

Документ подписан электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич  
Должность: врио ректора  
Дата подписания: 10.07.2024 12:02:42  
Уникальный программный ключ:  
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

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

Утверждаю:



Руководитель ООП

*[Handwritten signature]*

Б.Б.Педько

«21» мая 2024 г.

Рабочая программа дисциплины

**Физика пьезоэлектриков и пироэлектриков**

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):  
*канд. физ.-мат. наук, декан, Педько Б.Б.*

*[Handwritten signature]*

Тверь, 2024

## 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

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| <b>Общая трудоемкость</b> | 2 ЗЕТ |
| Часов по учебному плану   | 72    |
| <b>в том числе:</b>       |       |
| 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<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>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<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>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<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>Л2.2 Л2.3 |            |
|            | Раздел 2. Пьезоэлектрический эффект   |             |                |       |   |            |

|     |  |     |   |   |   |  |
|-----|--|-----|---|---|---|--|
| 2.1 | <p>Основные физические характеристики и соотношения пьезоэлектрического эффекта в кристаллах.</p> <p>Прямой и обратный пьезоэффекты.</p> <p>Кристаллография пьезоэффекта. Связь пьезоэлектрических свойств кристаллов с упругими и диэлектрическими свойствами.</p> <p>Тензор пьезоэлектрических модулей.</p> <p>Ограничения, налагаемые симметрией на диэлектрические, пьезоэлектрические и упругие постоянные. Термодинамика пьезоэлектрических явлений в кристаллах.</p> <p>Пьезоэлектрические кристаллы как электромеханические преобразователи. Коэффициент электромеханической связи</p> | Лек | 8 | 6 | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>Л2.2 Л2.3 |  |
| 2.2 | <p>Основные физические характеристики и соотношения пьезоэлектрического эффекта в кристаллах.</p> <p>Прямой и обратный пьезоэффекты.</p> <p>Кристаллография пьезоэффекта. Связь пьезоэлектрических свойств кристаллов с упругими и диэлектрическими свойствами.</p> <p>Тензор пьезоэлектрических модулей.</p> <p>Ограничения, налагаемые симметрией на диэлектрические, пьезоэлектрические и упругие постоянные. Термодинамика пьезоэлектрических явлений в кристаллах.</p> <p>Пьезоэлектрические кристаллы как электромеханические преобразователи. Коэффициент электромеханической связи</p> | Пр  | 8 | 6 | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>Л2.2 Л2.3 |  |
| 2.3 | <p>Самостоятельная подготовка к вопросам по теме "Пьезоэлектрический эффект"</p>   | Ср  | 8 | 4 | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>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<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>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<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>Л2.2 Л2.3 |  |
| 3.3 | Самостоятельная подготовка к вопросам по теме "Экспериментальные методы исследования пьезоэлектрических кристаллов"  | Ср  | 8 | 4 | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>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). Сульфоиодид сурьмы. | Лек | 8 | 4 | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>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). Сульфид сурьмы. | Пр  | 8 | 4 | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>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<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>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<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>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<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>Л2.2 Л2.3 |  |
| 5.3 | Самостоятельная подготовка к вопросам по теме "Пьезоэлектрическая керамика"  | Ср  | 8 | 4 | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>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, звукосниматели. и др. | Лек | 8 | 4 | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>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, звукосниматели. и др. | Пр  | 8 | 4 | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>Л2.2 Л2.3 |  |
| 6.3 | Самостоятельное изучение вопросов по теме "Основные принципы пьезоэлектроники"  | Ср  | 8 | 4 | Л1.1 Л1.2<br>Л1.3 Л1.4<br>Л1.5Л2.1<br>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. Осовые 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, Пирозэлектрические, 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: <a href="https://znanium.ru/catalog/document?id=439263">https://znanium.ru/catalog/document?id=439263</a>                                 |
| Л1.2 | Захаров, Ситало, Паринов, Болдырев, Пирозэлектрический, 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: <a href="https://znanium.com/catalog/document?id=429838">https://znanium.com/catalog/document?id=429838</a> |
| Л1.3 | Кульков В. Г., Физика конденсированного состояния в электротехническом материаловедении, Санкт-Петербург: Лань, 2022, ISBN: 978-5-8114-2379-8, URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/209711">https://e.lanbook.com/book/209711</a>  |
| 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: <a href="https://e.lanbook.com/book/118468">https://e.lanbook.com/book/118468</a>   |
| Л1.5 | Фомин Д. В., Экспериментальные методы физики твердого тела, Москва, Берлин: Директ-Медиа, 2019, ISBN: 978-5-4499-0151-4, URL: <a href="https://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=575229">https://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=575229</a>  |

