

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич  
Должность: врио ректора  
Дата подписания: 23.09.2022 15:38:07  
Уникальный программный ключ:  
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

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

Утверждаю:

Руководитель ООП

  
О.Н. Медведева

«28» \_\_\_\_\_ июня \_\_\_\_\_ 2022 г.



Рабочая программа дисциплины (с аннотацией)

**Нелинейные материалы в природе и технике**

Направление подготовки

27.03.05 Инноватика

профиль

Управление инновациями (по отраслям и сферам экономики)

Для студентов

3 курса, очной формы обучения

Составитель: к.ф.-м.н., доцент Кислова И.Л.



Тверь, 2022

## **I. Аннотация**

### **1. Цель и задачи дисциплины**

*Целью* дисциплины является формирование у студентов представления о материалах с нелинейными физическими характеристиками и их использовании в науке и технике.

*Задачами* освоения дисциплины являются:

- умение применить на практике профессиональные знания о нелинейных материалах в плане постановки научной задачи, её решения и обсуждения полученных результатов с учетом последних достижений науки;
- способность ставить задачи научных исследований в области физики нелинейных материалов и решать их с использованием современного экспериментального оборудования;
- развитие навыков свободного владения основными законами и явлениями физики нелинейных материалов для решения инновационных задач;
- формирование представления о проведении поиска технических прикладных задач для инновационного развития основных результатов научных исследований в области физики нелинейных материалов.

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

Дисциплина «Нелинейные материалы в природе и технике» изучается в модуле Элективные дисциплины 2 Блока 1. Дисциплины части учебного плана, формируемой участниками образовательных отношений.

Содержательно она закладывает основы знаний для освоения учебной и производственной практик, в процессе которых изучается и осваивается технология использования пьезоэлектрических, пироэлектрических, электрооптических свойств нелинейных диэлектриков. Учебная дисциплина непосредственно связана с дисциплинами «Технологии и материаловедение (функциональные материалы)», и «Технологии и материаловедение (полимеры - наноразмерные структуры)».

Для освоение дисциплины нужны знания дисциплин «Электричество и магнетизм», «Механика», «Основы физического материаловедения».

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

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

**самостоятельная работа:** 88 часов, в том числе контроль 27 часов.

**4. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные спланируемыми 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-1.5. Рассматривает и предлагает возможные варианты решения поставленной задачи, оценивая их достоинства и недостатки.
ПК-1. Способен выполнять анализ результатов технологических исследований продуктов.	ПК-1.1. Осуществляет постановку задачи ПК-1.3. Анализирует результаты технологических исследований.

**5. Форма промежуточной аттестации и семестр прохождения**

Экзамен в 6 семестре.

**6. Язык преподавания:** русский.

**II. Содержание дисциплины (или модуля), 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.)		Самостоятельная работа (час.)
		Лекции	Практические занятия	
<p><b>1. Сегнетоэлектрики – нелинейные диэлектрики.</b> Поляризация диэлектриков. Основные характеристики сегнетоэлектриков. Классификация сегнетоэлектриков. Процессы переключения поляризации. Диэлектрический гистерезис. Фазовые переходы в сегнетоэлектриках. Примеры сегнетоэлектрических материалов, используемых для научных исследований и технических приложений (монокристаллы, керамика, пленки).</p>	<b>42</b>	4	2	36
<p><b>2. Теории сегнетоэлектричества.</b> Термодинамические функции и фазовые переходы в кристаллах. Теория фазовых переходов II рода (Теория Ландау). Термодинамическая теория для одноосных сегнетоэлектриков. Закон Кюри-Вейсса. Термодинамическая теория сегнетоэлектрических фазовых переходов I рода. Сегнетоэлектрические фазовые переходы и симметрия кристаллов. Микроскопические теории сегнетоэлектричества (модель ангармонических осцилляторов, модель типа порядок-беспорядок).</p>	<b>68</b>	6	8	54
<p><b>3. Доменная структура и процессы реполяризации сегнетоэлектриков.</b> Причины образования доменной структуры сегнетоэлектриков. Доменные стенки. Методы наблюдения и исследования доменной структуры сегнетоэлектриков. Реальная доменная структура некоторых сегнетоэлектриков. Доменная структура и процессы реполяризации сегнетоэлектриков. Использование эффектов переключения поляризации для создания элементов энергонезависимой памяти FeRAM (два типа структур – конденсаторная и транзисторная)</p>	<b>46</b>	4	4	38
<p><b>4. Тепловые и упругие свойства нелинейных материалов.</b> Теплоемкость сегнетоэлектриков. Теплопроводность нелинейных диэлектриков. Аномалии тепловых свойств при фазовых переходах. Поглощение ультразвука и внутреннее трение в сегнетоэлектриках.</p>	<b>26</b>	2	2	22

