

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич
Должность: врио ректора
Дата подписания: 21.07.2025 15:50:26
Уникальный программный ключ:
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
ФГБОУ ВО «ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Утверждаю:

Руководитель ООП



Е.М. Семенова

«24»

июня

2025 г.

Рабочая программа дисциплины

Физика пьезоэлектриков и пирозлектриков

Закреплена за
кафедрой:

Физики конденсированного состояния

Направление
подготовки:

03.03.02 Физика

Направленность
(профиль):

**Физика, технологии и компьютерное моделирование
функциональных материалов**

Квалификация:

Бакалавр

Форма обучения:

очная

Семестр:

8

Программу составил(и):

д-р физ.-мат. наук, проф., Солнышкин Александр Валентинович

Тверь, 2025

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Цели освоения дисциплины (модуля):

Целью дисциплины является формирование у студентов профессиональных знаний по физике пьезоэлектриков и пирозлектриков для понимания и постановки научной задачи по технологиям расчета, изготовления материалов этого типа и их использованию в современной промышленности. Приобретение обучающимися навыка решения задач и обсуждения полученных результатов с учетом современных достижений мировой науки по данному направлению.

Задачи:

Задачами освоения дисциплины является:

- формирование у обучающихся представлений о физике пьезоэлектрического и пирозлектрического эффектов, экспериментальных методах исследования пьезо- и пирозлектриков.
- освоение обучающимися методов поиска, критического анализа и синтеза информации в области физики пьезо- и пирозлектриков, а также применение системного подхода для решения поставленных задач.
- получение обучающимися практического опыта проведения теоретических исследований в области пьезо- и пирозлектриков с применением современных цифровых баз данных для анализа научно-технической информации, а также подготовки отчетов по результатам исследования.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Цикл (раздел) ОП: Б1.В

Требования к предварительной подготовке обучающегося:

Дифференциальные уравнения

Обработка и анализ данных физического эксперимента

Электричество и магнетизм

Электродинамика

Физика конденсированного состояния вещества

Основы физического металловедения

Физика полупроводников

Научно-исследовательская работа

Физика поверхности и низкоразмерных систем

Физический практикум по электричеству и магнетизму

Физика диэлектриков

Физика нелинейных кристаллов

Дисциплины (модули) и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:

3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость	2 ЗЕТ
Часов по учебному плану	72
в том числе:	
аудиторные занятия	52
самостоятельная работа	20

4. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫЕ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

ПК-2.1: Проводит экспериментальные исследования с применением научно-исследовательского оборудования в соответствии с утвержденными методиками

ПК-2.2: Анализирует физические явления и процессы в области физики конденсированного состояния и составляет отчет по теме исследования или по результатам проведенных экспериментов

5. ВИДЫ КОНТРОЛЯ

Виды контроля в семестрах:	
зачеты	8

6. ЯЗЫК ПРЕПОДАВАНИЯ

Язык преподавания: русский.

7. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Код занят.	Наименование разделов и тем	Вид занятия	Семестр / Курс	Часов	Источники	Примечание
	Раздел 1. Введение					
1.1	Природа пьезоэлектрического эффекта. Исторический обзор. Практическое использование пьезоэлектрического эффекта. Наиболее важные пьезоэлектрические кристаллы и их материалы. Электрострикционный эффект.	Лек	8	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	
1.2	Природа пьезоэлектрического эффекта. Исторический обзор. Практическое использование пьезоэлектрического эффекта. Наиболее важные пьезоэлектрические кристаллы и их материалы. Электрострикционный эффект.	Пр	8	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	
1.3	Природа пьезоэлектрического эффекта. Исторический обзор. Практическое использование пьезоэлектрического эффекта. Наиболее важные пьезоэлектрические кристаллы и их материалы. Электрострикционный эффект.	Ср	8	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	
	Раздел 2. Пьезоэлектрический эффект					

2.1	Основные физические характеристики и соотношения пьезоэлектрического эффекта в кристаллах. Прямой и обратный пьезоэффекты. Кристаллография пьезоэффекта. Связь пьезоэлектрических свойств кристаллов с упругими и диэлектрическими свойствами. Тензор пьезоэлектрических модулей. Ограничения, налагаемые симметрией на диэлектрические, пьезоэлектрические и упругие постоянные. Термодинамика пьезоэлектрических явлений в кристаллах. Пьезоэлектрические кристаллы как электромеханические преобразователи. Коэффициент электромеханической связи	Лек	8	6	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	
2.2	Основные физические характеристики и соотношения пьезоэлектрического эффекта в кристаллах. Прямой и обратный пьезоэффекты. Кристаллография пьезоэффекта. Связь пьезоэлектрических свойств кристаллов с упругими и диэлектрическими свойствами. Тензор пьезоэлектрических модулей. Ограничения, налагаемые симметрией на диэлектрические, пьезоэлектрические и упругие постоянные. Термодинамика пьезоэлектрических явлений в кристаллах. Пьезоэлектрические кристаллы как электромеханические преобразователи. Коэффициент электромеханической связи	Пр	8	6	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	
2.3	Самостоятельная подготовка к вопросам по теме "Пьезоэлектрический эффект"	Ср	8	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	

