

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич  
Должность: врио ректора  
Дата подписания: 10.08.2023 16:35:08  
Уникальный программный ключ:  
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Утверждаю:

Руководитель ООП

Б.Б.Педько

«28»

июня

2022 г.



Рабочая программа дисциплины (с аннотацией)

**Физика пьезоэлектриков и пирозлектриков**

Направление подготовки

03.03.03 Радиофизика

профиль

Физика и технология материалов и устройств радиоэлектроники

Для студентов

4 курса, очной формы обучения

Составитель: к.ф.-м.н., доцент Педько Б.Б.

Тверь, 2022

## **I. Аннотация**

### **1. Цель и задачи дисциплины**

**Целью** дисциплины является формирование у студентов профессиональных знаний по физике пьезоэлектриков для понимания и постановки научной задачи, по технологиям расчета, изготовления монокристаллических и пьезокерамических материалов и их использованию в современной промышленности. Решения и обсуждения полученных результатов с учетом последних достижений мировой науки по данному направлению.

**Задачами** освоения дисциплины является формирование профессиональных компетенций:

Осуществляет сбор, обработку, анализ и обобщение передового отечественного и международного опыта в соответствующей области исследований.

Применяет методы анализа научно-технической информации.

### **2. Место дисциплины в структуре ООП**

Дисциплина «Физика пьезоэлектриков и пьезоэлектриков» изучается в модуле «Физика и технология материалов радиоэлектроники» Блока 1. Дисциплины части учебного плана, формируемой участниками образовательных отношений.

В рамках этих направлений дисциплина предполагает изучение физических свойств линейных и нелинейных диэлектриков, пьезоэлектриков, в том числе, и направлена на изучение физических свойств, применений и технологии пьезоэлектрических материалов, а также методов их исследований. Учебная дисциплина непосредственно связана с дисциплинами «Современные проблемы ФКСВ», «Физическая кристаллография», «Кристаллография», «Физические свойства сегнетоэлектриков», «Физика диэлектриков», «Экспериментальные и теоретические методы в физике конденсированного состояния», «Преобразователи физических величин», «Основы физического материаловедения», «Материаловедение электронной техники», «Основы физического материаловедения», «Физика нелинейных кристаллов».

Уровень начальной подготовки обучающегося для успешного освоения дисциплины «Физика пьезоэлектриков»: иметь представление об основных законах электродинамики; знать применения этих законов для решения практических задач, знать основные законы и явления, лежащие в основе физики диэлектриков, знать основе векторной алгебры и тензорного исчисления.

**3. Объем дисциплины:** 4 зачетные единицы, 144 академических часа, в том числе:

**контактная аудиторная работа:** лекции 28 часов, практические занятия 28 часов;

**контактная внеаудиторная работа:** 10 часов, в том числе курсовая работа 10 часов.

**самостоятельная работа:** 78 часов, в том числе контроль 27 часов.

**4. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы**

Планируемые результаты освоения образовательной программы (формируемые компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач.	УК-1.1. Анализирует задачу, выделяя ее базовые составляющие. УК-1.2. Определяет, интерпретирует и ранжирует информацию, требуемую для решения поставленной задачи. УК-1.3. Осуществляет поиск информации для решения поставленной задачи по различным типам запросов. УК-1.5. Рассматривает и предлагает возможные варианты решения поставленной задачи, оценивая их достоинства и недостатки.
ПК-4. Способен проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки по отдельным разделам темы.	ПК-4.1. Осуществляет сбор, обработку, анализ и обобщение передового отечественного и международного опыта в соответствующей области исследований. ПК-4.2. Применяет методы анализа научно-технической информации.

## 5. Форма промежуточной аттестации и семестр прохождения

Экзамен в 6 семестре.

**6. Язык преподавания:** русский.

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

### 1. Для студентов очной формы обучения

Учебная программа – наименование разделов и тем	Всего (час.)	Контактная работа (час.)				Самостоя тельная работа, в том числе Контроль (час.)
		Лекции	Практическ ие занятия	Контроль самостояте льной работы (в том числе курсовая работа)		
		всего	в т.ч. ПП	всего	в т.ч. ПП	
<u>Введение.</u> Природа пьезоэлектрического эффекта. Исторический обзор. Практическое использование пьезоэлектрического эффекта. Наиболее важные пьезоэлектрические кристаллы и их материалы. Электрострикционный эффект.						
<u>Глава 1.</u> 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						

