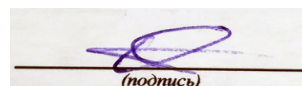


**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова**

Кафедра микроэлектроники и общей физики

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета



И.С. Огнев

«23» мая 2023 г.

**Рабочая программа дисциплины**  
**«Физика диэлектриков»**

Направление подготовки  
11.04.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль)  
«Интегральная электроника и нанoeлектроника»

Форма обучения  
очная

Программа рассмотрена  
на заседании кафедры  
от «17» апреля 2023 года, протокол № 5

Программа одобрена НМК  
физического факультета  
протокол № 5, от «25» апреля 2023 года

Ярославль

## **1. Цели освоения дисциплины**

Целями освоения дисциплины «Физика диэлектриков» являются:

- приобретение знаний и умений в соответствии с государственным образовательным стандартом, содействие созданию фундаментального образования, формированию мировоззрения в области интегральной электроники и наноэлектроники;
- ознакомление студентов с основными физическими явлениями в диэлектрических конденсированных состояниях: с диффузией точечных дефектов; электропроводностью; поведением в электрических, магнитных и деформационных полях; с закономерностями фазовых переходов; ознакомление студентов с методами изучения структуры и физических свойств, теоретическими моделями расчета электронного спектра в кристалле;
- формирование научной основы для осознанного и целенаправленного использования свойств диэлектрических конденсированных систем, при создании элементов, приборов и устройств микро и наноэлектроники;
- расширение научного кругозора и эрудиции студентов на базе изучения фундаментальных результатов физики диэлектрического конденсированного состояния и способов практического использования их свойств, развитие понимания взаимосвязи структуры и состава диэлектрических твердых тел, и многообразия их физических свойств, практическое овладение методами теоретического описания и основными теоретическими моделями диэлектрического состояния твердого тела, навыками постановки физического эксперимента по изучению свойств диэлектриков и основными экспериментальными методиками, создание основы для последующего изучения вопросов физики полупроводниковых приборов, включая элементы и приборы наноэлектроники, физики низкоразмерных систем, твердотельной электроники и технологии микро- и наноэлектроники.

## **2. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина «Физика диэлектриков» относится к части, формируемой участниками образовательных отношений Блока 1 и является частью, формируемая участниками образовательных отношений.

Данная дисциплина использует знания, полученные при изучении дисциплин «Физика конденсированного состояния», «Физика полупроводников и низкоразмерных систем», «Микроэлектроника».

Дисциплина «Физика диэлектриков» создает предпосылки для более глубокого освоения последующих дисциплин: «Физическая кинетика полупроводников», «Нанотехнологии в электронике», «Методы анализа поверхности».

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

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО, ООП ВО и приобретения следующих знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности:

Формируемая компетенция (код и формулировка)	Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)	Перечень планируемых результатов обучения
<b>Профессиональные компетенции</b>		
<b>ПК-1.</b> Готов формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, способностью обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач.	<b>ИД_ПК-1.1.</b> Знает принципы построения и функционирования изделий микро- и нанoeлектроники.	<b>Знать:</b> - основные приближения зонной теории для расчетов энергетического спектра электрона в диэлектрическом кристалле, особенности их зонной структуры; - связь структуры со свойствами диэлектрических кристаллов; - механизмы поляризации диэлектриков в электрических полях, основы электро-проводности диэлектриков, физическую сущность
	<b>ИД_ПК-1.2.</b> Осуществляет расчет предельно-допустимых и предельных режимов работы изделий микро- и нанoeлектроники.	<b>Уметь:</b> - объяснять сущность физических явлений и процессов в диэлектрических конденсированных состояниях, производить анализ и делать количественные оценки параметров физических процессов; определить структуру простейших решеток по данным рентгено-структурного анализа; - определить тип фазового переходов сегнето-электриках. <b>Владеть навыками:</b> - методами описания механизмов взаимодействия электрического и электромагнитного поля с решеткой; - методами экспериментального определения диэлектрической проницаемости, ширины запрещенной зоны, пьезоэлектрических модулей в диэлектрике.
	<b>ИД_ПК-1.3.</b> Демонстрирует умение выбора теоретических и экспериментальных методов исследования изделий микро- и нанoeлектроники.	<b>Владеть навыками:</b> - методами описания механизмов взаимодействия электрического и электромагнитного поля с решеткой; - методами экспериментального определения диэлектрической проницаемости, ширины