	Раздел 3. Экспериментальные методы исследования пьезоэлектрических кристаллов.					
3.1	Методика измерений на кристаллах малых размеров. Резонансные методы измерений. Продольные и сдвиговые колебания. Зависимость между частотами резонанса и антирезонанса, основными постоянными пьезоэлектрического кристалла. Определение упругих и пьезоэлектрических постоянных на срезах различной ориентации.	Лек	8	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	
3.2	Методика измерений на кристаллах малых размеров. Резонансные методы измерений. Продольные и сдвиговые колебания. Зависимость между частотами резонанса и антирезонанса, основными постоянными пьезоэлектрического кристалла. Определение упругих и пьезоэлектрических постоянных на срезах различной ориентации.	Пр	8	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	
3.3	Самостоятельная подготовка к вопросам по теме "Экспериментальные методы исследования пьезоэлектрических кристаллов"	Ср	8	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	
	Раздел 4. Важнейшие пьезоэлектрические кристаллы, их свойства и применение.					
4.1	Кварц. Физические свойства кварца. Различные типы колебаний, возбуждаемых в кварцевых пластинах. Кварцевые генераторы. Применения пьезокварца в ультразвуке. Пьезоэлектрические свойства и применение пьезоэлектрических кристаллов. Сегнетова соль. Титанат бария. Дигидрофосфат калия (КДП), Триглицинсульфат (ТГС). Сульфоидид сурьмы.	Лек	8	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	

4.2	Кварц. Физические свойства кварца. Различные типы колебаний, возбуждаемых в кварцевых пластинах. Кварцевые генераторы. Применения пьезокварца в ультразвуку. Пьезоэлектрические свойства и применение пьезоэлектрических кристаллов. Сегнетова соль. Титанат бария. Дигидрофосфат калия (КДП), Триглицинсульфат (ТГС). Сульфоидид сурьмы.	Пр	8	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	
4.3	Самостоятельная подготовка к вопросам по теме "пьезоэлектрические кристаллы, их свойства и применение"	Ср	8	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	
	Раздел 5. Пьезоэлектрическая керамика					
5.1	Основы технологии производства пьезокерамики. Изготовление пьезокерамики. Пьезоэлектрический эффект в керамике. Уравнения пьезоэффекта в керамике. Экспериментальные методы пьезо-электрических измерений в керамике. Важнейшие представители пьезокерамики. Титанаты. Цирконаты. Твердые растворы.	Лек	8	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	
5.2	Основы технологии производства пьезокерамики. Изготовление пьезокерамики. Пьезоэлектрический эффект в керамике. Уравнения пьезоэффекта в керамике. Экспериментальные методы пьезо-электрических измерений в керамике. Важнейшие представители пьезокерамики. Титанаты. Цирконаты. Твердые растворы.	Пр	8	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	
5.3	Самостоятельная подготовка к вопросам по теме "Пьезоэлектрическая керамика"	Ср	8	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	

	Раздел 6. Основные принципы пьезоэлектроники					
6.1	Применение пьезоэффекта. Принципы построения пьезоэлектронных устройств. Основные пьезоэлектронные приборы и устройства. Акустические преобразователи. Пьезокерамические датчики. Гидроакустические излучатели, приемники, фильтры, звукозаписывающие и др.	Лек	8	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	
6.2	Применение пьезоэффекта. Принципы построения пьезоэлектронных устройств. Основные пьезоэлектронные приборы и устройства. Акустические преобразователи. Пьезокерамические датчики. Гидроакустические излучатели, приемники, фильтры, звукозаписывающие и др.	Пр	8	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	
6.3	Самостоятельное изучение вопросов по теме "Основные принципы пьезоэлектроники"	Ср	8	4	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4 Л1.5Л2.1 Л2.2 Л2.3	

Список образовательных технологий

1	Активное слушание
2	Информационные (цифровые) технологии
3	Дискуссионные технологии (форум, симпозиум, дебаты, аквариумная дискуссия, панельная дискуссия, круглый стол, фасилитированная и т.д.)

8. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

8.1. Оценочные материалы для проведения текущей аттестации

См. Приложение

8.2. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации

Вопросы для промежуточно аттестации

1. Пьезоэлектрический эффект.
2. Прямой пьезоэлектрический эффект.
3. Физический смысл различных компонент тензора пьезомодулей.
4. Влияние симметрии кристалла на вид тензора (матрицы) пьезомодулей.
5. Пьезоэлектрические коэффициенты и их физический смысл.
6. Обратный пьезоэлектрический эффект.
7. Термодинамический потенциал и смысл производных термодинамических

потенциалов.

8. Вывод уравнения пьезоэффекта из термодинамических уравнений.
9. Взаимосвязь между пьезоэлектрическими коэффициентами в кристалле.
10. Физические условия измерения пьезоэлектрических коэффициентов. Прямой пьезоэлектрический эффект.
11. Физические условия измерения пьезоэлектрических коэффициентов. Обратный пьезоэлектрический эффект.
12. Пьезоэлектрические кристаллы как электромеханические преобразователи (определение коэффициента электромеханической связи).
13. Пьезоэлектрические кристаллы как электромеханические преобразователи (коэффициент электромеханической связи в пьезопреобразователях различного назначения).
14. Методы исследования пьезоэлектрических кристаллов (статические и динамические методы).
15. Продольные упругие колебания пьезоэлектрических кристаллов.
16. Сдвиговые упругие колебания пьезоэлектрических кристаллов.
17. Метод резонанса—антирезонанса.
18. Основные представители пьезоэлектриков (линейные кристаллические диэлектрики).
19. Пьезоэлектрические кристаллы. Сегнетоэлектрики. Особенности протекания пьезоэффекта в сегнетоэлектриках.
20. Представление о технологии производства пьезоэлектрической керамики.
21. Особенности пьезоэлектрического эффекта в пьезокерамике.
22. Основные представители пьезокерамических материалов. ЦТС. Фазовые диаграммы.
23. Применение пьезоэффекта.
24. Пьезоэлемент как многомерный объект управления основой математического описания моделей пьезоэлементов.

8.3. Требования к рейтинг-контролю

Студенты, освоившие программу курса, могут получить зачет по итогам семестровой и полусеместровой рейтинговой аттестации согласно «Положению о рейтинговой системе обучения ТвГУ» (протокол №8 от 30 апреля 2020 г.). Если условия «Положения о рейтинговой системе ...» не выполнены, то зачет сдается согласно «Положению о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) обучающихся по программам высшего образования ТвГУ» (протокол №11 от 28 апреля 2021 г.)

Модуль 1

Контрольная работа - 30 баллов

Модуль 2

Подготовка доклада по заданной теме, участие в дискуссии, выполнение самостоятельного задания - 30 баллов

Итоговая контрольная работа - 40 баллов

Максимальная возможная оценка за заполнение опросного листа (билета) текущей аттестации составляет 30 баллов. Она складывается из оценки уровня знаний (максимум 15 баллов), умений (максимум 15 баллов).

Максимальная возможная оценка за прохождение итоговой аттестации составляет 40 баллов. Она складывается из оценки уровня знаний (максимум 20 баллов) и владений (максимум 20 баллов).

9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

9.1. Рекомендуемая литература

9.1.1. Основная литература

Шифр	Литература
Л1.1	Павелко, Ситало, Павленко, Болдырев, Пироэлектрические, электроупругие и магнитные свойства сегнетоэлектриков, сегнетоэлектриков-релаксоров и мультиферроиков, Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета (ЮФУ), 2022, ISBN: 978-5-9275-4256-7, URL: https://znanium.ru/catalog/document?id=439263
Л1.2	Захаров, Ситало, Паринов, Болдырев, Пироэлектрический, флексоэлектрический и родственные эффекты в сегнетоэлектриках, антисегнетоэлектриках, сегнетоэлектриках-релаксорах и мультиферроиках, Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета (ЮФУ), 2021, ISBN: 978-5-9275-3972-7, URL: https://znanium.com/catalog/document?id=429838
Л1.3	Кульков В. Г., Физика конденсированного состояния в электротехническом материаловедении, Санкт-Петербург: Лань, 2022, ISBN: 978-5-8114-2379-8, URL: https://e.lanbook.com/book/209711
Л1.4	Пейсахович Ю. Г., Филимонова Н. И., Физика конденсированного состояния. Фазовые переходы. Магнетики. Свойства диэлектриков, Новосибирск: НГТУ, 2018, ISBN: 978-5-7782-3612-7, URL: https://e.lanbook.com/book/118468
Л1.5	Фомин Д. В., Экспериментальные методы физики твердого тела, Москва, Берлин: Директ-Медиа, 2019, ISBN: 978-5-4499-0151-4, URL: https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=575229

