

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования_
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДЕНО
решением Ученого совета ННГУ
протокол № 15 от 24.12.2025 г.

Рабочая программа дисциплины

Асимптотические методы теории волн

Уровень высшего образования
Бакалавриат

Направление подготовки / специальность
03.03.03 - Радиофизика

Направленность образовательной программы
Фундаментальная радиофизика

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2026 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.08 Асимптотические методы теории волн относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-1: Способен анализировать текущую научную и научно-техническую литературу в области физики и радиофизики	ПК-1.1: Применяет основные методы анализа текущей научной и научно-технической литературы в области физики и радиофизики ПК-1.2: Анализирует текущую научную и научно-техническую литературу в области физики и радиофизики	ПК-1.1: Знать современные образовательные и информационные технологии и на основе общей информационной и библиографической культуры самостоятельно приобретать новые знания об основных принципах, уравнениях (законах) и современных методах исследования распространения и локализации коротковолновых электромагнитных, акустических и других силовых полей в пространственно неоднородных средах, чтобы использовать их с учётом основных требований информационной безопасности для решения конкретных стандартных задач в области профессиональной деятельности. У1. Уметь использовать базовые теоретические знания основных принципов, уравнений (законов) и современных методов исследования распространения и локализации коротковолновых электромагнитных, акустических и других силовых	Задачи Задания	Зачёт: Контрольные вопросы Задания Задачи

		полей в пространственно неоднородных средах и знания основ информационной и библиографической культуры, чтобы с применением информационно-коммуникационных технологий и требований информационной безопасности решать стандартные задачи в области профессиональной деятельности. Владеть базовыми теоретическими знаниями основных принципов, уравнений (законов) и современных методов исследования распространения и локализации коротковолновых электромагнитных, акустических и других силовых полей в пространственно неоднородных средах, а также основами информационной и библиографической культуры, чтобы с применением информационно-коммуникационных технологий и требований информационной безопасности решать стандартные задачи в области профессиональной деятельности. ПК-1.2: 31. Знать современные образовательные и информационные технологии и на основе общей информационной и библиографической культуры самостоятельно приобретать новые знания об основных принципах, уравнениях (законах) и современных методах исследования распространения и локализации коротковолновых электромагнитных,		
--	--	---	--	--

		акустических и других силовых полей в пространственно неоднородных средах, чтобы использовать их с учётом основных требований информационной безопасности для решения конкретных стандартных задач в области профессиональной деятельности. У1. Уметь использовать базовые теоретические знания основных принципов, уравнений (законов) и современных методов исследования распространения и локализации коротковолновых электромагнитных, акустических и других силовых полей в пространственно неоднородных средах и знания основ информационной и библиографической культуры, чтобы с применением информационно-коммуникационных технологий и требований информационной безопасности решать стандартные задачи в области профессиональной деятельности. Владеть базовыми теоретическими знаниями основных принципов, уравнений (законов) и современных методов исследования распространения и локализации коротковолновых электромагнитных, акустических и других силовых полей в пространственно неоднородных средах, а также основами информационной и библиографической культуры, чтобы с применением информационно-коммуникационных технологий и требований информационной		
--	--	--	--	--

		безопасности решать стандартные задачи в области профессиональной деятельности.		
ПК-2: Способен осваивать и применять новейшие методы проведения теоретических и экспериментальных исследований в области радиофизики	ПК-2.1: Обладает базовыми знаниями, необходимыми для освоения новейших методов проведения теоретических и экспериментальных исследований в области радиофизики ПК-2.2: Осваивает и применяет новейшие методы проведения теоретических и экспериментальных исследований в области радиофизики	ПК-2.1: Уметь самостоятельно приобретать новые знания об основных принципах, уравнениях (законах) и современных методах исследования распространения и локализации коротковолновых электромагнитных, акустических и других силовых полей в пространственно неоднородных средах, используя современные образовательные и информационные технологии, а также критически анализируя наблюдаемые эффекты и результаты физических экспериментов в области радиофизики и радиоэлектроники. Знать современные образовательные и информационные технологии, чтобы самостоятельно приобретать новые знания об основных принципах, уравнениях (законах) и современных методах исследования распространения и локализации коротковолновых электромагнитных, акустических и других силовых полей в пространственно неоднородных средах, для решения конкретных задач в области радиофизики и радиоэлектроники. Владеть современными образовательными и информационными технологиями и правильно использовать общенаучную и специальную терминологию, касающуюся основных принципов, уравнений (законов) и современных	Задания Задачи	Зачёт: Контрольные вопросы Задания Задачи

