернет-версия: <https://www.twirpx.com/file/2276911/>)
2. Н.Ашкрофт, Н.Мермин. Физика твердого тела, т.1,2.- М.: Мир, 1979 (интернет-версия: <https://mexalib.com/view/5434>).

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

1. Научная электронная библиотека (электронная библиотека периодических изданий - доступ через компьютеры, подключенные к сети ННГУ): <https://elibrary.ru/defaultx.asp>.
2. Электронная база данных по свойствам полупроводниковых материалов: <http://www.matprop.ru>.
3. Электронная база данных по физическим, химическим и структурным свойствам веществ и соединений (доступ через компьютеры, подключенные к сети ННГУ): <http://www.springermaterials.com>.

Учебно-методическое обеспечение дисциплины «Физика конденсированного состояния» обусловлено наличием необходимого количества учебников в библиотеке и на сайте ННГУ в электронном виде.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории.

При выполнении лабораторных работ используются лаборатории кафедры физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники и соответствующее оборудование:

- контрольно-измерительные комплексы NI PXI 1042 Q, включающие в себя мультиметры, осциллографы, генераторы стандартных сигналов, источники постоянного тока $0-(\mp 20)$ В и $0-(+6)$ В;
- микротвердомер ПМТ-3;
- металлографический микроскоп МИМ-7;
- оптический микроскоп;
- измеритель универсальный L.C.R. E7-11;
- а также сопряженные с этим оборудованием макеты лабораторных работ:
 - «Диаграммы состояния»,
 - «Зависимость микротвердости кристаллов от их ориентации и плотности дислокаций»,
 - «Определение точки Кюри ферромагнитных сплавов»,
 - «Кривая намагничивания ферро- и ферримагнетиков»,
 - «Поляризация диэлектриков»,
 - «Сегнетоэлектрики»,
 - «Четырехзондовый метод определения сопротивления полупроводников»,
 - «Определение ширины запрещенной зоны германия термическим методом»,
 - «Температурная зависимость термо-эдс в полупроводниках».

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 установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника».

Автор:

к.ф.-м. н., доцент кафедры физики полупроводников,
электроники и нанoeлектроники

В.В. Карзанов

Рецензент:
заведующий кафедрой
теоретической физики, д.ф.-м.н.

В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой
физики полупроводников, электроники
и наноэлектроники д.ф.-м.н. профессор

Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета
ННГУ, протокол б/н от «20» мая 2023 г.

Председатель Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ

А.А. Перов