<b>5. Пьезоэлектрические свойства нелинейных диэлектриков.</b> Пьезоэлектрический эффект: основные понятия и соотношения. Электромеханические свойства сегнетоэлектриков, не обладающих пьезоэффектом в параэлектрической фазе. Электромеханические свойства сегнетоэлектриков с пьезоэффектом в параэлектрической фазе. Методы изучения пьезоэлектрической активности. Пьезоэлектрические материалы и их основные свойства. Применение пьезоэлектриков в технике и электронике.	<b>48</b>	6	4	38
<b>6. Пироэлектрический и электрокалорический эффекты.</b> Линейные пироэлектрики и сегнетоэлектрики. Пироэлектрический эффект: основные понятия и соотношения. Методы исследования пироэлектрических свойств. Практически значимые пироэлектрические материалы и их основные параметры. Применение пироэффекта в системах регистрации и преобразования теплового излучения. Электрокалорический эффект: основные понятия и соотношения. Применение электрокалорического эффекта в системах охлаждения.	<b>50</b>	4	6	40
<b>7. Электрооптические свойства нелинейных диэлектриков.</b> Линейный и квадратичный электрооптические эффекты. Спонтанный и индуцированный электрическим полем электрооптический эффект в сегнетоэлектриках. Нелинейные оптические эффекты. Генерация второй гармоники. Сегнетоэлектрические кристаллы – материалы нелинейной оптики. Примеры практического использования сегнетоэлектриков в нелинейной оптике.	<b>44</b>	4	4	36
<b>ИТОГО</b>	<b>324</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>264</b>

### **III. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

- планы практических занятий и методические рекомендации к ним;
- тематика рефератов и методические рекомендации по их написанию;
- методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов;
- мультимедийные презентации.

### **IV. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине**

Наряду с другими дисциплинами учебного плана дисциплина «Нелинейные материалы в природе и технике» участвует в формировании общепрофессиональной компетенции ОПК-7 «Способность применять знания математики, физики и естествознания, химии и материаловедения, теории управления и информационные технологии в инновационной деятельности» и профессиональной компетенции ПК-10 «Способность спланировать необходимый эксперимент, получить адекватную модель и исследовать ее».

Экзамен предполагает устный ответ на вопросы экзаменационного билета и выполнение задания. Экзаменационный билет содержит два вопроса и задание из перечня тем,

вопросов и заданий, приведенных ниже, для проверки знаний, умений, владений в рамках поставленных вопросов и заданий. Время на подготовку в аудитории составляет 45 минут. Обсуждение в ходе подготовки не допускается, каждый студент готовится индивидуально. При подготовке и ответе студенты могут использовать литературные источники, которые приносит на экзамен преподаватель.

**Форма проведения промежуточного контроля:** 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.)

**1. Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности общепрофессиональной компетенции ОПК-7 «Способность применять знания математики, физики и естествознания, химии и материаловедения, теории управления и информационные технологии в инновационной деятельности»**

Этап формирования компетенции, в котором участвует дисциплина	Типовые контрольные задания для оценки знаний, умений, навыков	Показатели и критерии оценивания компетенции, шкала оценивания	
<b>заключительный</b> <b>Владеть:</b> – способностью приобретать и применять новые знания в области физики нелинейных материалов для использования в инновационной деятельности. <b>Уметь:</b> – находить информацию о физических свойствах нелинейных материалов в глобальной сети интернет; – выявлять закономерности физических эффектов в нелинейных диэлектриках; – теоретически объяснять	<b>Задание для проверки сформированности владений:</b> Владея информацией о процессах переполяризации в сегнетоэлектриках, дать оценку использования этого эффекта в устройствах энергонезависимой памяти (FeRAM) и сравнить эффективность работы FeRAM с другими устройствами памяти.	<b>Второй уровень (2 балла по каждому критерию)</b>	<b>Первый уровень (1 балл по каждому критерию)</b>
		Основывает оценку на сопоставлении основных принципов работы различных устройств энергонезависимой памяти, уверенно опирается на литературные данные.	Основывает оценку на отрывочных знаниях о физических принципах работы устройств энергонезависимой памяти и на рассуждениях общего характера
При оценке параметров энергонезависимой памяти FeRAM может описать физические эффекты, на которых основана ее работа. Знает о кинетике	При оценке параметров энергонезависимой памяти FeRAM имеет отрывочные представления о физической природе ее работы. Обсуждение вопроса не вызывает интереса. Имеет самые		