<p>симметрией на диэлектрические, пьезоэлектрические и упругие постоянные. Термодинамика пьезоэлектрических явлений в кристаллах. Пьезоэлектрические кристаллы как электрохимические преобразователи. Коэффициент электрохимической связи.</p>							
<p><u>Глава 2.</u> Экспериментальные методы исследования пьезоэлектрических кристаллов. 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.</p>							
<p><u>Глава 3.</u> Важнейшие пьезоэлектрические кристаллы, их свойства и применение. Кварц. Физические свойства кварца. Различные типы колебаний, возбуждаемых в кварцевых пластинах. Кварцевые генераторы. Применения пьезокварца в ультраакустике. Пьезоэлектрические свойства и применение пьезоэлектрических кристаллов. Сегнетова соль. Титанат бария. Дигидрофосфат калия (КДП), Триглицинсульфат (ТГС). Сульфоидид сурьмы.</p>							

Глава 4. Пьезоэлектрическая керамика. 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.							
Глава 5. Основные принципы пьезоэлектроники. Применение пьезоэффекта. Принципы построения пьезоэлектронных устройств. Основные пьезоэлектронные приборы и устройства. Акустические преобразователи. Пьезокерамические датчики. Гидроакустические излучатели, приемники, фильтры, звукосниматели. и др.							
Глава 6 пьезоэлектрики							
экзамен	27						27
ИТОГО	144	28		28		10	78

### III. Образовательные технологии

Учебная программа- наименование разделов и тем	Вид занятия	Образовательные технологии
<u>Введение.</u> Природа пьезоэлектрического эффекта. Исторический обзор. Практическое использование пьезоэлектрического эффекта. Наиболее важные пьезоэлектрические кристаллы и их материалы. Электрострикционный эффект.	<i>Лекции, практические занятия</i>	<i>Активное слушание. Групповое решение задач. Самостоятельная работа студентов Традиционные лекции</i>
<u>Глава 1.</u> Основные физические характеристики и соотношения пьезоэлектрического эффекта в кристаллах.	<i>Лекции, практические занятия</i>	<i>Активное слушание. Групповое решение задач. Самостоятельная работа студентов</i>

<p>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.</p>		<p><i>Традиционные лекции</i></p>
<p><u>Глава 2.</u> Экспериментальные методы исследования пьезоэлектрических кристаллов. 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.</p>	<p><i>Лекции, практические занятия</i></p>	<p><i>Активное слушание. Групповое решение задач. Самостоятельная работа студентов Традиционные лекции</i></p>
<p><u>Глава 3.</u> Важнейшие пьезоэлектрические кристаллы, их свойства и применение. 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). Сульфид сурьмы.</p>	<p><i>Лекции, практические занятия</i></p>	<p><i>Активное слушание. Групповое решение задач. Самостоятельная работа студентов Традиционные лекции</i></p>
<p>Глава 4. Пьезоэлектрическая керамика. Основы технологии производства пьезокерамики. Изготовление</p>	<p><i>Лекции, практические занятия</i></p>	<p><i>Активное слушание. Групповое решение задач. Самостоятельная работа студентов</i></p>

пьезокерамики. Пьезоэлектрический эффект в керамике. Уравнения пьезоэффекта в керамике. Экспериментальные методы пьезо-электрических измерений в керамике. Важнейшие представители пьезокерамики. Титанаты. Цирконаты. Твердые растворы.		<i>Традиционные лекции</i>
Глава 5. Основные принципы пьезоэлектроники. Применение пьезоэффекта. Принципы построения пьезоэлектронных устройств. Основные пьезоэлектронные приборы и устройства. Акустические преобразователи. Пьезокерамические датчики. Гидроакустические излучатели, приемники, фильтры, звукоосниматели. и др.	<i>Лекции, практические занятия</i>	<i>Активное слушание. Групповое решение задач. Самостоятельная работа студентов Традиционные лекции</i>
Глава 6 пьезоэлектрики	<i>Лекции, практические занятия</i>	<i>Активное слушание. Групповое решение задач. Самостоятельная работа студентов Традиционные лекции</i>

#### **IV. Оценочные материалы для проведения текущей и промежуточной аттестации**

**Форма проведения экзамена:** студенты, освоившие программу курса, могут получить оценку 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 экзамен сдается согласно «Положению о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) обучающихся по программам высшего образования ТвГУ» (протокол №11 от 28 апреля 2021 г.)

**Для проведения текущей и промежуточной аттестации:**

**УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач:**

УК-1.1. Анализирует задачу, выделяя ее базовые составляющие.

УК-1.2. Определяет, интерпретирует и ранжирует информацию, требуемую для решения поставленной задачи.