**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: <a href="https://znanium.com/catalog/document?id=339518">https://znanium.com/catalog/document?id=339518</a>   |
| 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: <a href="https://znanium.com/catalog/document?id=175093">https://znanium.com/catalog/document?id=175093</a>                                 |
| 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: <a href="https://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=233464">https://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=233464</a> |

**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 подвергали 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 подвергали 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 -  $45^\circ X$  - среза или  $45^\circ Y$  - среза, которые обладают большей чувствительностью в качестве приемников, если используется поперечный пьезоэффект.

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

## Оценочные материалы для проведения текущей аттестации

### Контрольные задания 1

1. Найти вид матрицы пьезомодулей для сегнетовой соли (в задачах, посвященных пьезоэффекту в сегнетовой соли, имеется в виду кристалл в сегнетоэлектрической фазе, в полидоменном состоянии).

Решение.

Для решения задачи воспользуемся методом прямой проверки. Рассмотрим сначала ось симметрии 2, совпадающую с осью  $X_3$  кристаллофизической системы координат. Ось  $2 \parallel X_3$  преобразует координатные оси следующим образом:  $X_1 \rightarrow -X_1$ ,  $X_2 \rightarrow -X_2$ ,  $X_3 \rightarrow X_3$  или, в краткой записи:  $1 \rightarrow -1$ ,  $2 \rightarrow -2$ ,  $3 \rightarrow 3$ .

Будем все модули поочередно преобразовывать согласно (6.5). Если знак модуля при этом изменится на обратный, то соответствующий модуль равен нулю, если же знак остается неизменным, то модуль остается в матрице пьезомодулей. Очевидно, сохраняются только те модули  $d_{ij}$ , которые имеют в индексах либо одну, либо три цифры 3. Поэтому

$$d_{111} = 0, d_{112} = 0, d_{113} \neq 0, d_{211} = 0, d_{212} = 0, d_{213} \neq 0, d_{123} \neq 0, d_{133} = 0, d_{222} = 0, d_{233} = 0, \\ d_{223} \neq 0, d_{331} = 0, d_{323} = 0, d_{311} \neq 0, d_{312} \neq 0, d_{122} = 0, d_{322} \neq 0, d_{333} \neq 0$$

или в матричных обозначениях:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & d_{25} & \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}.$$

Далее возьмем следующую ось 2, совпадающую с  $X_2$ . Эта ось симметрии преобразует координатные оси следующим образом:

$$X_1 \rightarrow -X_1, X_2 \rightarrow X_2, X_3 \rightarrow -X_3$$

$$1 \rightarrow -1, 2 \rightarrow 2, 3 \rightarrow -3$$

Из оставшихся восьми пьезомодулей сохраняются лишь те, которые имеют в индексах либо одну, либо три цифры 2, т. е. пьезомодули

$$d_{132} = d_{123}(d_{14}), d_{231} = d_{213}(d_{25}), d_{321} = d_{312}(d_{36}).$$

Рассматривать действие третьей оси второго порядка, совпадающей с  $X_1$ , не имеет смысла: по теореме Эйлера она является порожденным элементом симметрии и ее действие сводится к действию уже рассмотренных осей  $2 \parallel X_3$  и  $2 \parallel X_2$ .

В окончательном виде матрица пьезомодулей кристаллов класса симметрии 222 имеет вид

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$$

2. Охарактеризовать продольный пьезоэлектрический эффект в кристаллах сегнетовой соли, ответив на следующие вопросы:

- а) Каким уравнением описывается продольный пьезоэлектрический эффект пластинки произвольной ориентации?
- б) Есть ли такие направления, в которых этот эффект отсутствует?
- в) Как ориентированы относительно кристаллофизических осей пластинки, обладающие максимальным продольным пьезоэлектрическим эффектом?

Решение.