<p>рассматриваемые физические явления.</p> <p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– о сегнетоэлектриках как нелинейных материалах с особым типом упорядочения;</li> <li>– теории сегнетоэлектрических явлений;</li> <li>– о доменной структуре и методах ее наблюдения,</li> <li>– процессы переполяризации и сегнетоэлектриков.</li> </ul>		<p>процесса переполяризации и ее основных параметрах.</p>	<p>общие сведения о процессах переключения поляризации.</p>		
		<p>Характеризуя работу сегнетоэлектрической памяти FeRAM, может оценить ее преимущества и недостатки по сравнению с другими устройствами энергонезависимой памяти. Может описать механизмы деградации памяти и описать попытки решения проблемы.</p>	<p>В целом имеет представления о преимуществах и недостатках сегнетоэлектрической памяти FeRAM по сравнению с другими устройствами энергонезависимой памяти. Демонстрирует отрывочные знания о деградации энергонезависимой памяти.</p>		
		<p>Имеет представление об интеграции FeRAM с кремниевой электроникой на базе знаний о создании тонкопленочных сегнетоэлектриков. Умеет четко определить недостатки и проблемы современных технологий в этой области.</p>	<p>Частично представляет механизмы формирования тонкопленочных сегнетоэлектриков, интегрированных с кремниевой электроникой.</p>		
	<p><b>Задания для проверки сформированности умений:</b></p>	<p><b>Высокий уровень (3 балла по каждому критерию)</b></p>	<p><b>Средний уровень (2 балла по каждому критерию)</b></p>	<p><b>Низкий уровень (1 балл по каждому критерию)</b></p>	
<p>Выделить и объяснить проблемные вопросы, опираясь на научную литературу и технологические</p>	<p>Выделяет более двух проблемн</p>	<p>Выделяет не более двух проблемны</p>	<p>Выделяет один проблемный вопрос,</p>		

	<p>особенности реализации рассматриваемых процессов, в рамках обозначенной темы.</p>	<p>ых вопроса, умеет объяснить их суть, не допуская фактических ошибок.</p>	<p>х вопроса, умеет объяснить их суть, не допуская фактических ошибок. ИЛИ Выделяет более двух проблемных вопроса, но затрудняется при объяснении их сути и/или допускает фактические ошибки, не искажающие общего смысла.</p>	<p>умеет объяснить его суть, не допуская фактических ошибок. ИЛИ Выделяет более одного проблемного вопроса, но затрудняется при объяснении их сути и/или допускает фактические ошибки, не искажающие общего смысла.</p>
	<p>Сопоставить различные подходы к решению выделенных проблемных вопросов. Указать научные школы и направления, которые занимаются данными вопросами. Используя знания фактического материала привести аргументы, подтверждающие и/или опровергающие приведенные подходы. При изложении аргументов обязательно использовать аргументы, опираясь на знания математики, физики и материаловедения.</p>	<p>Свободно ориентируется в подходах к решению вопроса, знает научные школы и направления. Показывает противоположные точки зрения. Приводит более одного аргумента в подтверждение и более одного</p>	<p>Может привести два противоположных подхода, существующих в научной литературе, с указанием ее принадлежности к научной школе, направлению. Приводит один аргумент в подтверждение и один аргумент в опроверже</p>	<p>Может привести единственную точку зрения, существующую в научной литературе, с указанием ее принадлежности к научной школе, направлению. Приводит один аргумент в ее подтверждение и один аргумент в ее опровержение.</p>



		аргумента в опровержение любых из выделенных подходов.	ние любых из выделенных подходов. ИЛИ Приводит более одного аргумента только в подтверждение (только в опровержение).	ИЛИ Приводит более одного аргумента только в подтверждение (только в опровержение).
	Сделать выводы.	Делает выводы, отвечая в нем на вопросы, сформулированные в теме билета. При этом учитываются все мнения, рассмотренные для решения проблемных вопросов. Демонстрирует умение классифицировать, группировать и обобщать.	Делает выводы, отвечая на вопрос, сформулированные в теме билета. Не учитывает все мнения, рассмотренные для решения проблемных вопросов. Демонстрирует попытки классифицировать, группировать и обобщать.	Не отвечает на вопрос, сформулированный в теме билета, а лишь отдельные факты.
	<b>Задания для проверки сформированности знаний:</b>	<b>Высокий уровень (3 балла по каждому критерию)</b>	<b>Средний уровень (2 балла по каждому критерию)</b>	<b>Низкий уровень (1 балл по каждому критерию)</b>
	Знать, чем обусловлены процессы реполяризации в сегнетоэлектриках.	Знает физические	Знает основные физические	Имеет отрывочные знания об