		<p>запрещенной зоны, пьезоэлектрических модулей в диэлектрике.</p> <p>пьезоэлектрических свойств диэлектриков, механизмы пьезоэлектрических и сегнетоэлектрических явлений, фазовые переходы в сегнетоэлектриках;</p> <p>- свойства и основные типы сегнетоэлектрических кристаллов, макро- и микро-скопические модели сегнетоэлектричества;</p> <p>- основные характеристики и свойства неупорядоченных и аморфных диэлектрических твердых тел и жидких кристаллов;</p> <p>основные экспериментальные методы изучения структуры, электрических и магнитных свойств диэлектрических твердых тел</p>
<p><b>ПК-4.</b> Способен к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов.</p>	<p><b>ИД_ПК-4.1.</b> Знает способы организации и проведения экспериментальных исследований.</p>	<p><b>Знать:</b></p> <p>– основные физические величины и характеристики процессов и явлений на каждом структурном уровне организации материи, связи между физическими характеристиками явлений и процессов, области применимости количественных соотношений между физическими характеристиками, физические теории, позволяющие объяснять известные и предсказывать новые научные результаты;</p> <p>– методы статистической обработки результатов измерения</p>
	<p><b>ИД_ПК-4.2.</b> Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования.</p>	<p><b>Уметь:</b></p> <p>– использовать математический аппарат для освоения теоретических основ и практического использования физических методов;</p> <p>– формулировать на математическом языке и решать физические задачи из их стандартного набора;</p> <p>– использовать законы сохранения, фундаментальные физические закономерности;</p> <p>– понимать, излагать и критически анализировать базовую общезначимую информацию;</p>

		– пользоваться теоретическими основами, основными понятиями, законами и моделями физики.
	<p><b>ИД_ПК-4.3.</b> Демонстрирует навыки проведения исследований с применением современных средств и методов</p>	<p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– использования математического аппарата при решении физических задач;</li> <li>– использования информационных технологий при решении физических задач;</li> <li>– применения методов обработки и анализа экспериментальной и теоретической физической информации.</li> </ul>

#### 4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы, 108 акад. часа.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	Семестр	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах)						Формы текущего контроля успеваемости  Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			Контактная работа					самостоятельная работа	
			лекции	практические	лабораторные	консультации	аттестационные испытания		
1	Введение.	1	1					1	
2	Методы расчета энергетического спектра электрона в кристаллическом диэлектрике	1	4			1		6	Задания для самостоятельной работы
3	Теория поляризации диэлектриков.	1	4		10	1		6	Задания для самостоятельной работы
4	Пьезоэлектрические свойства диэлектриков.	1	4		10	1		6	Задания для самостоятельной работы
5	Теория спонтанной поляризации и фазовых переходов	1	4		10	1		6	Задания для самостоятельной работы
6	Нелинейные свойства диэлектриков	1	1					5	Задания для самостоятельной работы
							0,5	33,5	Экзамен
	Всего за 1 семестр		17		17	5	0,5	68,5	

Содержание разделов дисциплины:

##### 1. Введение.

Предмет и задачи физики диэлектриков. Типы диэлектрических материалов, используемые в полупроводниковой микроэлектронике.

##### 2. Методы расчета энергетического спектра электрона в диэлектрике.

Приближение сильной связи. Приближение псевдопотенциала. Приближение Хартри-Фока.

##### 3. Теория поляризации диэлектриков.

Макроскопическая и микроскопическая теории диэлектрических свойств. Механизмы поляризации в диэлектриках.

##### 4. Пьезоэлектрические свойства диэлектриков.

Кристаллография прямого и обратного пьезоэлектрического эффекта. Термодинамика пьезоэлектрических свойств кристаллов. Пьезоэлектрические свойства некоторых кристаллов. Электрострикция.

### **5. Теория спонтанной поляризации и фазовых переходов.**

Структурные мотивы возникновения спонтанной поляризации. Спонтанная поляризация линейных диэлектриков (линейные пьезоэлектрики). Термодинамическая теория спонтанной поляризации сегнетоэлектриков. Фазовые переходы I и II рода. Фазовые переходы в свете динамической теории решетки.

### **6. Нелинейные свойства диэлектриков.**

Классификация нелинейных явлений в кристаллах. Электрооптические эффекты. Нелинейные оптические свойства диэлектриков. Магнитооптические эффекты.