- а) Рассмотрим пластинку с нормалью  $\mathbf{n}(n_1, n_2, n_3)$ , произвольно ориентированную относительно кристаллофизических осей, и растянем (или сожмем) пластинку вдоль направления ее нормали. Чтобы найти величину продольного пьезоэлектрического эффекта, т. е. плотность зарядов,

возникающих на поверхности пластинки, перпендикулярной направлению растяжения, воспользуемся уравнением прямого пьезоэлектрического эффекта (6.1). При этом тензор пьезомодулей и тензор напряжений должны быть выражены в одной и той же координатной системе. Можно связать систему координат с направлением растяжения (сжатия) — в этой системе тензор напряжений будет иметь самый простой вид, но отличными от нуля могут быть все 18 компонент матрицы пьезомодулей. Поэтому нет смысла связывать систему координат с этим направлением. Проведем решение в кристаллофизической системе координат, в которой матрица пьезомодулей задается и имеет наиболее простой вид. Одноосное растяжение (сжатие) в произвольном направлении  $\mathbf{n}(n_1, n_2, n_3)$  представляется в кристаллофизической системе координат тензором, компоненты которого находятся из соотношения  $t_{jk} = tn_j n_k$ ; отсюда

$$\begin{bmatrix} t_{11} \\ t_{22} \\ t_{33} \\ t_{12} \\ t_{13} \\ t_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1^2 & n_1 n_2 & n_1 n_3 \\ n_1 n_2 & n_2^2 & n_3 n_2 \\ n_1 n_3 & n_2 n_3 & n_3^2 \end{bmatrix} t .$$

Продольный пьезоэлектрический эффект определяется компонентой поляризации, параллельной направлению растяжения (сжатия), т. е.

$$P_{||} = P_i n_i .$$

Учитывая, что  $P_i = d_{ijk} t_{jk}$ , получаем  $P_{||} = d_{ijk} t_{jk} n_i n_k$ .

Для сегнетовой соли отличными от нуля являются пьезомодули

$$d_{14} = 2d_{123}, \quad d_{25} = 2d_{231}, \quad d_{36} = 2d_{321}$$

В соответствии с этим продольный пьезоэлектрический эффект пластинки сегнетовой соли, ориентация которой задается направлением ее нормали  $\mathbf{n}$ , относительно кристаллофизической системы координат описывается уравнением

$$P_{||} = n_1 n_2 n_3 (2d_{123} + 2d_{231} + 2d_{321}) t = n_1 n_2 n_3 (d_{14} + d_{25} + d_{36}) t$$

б) Исходя из выражения для  $P_{||}$ , можно заключить, что для всех направлений, лежащих в координатных плоскостях, продольного пьезоэффекта нет.

в) Максимальным продольным пьезоэлектрическим эффектом обладают кристаллические пластинки, нормаль к которым составляет равные углы с кристаллофизическими осями. Такие пластинки широко применяются для практических целей.

## Контрольные задания 2

1. Как следует направить ребра пластинки Z-среза ADP, чтобы она поляризовалась при действии на нее только нормальных напряжений, приложенных в направлениях, параллельных ее ребрам?

Решение.

Из вида матрицы пьезомодулей класса симметрии  $\bar{4}2m$  следует, что пластинка Z-среза будет поляризована ( $P_3 \neq 0$ ) только в том случае, если ее напряженное состояние описывается тензором

$$\begin{bmatrix} 0 & t_6 & 0 \\ t_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Приведем указанный тензор напряжений к главным осям  $X'_1, X'_2, X'_3$  и найдем ориентацию главных осей относительно исходных. Искомые направления ребер пластинки Z-среза и будут являться направлениями главных осей тензора напряжений.

Приведение заданного тензора к главным осям осуществляется поворотом исходных осей тензора вокруг оси  $X_3$  на  $45^\circ$  по часовой стрелке. При этом тензор напряжений принимает вид

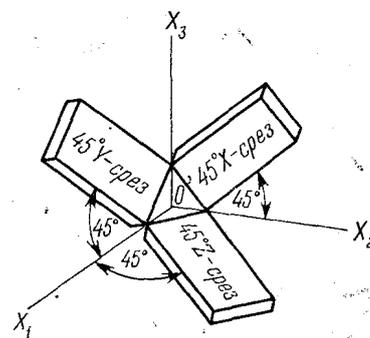


Рис. 6.3.  $45^\circ X$ -,  $45^\circ Y$ - и  $45^\circ Z$ -срезы.

$$\begin{bmatrix} -t & 0 & 0 \\ 0 & t & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Следовательно, чтобы кристаллическая пластинка Z-среза ADP поляризовалась при действии на нее нормальных напряжений, ее следует вырезать так, как это показано на рис. 6.3. Такие пластинки называются 45°Z-срезами.

2. Для определения пьезомодулей поляризованной керамики титаната бария из нее изготовили образец в виде куба и подействовали 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? Решение.