		<p>причины процессов переполаризации, может их связать с наличием доменной структуры. Не допускает фактических ошибок.</p>	<p>причины процессов переполаризации, может качественно их связать с наличием доменной структуры. Допускает несущественные фактические ошибки, не искажающие общего смысла.</p>	<p>физические причины процессов переполаризации, не может их связать с наличием доменной структуры. И/ИЛИ Допускает существенные фактические ошибки, не искажающие общего смысла.</p>
	<p>Знать, и как эффекты переключения поляризации могут быть реализованы для создания энергонезависимых элементов памяти.</p>	<p>Правильно показывает, как эффекты переключения поляризации могут быть реализованы для создания энергонезависимых элементов памяти, правильно характеризует их роль в создании логических элементов.</p>	<p>В целом правильно показывает, как эффекты переключения поляризации могут быть реализованы для создания энергонезависимых элементов памяти, допуская незначительные ошибки. Приблизительно может охарактеризовать их роль в создании логических элементов.</p>	<p>Имеет отрывочные сведения о том, как эффекты переключения поляризации могут быть реализованы для создания энергонезависимых элементов памяти. Не может правильно охарактеризовать их роль в создании логических элементов.</p>

	Знает основные сведения о доменной структуре сегнетоэлектриков и ее роли в процессах переключения поляризации.	Знает основные сведения о доменной структуре практически важных сегнетоэлектриков и ее роли в процессах переключения поляризации. Не допускает фактических ошибок.	Знает основные сведения о доменной структуре практически важных сегнетоэлектриков и ее роли в процессах переключения поляризации. Допускает несущественные фактические ошибки, не искажающие физического смысла.	Имеет отрывочные знания о доменной структуре практически важных сегнетоэлектриков и ее роли в процессах переключения поляризации. И/ИЛИ Допускает существенные фактические ошибки, не искажающие физического смысла.
	Корректно использовать в процессе ответа на вопросы билета термины, принятые в физике сегнетоэлектрических явлений.	Корректно использует более двух терминов, может дать их определение.	Корректно использует два термина, может дать их определение.	Корректно использует один термин, может дать его определение.

**Список вопросов и заданий проверки уровня сформированности общепрофессиональной компетенции ОПК-7 «Способность применять знания математики, физики и естествознания, химии и материаловедения, теории управления и информационные технологии в инновационной деятельности»**

1. Упругие свойства сегнетоэлектриков ( из раздела самостоятельная работа).
2. Поглощение ультразвука и внутреннее трение в сегнетоэлектриках ( из раздела самостоятельная работа).
3. Тепловые свойства сегнетоэлектриков. Теплоемкость. Теплопроводность сегнетоэлектриков( из раздела самостоятельная работа).
4. Первичный пирозлектрический эффект.
5. Вторичный пирозлектрический эффект.
6. Практическое использование пирозлектрического эффекта.
7. Электрокалорический эффект.
8. . Практическое использование электрокалорического эффекта
9. . Электромеханические свойства сегнетоэлектриков, не обладающих пьезоэффектом в параэлектрической фазе.

10. Электромеханические свойства сегнетоэлектриков с пьезоэффектом в параэлектрической фазе.
11. Оптическая активность.
12. Электрооптический эффект (общие сведения).
13. Линейный и квадратичный ЭОЭ.
14. Спонтанный и индуцированный электрическим полем ЭОЭ в сегнетоэлектриках
15. Экспериментальные методы определения электрооптических коэффициентов.
16. Генерация второй гармоники.
17. Сегнетоэлектрические материалы в нелинейной оптики
18. Нелинейные оптические эффекты.
19. Несобственные сегнетоэлектрики и сегнетоэластики. Термодинамические соотношения для несобственных сегнетоэлектриков и их основные следствия.
20. Общие представления об антисегнетоэлектриках. Понятие антисегнетоэлектричества. Основные представители.
21. Сегнетоэластики - механические аналоги сегнетоэлектриков. Термодинамические соотношения для сегнетоэластиков
22. Сегнетоэлектрики с магнитным упорядочением. Элементы термодинамической теории сегнетомагнетиков. Перовскиты. Борациты.
23. Сегнетоэластические домены и их наблюдение. Процессы переключения в сегнетоэластиках.
24. Сегнетоэлектрики с размытым фазовым переходом. Причины размытия фазового перехода.
25. Кинетика перехода в сегнетоэлектриках с размытым фазовым переходом. Диэлектрическая поляризация. Основные представители и свойства.
26. Соотношение Лиддана-Сакса-Теллера.
27. Сегнетоэлектрики с несоразмерной фазой. Причины образования несоразмерной фазы с точки зрения динамики решетки.