### **Список лабораторных работ:**

1. Исследование обратного пьезоэлектрического эффекта в кристалле кварца.
2. Исследование гистерезисных явлений в ферритовых материалах.
3. Исследование фазовых переходов в ферритах.
4. Исследование фазовых переходов в кристалле BaTiO<sub>3</sub>.
5. Изучение фазового перехода в кристаллах триглицинсульфата (ТГС).
6. Изучение гистерезисных и нелинейных явлений в кристаллах триглицинсульфата (ТГС).

### **5. Образовательные технологии, в том числе технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

**Вводная лекция** – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин и в системе подготовки в целом. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой учебно-методической литературы.

**Академическая лекция** (или лекция общего курса) – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Требования к академической лекции: современный научный уровень и насыщенная информативность, убедительная аргументация, доступная и понятная речь, четкая структура и логика, наличие ярких примеров, научных доказательств, обоснований, фактов.

**Лабораторное занятие** – занятие, посвященное освоению экспериментальных умений и навыков и закреплению полученных на лекциях теоретических знаний.

### **6. Перечень лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

для формирования материалов для текущего контроля успеваемости и проведения промежуточной аттестации, для формирования методических материалов по дисциплине:

- программы Microsoft Office;
- издательская система LaTeX;
- Adobe Acrobat Reader.

#### **7. Перечень современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (при необходимости)**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT»  
[http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_find.php](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php).

#### **8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (при необходимости), рекомендуемых для освоения дисциплины**

##### **а) основная литература:**

1. Физика твердого тела : учеб. пособие для вузов. / под ред. А. С. Рудого, А. В. Проказникова. Ярославль: ЯрГУ, 2009.  
<http://www.lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/20090709.pdf> (электронная версия)

##### **б) дополнительная литература:**

1. Ю. В. Петров. Основы физики конденсированного состояния. Долгопрудный: Интеллект, 2013.
3. Н. Ашкрофт. Физика твердого тела. Т. 1: Физика твердого тела. М. Мир, 1979.
4. Н. Ашкрофт. Физика твердого тела. Т. 2: Физика твердого тела. М. Мир, 1979.
5. Н. А. Рудь. Пьезоэлектрические и сегнетоэлектрические свойства кристаллических диэлектриков: метод. указания по выполнению лабораторных работ. Ярославль: ЯрГУ, 2003. <http://www.lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/20030785.pdf> (электронная версия)
6. Н. А. Рудь. Физика кристаллических диэлектриков. Ярославль: ЯрГУ, 1988.

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

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа;
- учебные аудитории для проведения лабораторных работ;
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций;
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы;
- помещения для хранения и профилактического обслуживания технических средств обучения.



Специальные помещения укомплектованы средствами обучения, служащими для предоставления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ЯрГУ.

Автор:

ст. препод. каф. МОФ, к.ф.-м.н. \_\_\_\_\_

Романов Д.Н.

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины  
«Физика диэлектриков»**

**Фонд оценочных средств  
для проведения текущего контроля успеваемости  
и промежуточной аттестации студентов  
по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания или иные материалы,  
используемые в процессе текущего контроля успеваемости**

**Задания для самостоятельной работы**

*(данные задания выполняются студентом самостоятельно и преподавателем в обязательном порядке проверяются, проверка сформированности ПК-4, индикаторы ИД\_ПК-4.2, ИД\_ПК-4.3)*

**Задания по теме № 2 «Методы расчета энергетического спектра электрона в кристаллах диэлектриков»:**

1. Метод присоединенных плоских волн. (Цидильковский, И.М. Электроны и дырки в полупроводниках. Энергетический спектр и динамика. /И.М. Цидильковский. М., Наука, 1972, § 2.7 с.138).
2. Метод функций Грина. (Цидильковский, И.М. Электроны и дырки в полупроводниках. Энергетический спектр и динамика./ И.М. Цидильковский. М., Наука, 1972, § 2.8 -с.145).
3. Метод псевдопотенциала. (Цидильковский, И.М. Электроны и дырки в полупроводниках. Энергетический спектр и динамика./ И.М. Цидильковский. М., Наука, 1972, - § 2.11 -с.175).
4.  $k_p$  – метод. (Цидильковский, И.М. Электроны и дырки в полупроводниках. Энергетический спектр и динамика./ И.М. Цидильковский. М., Наука, 1972, - § 2.12 -с.190).