Поскольку ось  $X_3$  кристаллофизической системы координат керамики совпадает с направлением поляризации, то ее напряженное состояние будет описываться тензором

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -t_{33} \end{bmatrix}.$$

Гидростатическое сжатие задается тензором вида

$$\begin{bmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{bmatrix},$$

следовательно,  $t_1 = t_2 = t_3 = -p$ . И одноосное сжатие в указанном направлении, и гидростатическое сжатие вызывают поляризацию керамики в направлении ее полярной оси; в первом случае  $P_3 = d_{33}(-t_3)$ , во втором  $P_3 = (2d_{31} + d_{33})(-p)$ .

Таким образом, по результатам экспериментов могут быть определены два из трех независимых пьезомодулей керамики титаната бария  $d_{31}$  и  $d_{33}$ .

**3.** Пьезоэлектрический приемник звука состоит из мембраны, на внутренней которой набирается столбик из тонких кристаллических пластинок. Между пластинками прокладываются электроды из тонкой металлической фольги (рис. 6.4). Какие из пластинок сегнетовой соли —  $45^\circ$  X-среза или  $45^\circ$  Y-среза — обладают большей чувствительностью в качестве приемников?

Решение.

Чувствительность приемника может быть определена как отношение электрического напряжения, возникшего под действием данного механического напряжения (давления звуковой волны), к величине этого механического напряжения, т. е. как  $V/t$ .

Звуковые колебания, воздействующие на пластинки сегнетовой соли, имеют частоты, значительно меньшие резонансных частот, поэтому в данном случае можно воспользоваться уравнением (6.10)

$$E_i = -g_{ij}t_j,$$

которое для пластинки  $45^\circ$ X-среза запишется в виде

$$E_1 = -g_1t_1$$

где  $t_1$  — механическое напряжение, действующее по направлению длины пластинки, проходящей под углом  $45^\circ$  к кристаллофизическим осям  $X_2$  и  $X_3$  (см. рис. 6.3);  $g_1$  — эффективный пьезоэлектрический коэффициент, ответственный за возбуждение пластинки  $45^\circ$ X-среза. Он может быть

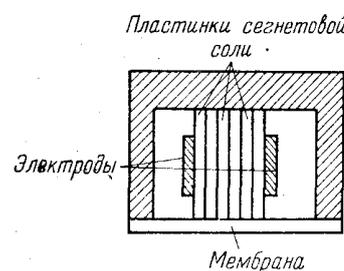


Рис. 6.4. Схема устройства пьезоэлектрического приемника звука.

вычислен из соотношения  $g_l = l_i l_j l_k g_{ijk}$ , где  $g_{ijk}$  — пьезоэлектрические коэффициенты сегнетовой соли, а  $l_i$  — направляющие косинусы длины пластинки относительно кристаллофизических осей.

Величина напряженности электрического поля, возбужденного механическим напряжением  $t$ , равна

$$E_l = V/d = -g_l t_l = 31,5 \cdot 10^{-8} \cdot t_l \text{ ед. СГСЭ},$$

где  $t_l$  — давление в дин/см<sup>2</sup>,  $d$  — толщина пластинки в см,  $V$  — электрическое напряжение, возникающее между рабочими гранями пластинки сегнетовой соли 45°X-среза в ед. СГСЭ. Отсюда

$$V = -dg_l t_l = dg_l t_l$$

В этом случае чувствительность приемника, определяемая отношением  $V/t_l$ , равна  $dg_l$ . Следовательно, чувствительность пропорциональна пьезоэлектрическому коэффициенту  $g_l$ . Если мембрана состоит из  $n$  последовательно соединенных пластин-приемников, то ее чувствительность будет в  $n$  раз больше.

Пьезоэлектрические коэффициенты  $g_l$  для 45°X- и 45°Y-срезов соответственно равны

$$g_l = 1/2 g_{14} = 3,15 \cdot 10^{-7} \text{ ед. СГСЭ}, \quad g_l = 1/2 g_{25} = -9,5 \cdot 10^{-7} \text{ ед. СГСЭ},$$

откуда следует, что  $g_l$  для 45°X-среза втрое меньше, чем для 45°Y-среза. Поэтому пластинка 45°Y-среза при том же давлении будет возбуждать электрическое напряжение в разомкнутой цепи примерно втрое большее, чем пластинка 45°X-среза, а следовательно, чувствительность пластинок 45°Y-среза втрое больше, чем чувствительность пластинок 45°X-среза сегнетовой соли. Пластины 45°Y-среза употребляются как в приемниках звука, так и в качестве датчиков гидростатических давлений.