**2. Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности профессиональной компетенции ПК-10 «Способность спланировать необходимый эксперимент, получить адекватную модель и исследовать ее»**

Этап формирования компетенции, в котором участвует дисциплина	Типовые контрольные задания для оценки знаний, умений, навыков	Показатели и критерии оценивания компетенции, шкала оценивания	
<b>заключительный</b> <b>Владеть:</b> – методиками проведения современного физического эксперимента в области физики нелинейных материалов с использованием новейших достижений физического	<i>Задание для проверки сформированности владений:</i> Продемонстрировать владения методами исследования процессов переключения в сегнетоэлектрических материалах (метод Сойлера-Тауэра, метод Мерца).	<i>Второй уровень (2 балла по каждому критерию)</i> Корректно использует указанные методы для изучения процессов переключения поляризации в сегнетоэлектрических материалах (метод Сойлера-Тауэра, метод	<i>Первый уровень (1 балл по каждому критерию)</i> Уверенно владеет не менее, чем одним методом исследования, процессов переключения поляризации в сегнетоэлектрических материалах. На основе проведенного

<p>приборостроения.</p> <p><b>Уметь:</b></p> <p>– использовать методики расчета электрофизических параметров нелинейных диэлектриков на основе экспериментальных данных.</p> <p>– анализировать экспериментальные данные по физическим свойствам нелинейных материалов;</p> <p>– выявлять факторы, влияющие на формирование физических свойств нелинейных материалов.</p> <p><b>Знать:</b></p> <p>пирозлектрические, электрокалорические, пьезоэлектрические, электрооптические свойства материалов, обладающих спонтанной поляризацией;</p> <p>– механизмы возникновения пьезоэлектрических свойств сегнетоэлектриков.</p>		<p>Мерца). Выбирает необходимые методы для анализа конкретных параметров процесса переполаризации. На основе проведенного анализа максимально полно характеризует переполаризационные свойства исследуемых материалов.</p>	<p>анализа частично характеризует переполаризационные свойства исследуемых материалов.</p>		
	<p><b>Задания для проверки сформированности умений:</b></p>	<p><b>Высокий уровень (3 балла по каждому критерию)</b></p>	<p><b>Средний уровень (2 балла по каждому критерию)</b></p>	<p><b>Низкий уровень (1 балл по каждому критерию)</b></p>	
	<p>Охарактеризовать возможности данных методов для расчета электрофизических параметров нелинейных диэлектриков. Указать факторы, влияющие на диэлектрические характеристики нелинейных материалов.</p>	<p>Правильно приведены методики расчета основных электрофизических параметров на основе полученных экспериментальных данных. Правильно указано все факторы.</p>	<p>В целом правильно приведены методики расчета основных электрофизических параметров на основе полученных экспериментальных данных. Допущены небольшие ошибки в указании факторов.</p>	<p>Правильно некоторые методики расчета основных электрофизических параметров на основе полученных экспериментальных данных. Правильно указан хотя бы один фактор.</p>	
	<p><b>Задания для проверки сформированности знаний:</b></p>	<p><b>Высокий уровень (3 балла по каждому критерию)</b></p>	<p><b>Средний уровень (2 балла по каждому критерию)</b></p>	<p><b>Низкий уровень (1 балл по каждому критерию)</b></p>	

	<p>Знать условия возникновения спонтанной поляризации. Знать критерии, приводящие к появлению доменной структуры. Знать типы доменных структур для практически важных сегнетоэлектриков.</p>	<p>Правильно называет и условия возникновения спонтанной поляризации, критерии, приводящие к появлению доменной структуры, описывает типы доменных структур для практически важных сегнетоэлектриков. Не допускает фактических ошибок.</p>	<p>Правильно называет и условия возникновения спонтанной поляризации. В целом правильно формулирует критерии, приводящие к появлению доменной структуры. Знает типы доменных структур для практически важных сегнетоэлектриков. Допускает несущественные фактические ошибки, не искажающие общего смысла.</p>	<p>Правильно называет и характеризует систему доменных структур для практически важных сегнетоэлектриков. Знает некоторые условия возникновения спонтанной поляризации. Допускает фактические ошибки.</p>
--	--	--	---	---

**Список заданий для проверки уровня сформированности профессиональной компетенции ПК-10 «Способность спланировать необходимый эксперимент, получить адекватную модель и исследовать ее»**

1. Термодинамические функции и фазовые переходы в кристаллах. Теория фазовых переходов II рода (Теория Ландау).
2. Термодинамическая теория для одноосных сегнетоэлектриков. Поведение сегнетоэлектрика при приложении слабого электрического поля. Закон Кюри-Вейсса. Правило «2».
3. Термодинамическая теория и диэлектрический гистерезис.
4. Термодинамическая теория сегнетоэлектрических фазовых переходов I рода. Скачок спонтанной поляризации в точке фазового перехода. Температурный гистерезис. Критическая точка (трикритическая точка Кюри).
5. Влияние электрических полей и механических напряжений на фазовые переходы в сегнетоэлектриках.
6. Термодинамическая теория фазовых переходов в многоосных сегнетоэлектриках. Сегнетоэлектрические фазовые переходы и симметрия кристаллов.