**Задания по теме № 3 «Теория поляризации диэлектриков »:**

1. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости. (Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела: Учебник для вузов - 3-е изд., стереотип. - М.: Высшая школа, 2000. §9.10 – с.350.)
2. Диэлектрические потери. (Павлов, П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела: Учебник для вузов - 3-е изд., стереотип./ П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. М.: Высшая школа, 2000. §9.13 – с.358).

**Задания по теме № 4 «Пьезоэлектрические свойства диэлектриков»:**

1. Пьезоэлектрические свойства некоторых линейных диэлектриков. (Желудев И.С. Физика кристаллических диэлектриков./ М., Наука, 1968, .§9.3 с. 384).
2. Электрострикция. (Желудев, И.С. Физика кристаллических диэлектриков./ И.С. Желудев. М., Наука, 1968, .§9.5 с. 411).

**Задания по теме № 5 «Теория спонтанной поляризации и фазовых переходов»:**

1. Фазовые переходы в свете динамической теории решетки. (Желудев, И.С. Физика кристаллических диэлектриков./ И.С. Желудев. М., Наука, 1968, .§6.4 с. 216).

**Задания по теме № 6 «Нелинейные свойства диэлектриков»:**

Электрооптические эффекты. (Желудев, И.С. Физика кристаллических диэлектриков./ И.С. Желудев. М., Наука, 1968, Гл. 10 - с. 426).

## 2. Список вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации (проверка сформированности ПК-4, индикаторы ИД\_ПК-4.1)

### Список вопросов к экзамену:

1. Типы диэлектрических материалов, которые используются в полупроводниковой микроэлектронике.
2. Расчет энергетического спектра электронов в приближении сильной связи.
3. Расчет энергетического спектра электронов в приближении Хартри-Фока.
4. Расчет энергетического спектра электронов методом присоединенных плоских волн.
5. Расчет энергетического спектра электронов методом функций Грина.
6. Расчет энергетического спектра электронов методом псевдопотенциала.
7. Расчет энергетического спектра электронов  $k$ - $p$  – методом.
8. Макроскопическая теория диэлектрических свойств диэлектриков.
9. Микроскопическая теория диэлектрических свойств диэлектриков.
10. Электронная упругая и тепловая поляризация.
11. Ионная упругая и тепловая поляризация.
12. Дипольная упругая и тепловая поляризация.
13. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости.
14. Кристаллография прямого пьезоэлектрического эффекта.
15. Кристаллография обратного пьезоэлектрического эффекта.
16. Термодинамика пьезоэлектрических свойств кристаллических диэлектриков.
17. Пьезоэлектрические свойства кварца, сегнетовой соли, ТГС,  $BaTiO_3$ .
18. Электрострикция.
19. Структурные мотивы возникновения спонтанной поляризации.
20. Теория спонтанной поляризации линейных диэлектриков.
21. Термодинамическая теория фазовых переходов 1-го рода.
22. Термодинамическая теория фазовых переходов 2-го рода.
23. Теория фазовых переходов в свете динамической теории решетки.
24. Классификация нелинейных явлений в кристаллах.
25. Электрооптические эффекты.
26. Нелинейные оптические свойства диэлектриков.
27. Магнитооптические эффекты.

### Правила выставления оценки

В экзаменационные билет включается два теоретических вопроса. На подготовку к ответу дается не менее 1 часа.

По итогам экзамена выставляется одна из оценок: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно».

**Оценка «Отлично»** выставляется студенту, который демонстрирует знание всех подходов для приближенных методов расчета электронного спектра в диэлектриках; основные механизмы поляризации; все механизмы поляризации; макроскопическую и микроскопическую теорию поляризации диэлектриков; физической сущности механизмов пьезо-, пиро- и сегнетоэлектрических свойств диэлектриков; теорию фазовых переходов; основных характеристик и свойства неупорядоченных и аморфных диэлектрических твердых тел и жидких кристаллов; основные экспериментальные методы изучения структуры, электрических и магнитных

свойств диэлектрических твердых тел; **умение** объяснять сущность физических явлений и процессов в диэлектрических конденсированных состояниях; производить анализ, делать количественные оценки параметров, определять структуру простейших решеток по данным рентгеноструктурного анализа; определять тип фазового перехода в сегнетоэлектриках; **владение** методами описания механизмов взаимодействия электрического и электромагнитного поля с диэлектрической решеткой; методами экспериментального определения диэлектрической проницаемости, ширины запрещенной зоны диэлектрика, пьезоэлектрических модулей в диэлектриках.