9.1.2. Дополнительная литература

Шифр	Литература
Л2.1	Земляков, Электроакустические пьезопреобразователи и антенные решетки, Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета (ЮФУ), 2017, ISBN: 978-5-9275-2370-2, URL: https://znanium.com/catalog/document?id=339518
Л2.2	Нестеров, Панич, Современные проблемы материаловедения керамических пьезоэлектрических материалов, Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета (ЮФУ), 2010, ISBN: 978-5-9275-0736-8, URL: https://znanium.com/catalog/document?id=175093
Л2.3	Головнин В. А., Каплунов И. А., Малышкина О. В., Педько Б. Б., Мовчикова А. А., Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов, Москва: Техносфера, 2013, ISBN: 978-5-94836-352-3, URL: https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=233464

9.3.1 Перечень программного обеспечения

1	Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows
2	Adobe Acrobat Reader
3	Google Chrome
4	WinDjView
5	OpenOffice
6	Origin 8.1 Sr2
7	Многофункциональный редактор ONLYOFFICE

9.3.2 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1	Репозиторий ТвГУ
---	------------------

2	Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU (подписка на журналы)
3	ЭБС ТвГУ
4	ЭБС BOOK.ru
5	ЭБС «Лань»
6	ЭБС IPRbooks
7	ЭБС «Университетская библиотека онлайн»
8	ЭБС «ЮРАИТ»
9	ЭБС «ZNANIUM.COM»

10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Аудит-я	Оборудование
3-35	комплект учебной мебели, экран настенный, переносной ноутбук, проекторы
3-45	комплект учебной мебели, компьютеры, сканер, компьютерный измерительный комплекс, микроскоп, осциллограф, принтер, генератор сигналов специальной

11. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Пример опросного листа для полусеместровой аттестации:

1. Пьезоэлектрические коэффициенты и их физический смысл.
2. Основные методы исследования различных физических свойств пьезокерамики.
3. Используя метод Фуми показать, что для кристаллов симметрии 422 и 622 не существует продольного пьезоэлектрического эффекта ни в одном направлении.

Пример варианта билета для итоговой аттестации:

1. Обратный пьезоэлектрический эффект.
2. Физический смысл различных компонент тензора пьезомодулей.
3. Из поляризованной керамики титаната бария изготовили образец в виде куба и действовали напряжением сжатия t в направлении оси поляризации. Затем этот образец был подвергнут действию гидростатического сжатия p . На каких гранях куба при таких испытаниях возникают электрические заряды? Какие пьезомодули керамики титаната бария могут быть определены при таких испытаниях?

Вопросы для текущей аттестации

1. Кристаллы турмалина, сульфата лития и виннокислого калия относятся к полярным классам симметрии и могут быть использованы в качестве датчиков статического или низкочастотного гидростатического давления. Какой из перечисленных кристаллов обладает наибольшей чувствительностью к гидростатическому давлению?
2. Описать понятия: Пьезоэлектрический эффект; прямой пьезоэлектрический эффект; Обратный пьезоэлектрический эффект.
3. Для определения пьезомодулей поляризованной керамики титаната бария из нее изготовили образец в виде куба и действовали напряжением сжатия t в направлении оси поляризации керамики. Затем этот же образец был подвергнут действию гидростатического сжатия p . На каких гранях куба при таких испытаниях возникают электрические заряды? Какие пьезомодули керамики титаната бария могут быть определены по результатам этих испытаний?
5. Найти вид матрицы пьезомодулей для сегнетовой соли (в задачах, посвященных пьезоэффекту в сегнетовой соли, имеется в виду кристалл в сегнетоэлектрической фазе, в

полидоменном состоянии).

6. Охарактеризовать продольный пьезоэлектрический эффект в кристаллах сегнетовой соли. Каким уравнением описывается продольный пьезо-электрический эффект пластинки произвольной ориентации? Есть ли такие направления, в которых этот эффект отсутствует?

7. Опишите основные методы исследования различных физических свойств пьезокерамики.

8. Показать, что для кристаллов симметрии 422 и 622 не существует продольного пьезоэлектрического эффекта ни в одном направлении.

9. Пьезоприемник состоит из мембраны, на внутренней стороне которой набирается столбик из тонких кристаллических пластинок. Между пластинками прокладываются электроды из тонкой металлической фольги. Выбрать пластинки сегнетовой соли - 45° X - среза или 45° Y –среза, которые обладают большей чувствительностью в качестве приемников, если используется поперечный пьезоэффект.

10. Дать классификацию основных экспериментальных методов исследования пьезоэлектрических и упругих характеристик кристаллов.