7. Ограничения, накладываемые на возможные изменения симметрии при фазовых переходах. Области применимости термодинамической теории сегнетоэлектричества.
8. Сегнетоэлектрический фазовый переход и симметрия кристалла.
9. Причины образования доменной структуры сегнетоэлектриков.
10. Доменные стенки. Методы наблюдения и исследования доменной структуры сегнетоэлектриков.
11. Реальная доменная структура некоторых сегнетоэлектриков. Доменная структура и процессы переполяризации сегнетоэлектриков.
12. Диэлектрический гистерезис. Ток переполяризации.
13. Эффект Баркгаузена в сегнетоэлектриках.
14. Диэлектрическая вязкость.

#### **V. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

##### **а) Основная литература:**

1. Головин В.А. Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов /Каплунов И. А., Малышкина О. В., Педько Б. Б., Мовчикова А. А. - М., 2013. -

Режим доступа: [//biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=233464&sr=1](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=233464&sr=1)

#### **VI. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины**

Тематический научный журнал «Ferroelectrics», где отражены основные достижения в области физики нелинейных диэлектриков

<http://www.tandfonline.com/loi/gfer20>

#### **VII. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины**

*1) Планы практических (семинарских) занятий и методические рекомендации к ним. Практические занятия включают в себя демонстрационный эксперимент по теме занятия и его обсуждение в группе.*

*Тема 1. Сегнетоэлектрики – нелинейные диэлектрики.*

##### **Вопросы для обсуждения:**

1. Поляризация диэлектриков. Основные характеристики сегнетоэлектриков.
2. Классификация сегнетоэлектриков.
3. Процессы переключения поляризации. Диэлектрический гистерезис.
4. Фазовые переходы в сегнетоэлектриках.
5. Примеры сегнетоэлектрических материалов, используемых для научных исследований и технических приложений (монокристаллы, керамика, пленки).

*Тема 2. Теории сегнетоэлектричества.*

##### **Вопросы для обсуждения:**

1. Термодинамические функции и фазовые переходы в кристаллах. Теория фазовых переходов II рода (Теория Ландау).
2. Термодинамическая теория для одноосных сегнетоэлектриков. Закон Кюри-Вейсса.
3. Термодинамическая теория сегнетоэлектрических фазовых переходов I рода.
4. Сегнетоэлектрические фазовые переходы и симметрия кристаллов.
5. Микроскопические теории сегнетоэлектричества (модель ангармонических осцилляторов, модель типа порядок-беспорядок).

*Тема 3. Доменная структура и процессы переполяризации сегнетоэлектриков.*

##### **Вопросы для обсуждения:**

1. Причины образования доменной структуры сегнетоэлектриков.
2. Доменные стенки.
3. Методы наблюдения и исследования доменной структуры сегнетоэлектриков.
4. Реальная доменная структура некоторых сегнетоэлектриков.

#### ***Тема 4. Тепловые и упругие свойства нелинейных материалов.***

##### **Вопросы для обсуждения:**

1. Теплоемкость сегнетоэлектриков.
2. Теплопроводность и температуропроводность нелинейных диэлектриков.
3. Аномалии тепловых свойств при фазовых переходах.
4. Поглощение ультразвука и внутреннее трение в сегнетоэлектриках.

#### ***Тема 5. Пьезоэлектрические свойства нелинейных диэлектриков.***

##### **Вопросы для обсуждения:**

1. Пьезоэлектрический эффект: основные понятия и соотношения.
2. Электромеханические свойства сегнетоэлектриков, не обладающих пьезоэффектом в параэлектрической фазе.
3. Электромеханические свойства сегнетоэлектриков с пьезоэффектом в параэлектрической фазе.
4. Методы изучения пьезоэлектрической активности.
5. Пьезоэлектрические материалы и их основные свойства.
6. Применение пьезоэлектриков в технике и электронике.

#### ***Тема 6. Пироэлектрический и электрокалорический эффекты.***

##### **Вопросы для обсуждения:**

1. Линейные пироэлектрики и сегнетоэлектрики. Пироэлектрический эффект: основные понятия и соотношения.
2. Методы исследования пироэлектрических свойств.
3. Практически значимые пироэлектрические материалы и их основные параметры.
4. Применение пироэффекта в системах регистрации и преобразования теплового излучения.
5. Электрокалорический эффект: основные понятия и соотношения.
6. Применение электрокалорического эффекта в системах охлаждения.

#### ***Тема 7. Электрооптические свойства нелинейных диэлектриков.***

##### **Вопросы для обсуждения:**

1. Линейный и квадратичный электрооптические эффекты.
2. Спонтанный и индуцированный электрическим полем электрооптический эффект в сегнетоэлектриках.
3. Нелинейные оптические эффекты. Генерация второй гармоники.
4. Сегнетоэлектрические кристаллы – материалы нелинейной оптики. Примеры практического использования сегнетоэлектриков в нелинейной оптике.