УК-1.3. Осуществляет поиск информации для решения поставленной задачи по различным типам запросов.

УК-1.5. Рассматривает и предлагает возможные варианты решения поставленной задачи, оценивая их достоинства и недостатки.

**Задание:**

Ответ на вопрос: Описать работу пьезоэлектрических кристаллов как электромеханических преобразователей.

**Способ аттестации:** устный

**Критерии оценки:**

1. Не знает основные практические применения конкретных физических свойств пьезоэлектриков.

2. Знает применения лишь отдельных физических свойств пьезоэлектриков.

3. Удовлетворительно знает основные применения физических свойств пьезоэлектриков, допускает ошибки.

4. Хорошо знает основные применения физических свойств пьезоэлектриков, испытывает затруднения в выборе способов управления ими в ходе эксперимента.

5. Знает особенности практических применений конкретных физических свойств пьезоэлектриков, способы управления ими в ходе эксперимента.

**ПК-4. Способен проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки по отдельным разделам темы:**

ПК-4.1. Осуществляет сбор, обработку, анализ и обобщение передового отечественного и международного опыта в соответствующей области исследований.

ПК-4.2. Применяет методы анализа научно-технической информации.

**Задание:**

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).

2. 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?

**Способ аттестации:** письменный

**Критерии оценки:**

1. Не знает основные практические применения конкретных физических свойств пьезоэлектриков.
2. Знает применения лишь отдельных физических свойств пьезоэлектриков.
3. Удовлетворительно знает основные применения физических свойств пьезоэлектриков, допускает ошибки.
4. Хорошо знает основные применения физических свойств пьезоэлектриков, испытывает затруднения в выборе способов управления ими в ходе эксперимента.
5. Знает особенности практических применений конкретных физических свойств пьезоэлектриков, способы управления ими в ходе эксперимента.

*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 билета для окончательной 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?

## **V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### 1) Рекомендуемая литература

#### а) Основная литература:

1. Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов / В.А. Головнин, И.А. Каплунов, О.В. Малышкина и др. - М.: Техносфера, 2013. - 272 с. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=233464>
2. Головнин В.А., Каплунов И.А., Малышкина О.В., Педько Б.Б., Мовчикова А.А. Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов. М.: Техносфера, 2013, 271 с. <http://mega.lib.tversu.ru/MegaPro/Web/SearchResult/MarcFormat/3731826>
3. В.А.Головнин, И.А. Каплунов, Б.Б. Педько , О.В.Малышкина , А.А.Мовчикова. Материаловедение электронной техники. Технологии наноматериалов. Учебное пособие. Тверь, ТвГУ, 2011, 100 с. [http://texts.lib.tversu.ru/texts/materialovedenie\\_elektronnoy\\_tehniki\\_tehnologii\\_nanomaterialov/Start.html](http://texts.lib.tversu.ru/texts/materialovedenie_elektronnoy_tehniki_tehnologii_nanomaterialov/Start.html)

#### б) Дополнительная литература:

1. Головнин В. А., Каплунов И. А., Педько Б. Б. , Малышкина О. В. , Мовчикова А. А.. Материаловедение электронной техники. Технологии наноматериалов. Учебное пособие. Тверь, ТвГУ, 2011, 100 с. [http://texts.lib.tversu.ru/texts/materialovedenie\\_elektronnoy\\_tehniki\\_tehnologii\\_nanomaterialov/Start.html](http://texts.lib.tversu.ru/texts/materialovedenie_elektronnoy_tehniki_tehnologii_nanomaterialov/Start.html)

### 2) Программное обеспечение

- а) Лицензионное программное обеспечение
- б) Свободно распространяемое программное обеспечение
- 3) Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1. ЭБС «ZNANIUM.COM» [www.znanium.com](http://www.znanium.com);

2. ЭБС «Университетская библиотека онлайн» <https://biblioclub.ru/>;

3. ЭБС «Лань» <http://e.lanbook.com>

4) Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

## **VI. Методические материалы для обучающихся по освоению дисциплины**

1) Планы практических занятий и методические рекомендации к ним:

Планы практических (лабораторных) занятий приведены в учебно-методических разработках по выполнению конкретных задач.

2) Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов при решении поставленных задач:

- подготовка к контрольным работам и зачету проводится:

- по вопросам для рубежного контроля (см. раздел «Требования к рейтинг-контролю»);
- по контрольным вопросам (раздел «Планы и методические указания»).

Контрольные вопросы (знать)

1. Пьезоэлектрический эффект (введение).
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.