**Оценка «Хорошо»** выставляется студенту, который демонстрирует **знания** всех подходов для приближенных методов расчета электронного спектра в диэлектриках; основные механизмы поляризации; все механизмы поляризации; макроскопическую и микроскопическую теорию поляризации диэлектриков; физической сущности механизмов пьезо-, пиро- и сегнетоэлектрических свойств диэлектриков; теорию фазовых переходов; основных характеристик и свойства неупорядоченных и аморфных диэлектрических твердых тел и жидких кристаллов; основные экспериментальные методы изучения структуры, электрических и магнитных свойств диэлектрических твердых тел; **умение** объяснять сущность физических явлений и процессов в диэлектрических конденсированных состояниях; производить анализ, делать количественные оценки параметров, определять структуру простейших решеток по данным рентгеноструктурного анализа; **владение** методами описания механизмов взаимодействия электрического и электромагнитного поля с диэлектрической решеткой; методами определения диэлектрической проницаемости и ширины запрещенной зоны диэлектрика.

**Оценка «Удовлетворительно»** выставляется студенту, который демонстрирует **знания** общих подходов для приближенных методов расчета электронного спектра в диэлектриках; основные механизмы поляризации; физической сущности механизмов пьезо-, пиро- и сегнетоэлектрических свойств диэлектриков; основ фазовых переходов; основы экспериментальных методов исследования физических свойств диэлектриков; **умения** объяснять сущность физических явлений и процессов в диэлектрических конденсированных состояниях; определить структуру простейших решеток по данным рентгеноструктурного анализа, **владения** методом описания механизма взаимодействия электрического поля с диэлектрической решеткой; методом определения диэлектрической проницаемости вещества.

**Оценка «Неудовлетворительно»** выставляется студенту, который демонстрирует разрозненные, бессистемные знания; беспорядочно и неуверенно излагает материал; не умеет выделять главное и второстепенное, не умеет соединять теоретические положения с практикой, не устанавливает межпредметные связи; допускает грубые ошибки при определении сущности раскрываемых понятий, явлений, вследствие непонимания их существенных и несущественных признаков и связей; дает неполные ответы, логика и последовательность изложения которых имеют существенные и принципиальные нарушения, в ответах отсутствуют выводы, ответил на вопрос экзамена хуже оценки «Удовлетворительно». Оценка «Неудовлетворительно» выставляется также студенту, который взял экзаменационный билет, но отвечать отказался.

## **Приложение № 2 к рабочей программе дисциплины «Физика диэлектриков»**

### **Методические указания для студентов по освоению дисциплины**

Основной формой изложения учебного материала по дисциплине «Физика диэлектриков» являются лекции, причем в достаточно небольшом объеме. Это связано с тем, что для освоения данного курса выделено небольшое количество времени, которое распределяется между лекциями и лабораторными занятиями. В этих условиях достаточно большой теоретический материал выделяется для самостоятельного изучения.

Для успешного освоения дисциплины очень важно чтобы студенты регулярно занимались самостоятельной работой по теоретическому материалу и лабораторным занятиям. Кроме этого, студентам рекомендуется регулярное повторение пройденного лекционного материала.

Для проверки и контроля усвоения теоретического материала, приобретенных практических навыков работы с аппаратурой по изучению физических эффектов и явлений физики диэлектриков в течение обучения проводятся мероприятия текущей аттестации в виде теста по 2 и 3 разделам и домашней самостоятельной работы по всем разделам программы. Также проводятся консультации (при необходимости) по разбору заданий для самостоятельной работы, которые вызвали затруднения.

В конце изучения дисциплины студенты сдают экзамен. Экзамен принимается по экзаменационным билетам, каждый из которых включает в себя два теоретических вопроса. На самостоятельную подготовку к экзамену выделяется не менее 3 дней, во время подготовки к экзамену предусмотрена групповая консультация.

Освоить вопросы, излагаемые в процессе изучения дисциплины «Физика диэлектриков» самостоятельно студенту крайне сложно. Это связано со сложностью изучаемого материала и большим объемом курса. Поэтому посещение всех аудиторных занятий является совершенно необходимым. Без упорных и регулярных занятий в течение семестра сдать экзамен по итогам изучения дисциплины студенту практически невозможно.