#### ***2) Тематика рефератов и методические рекомендации по их написанию:***

1. Поляризация диэлектриков, ее виды. Спонтанная поляризация.
2. Сегнетоэлектрические материалы, используемые для научных исследований и технических приложений (монокристаллы, керамика, пленки).
3. Фазовые переходы в сегнетоэлектриках и симметрия кристаллов.
4. Аномалии физических свойств при фазовых переходах.
5. Микроскопические теории сегнетоэлектричества (модель ангармонических осцилляторов, модель типа порядок-беспорядок).
6. Реальная доменная структура некоторых сегнетоэлектриков.



7. Пьезоэлектрические свойства сегнетоэлектриков и пьезоэлектриков, не обладающих спонтанной поляризацией.
8. Пьезоэлектрические материалы и их основные свойства.
9. Применение пьезоэлектриков в технике и электронике.
10. Пироэлектрический эффект. Практически значимые пироэлектрические материалы и их основные параметры.
11. Применение пироэффекта в системах регистрации и преобразования теплового излучения.
12. Электрокалорический эффект. Применение электрокалорического эффекта в системах охлаждения.
13. Линейный и квадратичный электрооптические эффекты.
14. Нелинейные оптические эффекты. Генерация второй гармоники.
15. Сегнетоэлектрические кристаллы – материалы нелинейной оптики. Примеры практического использования сегнетоэлектриков в нелинейной оптике.

### **3) Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов:**

Самостоятельная работа студентов предполагает:

- обязательное выполнение домашних заданий, предусмотренных практическими занятиями;
- углубленное изучение литературы и решение задач по пройденным темам и по вопросам, дополнительно указанным преподавателем;
- использование материалов рабочей программы для систематизации знаний и подготовке к занятиям и контрольным работам.

### **4) Требования к рейтинг-контролю**

Результаты промежуточной аттестации выставляются на основе текущего контроля успеваемости (рейтинг-контроль, баллы за выполненные практические задания суммируются) и по результатам экзамена.

#### ***Рейтинг***

1. Первая контрольная точка. Содержание модуля 1: Раздел 1 – 3.

30 баллов, из них 10 – текущая работа, 10 – посещаемость, 10 – контрольная работа. 7-ая неделя.

2. Вторая контрольная точка. Содержание модуля 2: Раздел 4 – 7.

30 баллов, из них 10 – текущая работа, 10 – посещаемость, 10 – контрольная работа. 14-ая неделя

Критерии: работа на практическом занятии – 5 баллов, правильный ответ на один вопрос контрольной работы – 3 балла. 10 баллов – доклад на семинаре или написанный реферат (текущая работа).

Программой предусматривается выполнение письменных контрольных работ в качестве форм рубежного контроля в конце каждого модуля. Для подготовки к рубежному контролю предполагается выполнение домашних заданий по каждой пройденной в течение модуля теме и использование банка контрольных вопросов и заданий рабочей программы.

### **VIII. Перечень педагогических и информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (по необходимости)**

1. Microsoft Office 365 pro plus
2. Microsoft Windows 10 Enterprise
3. Google Chrome

**IX. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Наименование специальных* помещений	Оснащенность специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения. Реквизиты подтверждающего документа
Учебная аудитория № 202Б (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)	1. Комплект учебной мебели на 25 посадочных мест. 2. Экран настенный 153x203 3. Переносной комплект мультимедийной техники.	Adobe Acrobat Reader DC – бесплатно Microsoft Windows 10 Enterprise - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017 Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows – Акт на передачу прав №2129 от 25 октября 2016 г. Google Chrome – бесплатно MS Office 365 pro plus - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017
Учебно-научная лаборатория физики сегнето – и пирозлектриков № 45 (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)	Монитор LG-TFT20 W2043 SE-PF Монитор LG-TFT20 W2043 SE-PF Монитор LG-TFT20 W2043 SE-PF Принтер HP LJ 1100 Сканер Musiek 1200 SP Компьютерный измерительный комплекс Cel 1.2/256Mb/Монитор Rover Scan 115GS"/плата сбора данных интегрированная LA-n150-14PCI Компьютер:Систем.комплект Arbyte Tempo В Т4D3-65(i965G/P)+монитор 17" BenQ"FP71G+"1280*1024 Микроскоп МВДС Осциллограф одноканальный PCS100А Компьютер iRU Corp 510 I5-2400/4096/500/G210-512/DVD-RW/W7S/монитор E-Machines E220HQVB 21.5" Компьютер iRU Corp 510 I5-2400/4096/500/G210-512/DVD-RW/W7S/монитор E-Machines E220HQVB 21.5" Компьютер iRU Corp 510 I5-2400/4096/500/G210-512/DVD-RW/W7S/монитор E-Machines E220HQVB 21.5" Принтер Xerox Phaser 3150 Генератор сигналов специальной	MS Office 365 pro plus – Акт предоставления прав № Tr041167 от 24.08.2016; MS Windows 10 Enterprise – Акт предоставления прав № Sk000195 от 12.07.2016 Google Chrome – бесплатное ПО; MATLAB R2012b – Акт предоставления прав № Us000311 от 25.09.2012; Mathcad 15 M010 – Акт предоставления прав ИС00000027 от 16.09.2011;