Контрольные задания (уметь)

1. Найти вид матрицы пьезомодулей для сегнетовой соли (в задачах, посвященных шьезоэффекту 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

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

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  $n(n_1, n_2, n_3)$ , 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  $n(n_1, n_2, n_3)$  представляется в кристаллофизической системе координат тензором, компоненты которого находятся из соотношения  $t_{jk} = tn_j n_k$ ; отсюда

$$[t_{jk}] = \begin{bmatrix} n_1^2 & n_1 n_2 & n_1 n_3 \\ n_1 n_2 & n_2^2 & n_3 n_2 \\ n_1 n_3 & n_2 n_3 & n_3^2 \end{bmatrix} t.$$

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

$$P_{\parallel} = P_i n_i.$$

Учитывая, что  $P_i = d_{ijk} t_{jk}$ , получаем  $P_{\parallel} = d_{ijk} t n_i n_j n_k$ .

Для сегнетовой соли отличными от нуля являются пьезомодули

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

$$d_{36} = 2d_{321}$$

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

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

б) Исходя из выражения для  $P_{\parallel}$ , 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 (владеть)

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

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

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  $45^\circ$ Z-срезами.

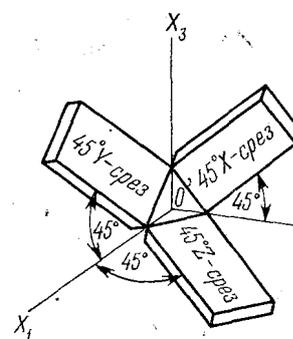


Рис. 6.3.  $45^\circ$ X-,  $45^\circ$ Y- и  $45^\circ$ Z-срезы.

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)

$$E_i = -g_{ii}t_i,$$

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

$$E_l = -g_l t_l$$

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

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

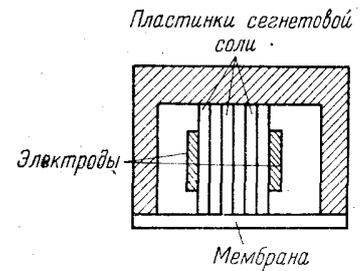


Рис. 6.4. Схема устройства пьезоэлектрического приемника звука.

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

## VII. Материально-техническое обеспечение

<p>Кафедра общей физики. Лаборатория методики преподавания физики. Кабинет качества преподавания физики. №219 (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)</p>	<p>1 Внешний жесткий диск Transcend 1 Gb 2 Компьютер Kraftway Credo KC36Vista Business/E7400/2*10024Mb DDR800/T160G/DVDRW/500W/CARE 3/Монитор 20'' LG W2043S-PFpf 3 Сумка Continent 6 Принтер лазерный HP LJ 1100 C4224A 4 МФУ XEROX PH 3100 5 Сканер UMAX Astra 3450 600*1200dpi, 42bit встроенный слайд-проектор 6 Ноутбук Dell Ispiron 1300 (1.7 GHz) 15.4WXGA. 512MB. 80GB 7 Принтер лазерный CANON LBP-2900 A4.600*600 8 Ксерокс 1215 9 Мультимедийный проектор EPSON EB-X05 10 АРМС для исследования и демонстрации опытов по дифракции с</p>	<p>Microsoft Windows 10 Enterprise. MS Office 365 pro plus - Kaspersky Endpoint Security для Windows - Архиватор 7-Zip - бесплатно Acrobat Reader DC - бесплатно Google Chrome – бесплатно Unreal Commander - бесплатно Почта Outlook - бесплатно</p>
---	---	---

	ПЭВМ (монитор Samsung TFT 22) 11 Интерактивная доска Smart Board 660 12 Компьютер iRU Corp 510 – 6 шт. 13 Комплект компьютерных датчиков 14 Универсальный измерительный прибор ADM2 15 Демонстрационный набор по электричеству и магнетизму. Часть 1 16 Демонстрационный набор по электричеству и магнетизму. Часть 2 17 Демонстрационный набор по оптике 18 Демонстрационный набор по механике 19 Доска для проведения демонстрационных работ – 2 шт. 20 Интерактивный комплект Oculus Development Kit 2 21 Источник питания постоянного тока и напряжения большой мощности 22 Комплект Monster Kit v 1.0 23 ИБП	
--	--	--

### **VIII. Сведения об обновлении рабочей программы дисциплины**

№ п.п.	Обновленный раздел рабочей программы дисциплины	Описание внесенных изменений	Реквизиты документа, утвердившего изменения
1.			
2.			