	формы ГГС-120 Измеритель иммитанса E7-20	
--	---	--

**Помещения для самостоятельной работы:**

<b>Наименование помещений</b>	<b>Оснащенность помещений для самостоятельной работы</b>	<b>Перечень лицензионного программного обеспечения. Реквизиты подтверждающего документа</b>
Помещение для самостоятельной работы, учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, практики, Компьютерный класс физико-технического факультета. Компьютерная лаборатория робототехнических систем №4а (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Компьютер RAMEC STORM C2D 4600/160Gb/ 256mB/DVD-RW +Монитор LG TFT 17" L1753S-SF – 12 шт</li> <li>2. Мультимедийный комплект учебного класса (вариант № 2) Проектор Casio XJ-M140, настенный проекц. экран Lumien 180*180. ноутбук Dell N4050. сумка 15,6", мышь</li> <li>3. Коммутатор D-Link 10/100/1000mbps 16-port DGS-1016D</li> <li>4. Видеокамера IP-FALCON EYE FE-IPC-BL200P, ОнЛайн Трейд ООО</li> <li>5. Видеокамера IP-FALCON EYE FE-IPC-BL200P, ОнЛайн Трейд ООО</li> <li>6. Демонстрационное оборудование комплект «LegoMidstormsEV3»</li> <li>7. Комплект учебной мебели</li> </ol>	<p>Adobe Acrobat Reader DC - бесплатно</p> <p>Cadence SPB/OrCAD 16.6 - Государственный контракт на поставку лицензионных программных продуктов 103 - ГК/09 от 15.06.2009</p> <p>Google Chrome - бесплатно</p> <p>Java SE Development Kit 8 Update 45 (64-bit) - бесплатно</p> <p>Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows – Акт на передачу прав №2129 от 25 октября 2016 г.</p> <p>Lazarus 1.4.0 - бесплатно</p> <p>Lego MINDSTORM EV3 - бесплатно</p> <p>Mathcad 15 M010 - Акт предоставления прав ИС00000027 от 16.09.2011</p> <p>MATLAB R2012b - Акт предоставления прав № Us000311 от 25.09.2012</p> <p>Microsoft Express Studio 4 - бесплатно</p> <p>MiKTeX 2.9 - бесплатно</p> <p>MPICH 64-bit – бесплатно</p> <p>MSXML 4.0 SP2 Parser and SDK - бесплатно</p> <p>Microsoft Windows 10 Enterprise - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017</p> <p>MS Office 365 pro plus - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017</p>

**Х. Сведения об обновлении рабочей программы дисциплины**

<b>№ п.п.</b>	<b>Обновленный раздел рабочей программы дисциплины (модуля)</b>	<b>Описание внесенных изменений</b>	<b>Дата и протокол заседания, утвердившего изменения</b>

1	Раздел IV	Скорректирован фонд оценочных средств для проверки уровня сформированности закрепленных за дисциплиной компетенций	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г
2	Раздел IV	Скорректированы задания для промежуточной аттестации в соответствии с обновленным «Положением о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) студентов ТвГУ»	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г.
3	Раздел V	Обновлен перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г
4	Раздел IX	Оснащенность аудиторного фонда для проведения учебных занятий и самостоятельной работы студентов согласно «Справки МТО ООП ...»	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г
5	Раздел I, II	Внесены изменения в объем и содержание дисциплины в связи с изменениями учебного плана ООП по направлению 03.04.03 Радиофизика	Протокол Совета ФТФ №5 от 11 декабря 2018 г
6	Раздел IV	Скорректирован фонд оценочных средств для проверки уровня сформированности закрепленных за дисциплиной компетенций	Протокол Совета ФТФ № 6 от 15.01.2019 г.
7	Раздел IV	Внесены изменения в соответствии с «Положением о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) обучающихся по программам высшего образования ТвГУ»	Протокол Совета ФТФ № 10 от 19.05.2020 г.
8	Раздел IV	Внесены изменения в соответствии с «Положением о рейтинговой системе обучения в ТвГУ»	Протокол Совета ФТФ № 10 от 19.05.2020 г.
9	Титульный лист	Внесены изменения на титульном листе: ФИО руководителя ООП	Приказ 1382-О от 01.10.2021 «О назначении руководителей образовательных программ»