		методов исследования распространения и локализации коротковолновых электромагнитных, акустических и других силовых полей в пространственно неоднородных средах, чтобы самостоятельно приобретать новые знания для корректной интерпретации наблюдаемых эффектов и результатов физических экспериментов в различных областях радиофизики, акустики и радиоэлектроники. ПК-2.2: Уметь самостоятельно приобретать новые знания об основных принципах, уравнениях (законах) и современных методах исследования распространения и локализации коротковолновых электромагнитных, акустических и других силовых полей в пространственно неоднородных средах, используя современные образовательные и информационные технологии, а также критически анализируя наблюдаемые эффекты и результаты физических экспериментов в области радиофизики и радиоэлектроники. Знать современные образовательные и информационные технологии, чтобы самостоятельно приобретать новые знания об основных принципах, уравнениях (законах) и современных методах исследования распространения и локализации коротковолновых электромагнитных, акустических и других силовых полей в пространственно неоднородных средах, для		
--	--	---	--	--

		решения конкретных задач в области радиофизики и радиоэлектроники. Владеть современными образовательными и информационными технологиями и правильно использовать общенаучную и специальную терминологию, касающуюся основных принципов, уравнений (законов) и современных методов исследования распространения и локализации коротковолновых электромагнитных, акустических и других силовых полей в пространственно неоднородных средах, чтобы самостоятельно приобретать новые знания для корректной интерпретации наблюдаемых эффектов и результатов физических экспериментов в различных областях радиофизики, акустики и радиоэлектроники.		
--	--	---	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	2
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	0
- КСР	1
самостоятельная работа	39
Промежуточная аттестация	0
	Зачёт

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/ лабора торные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
Введение	2	1		1	1
Часть 1. Геометрическая оптика (ГО). Тема 1. Уравнения геометрической оптики в неоднородной среде	4	2		2	2
Ч1. Тема 2. Общие свойства и некоторые методы решения уравнения эйконала	5	2		2	3
Ч1. Тема 3. Уравнение переноса и законы изменения интенсивности в ГО	4	2		2	2
Ч1. Тема 4. Отражение и преломление лучей на границе раздела сред	2	1		1	1
Ч1. Тема 5. Геометрическая оптика слоисто-неоднородной среды	6	3		3	3
Ч1. Тема 6. Матричный метод описания распространения лучей в центрированных линиях передачи силовых полей	6	3		3	3
Ч1. Тема 7. Закономерности распространения лучей в линиях передачи (периодических центрированных системах)	2	1		1	1
Ч1. Тема 8. Матричный метод описания лучей в разъюстированных (нецентрированных) линиях передачи	2	1		1	1
Часть 2. Квазиоптика однородных линейных сред. Тема 1. Элементы теории дифракции скалярных и векторных полей	7	3		3	4
Ч2. Тема 2. Основные закономерности распространения дифрагированных коротковолновых полей	4	2		2	2
Ч2. Тема 3. Дифференциальный метод квазиоптического описания распространения коротковолновых полей	3	1		1	2
Ч2. Тема 4. Спектральный метод описания параксиальных волновых пучков	3	1		1	2
Ч2. Тема 5. Аналогия лучевого и волнового описаний распространения полей в приближении параксиальной оптики	3	1		1	2
Ч2. Тема 6. Распространение параксиальных волновых пучков гауссовой формы в однородном свободном пространстве	3	1		1	2
Ч2. Тема 7. Волновые пучки в недифрагмированных открытых цилиндрических линиях передачи	4	2		2	2
Ч2. Тема 8. Сопоставление свойств ТЕМ _{np} -мод и собственных лучей в открытых цилиндрических линиях передачи	5	2		2	3
Ч2. Тема 9. Обобщения и приложения квазиоптической теории ТЕМ _{np} -мод открытых линий передачи	6	3		3	3
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	72	32	0	33	39

Содержание разделов и тем дисциплины

Раздел 1. Введение

Однородные и неоднородные линейные среды. Описание волновых процессов в неоднородных линейных средах. Волновое уравнение и уравнение Гельмгольца в задачах распространения электромагнитного поля, звука и упругих волн. Внутренний и внешний пространственные масштабы решений уравнения Гельмгольца. Области коротковолновой асимптотики. Вывод уравнения Гельмгольца из уравнений Максвелла.

ЧАСТЬ I. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА (ГО)

Раздел 2. Уравнения геометрической оптики в неоднородной среде

Приближение ГО для монохроматических полей в неоднородных средах. Вывод уравнений эйконала и переноса лучевой амплитуды из уравнения Гельмгольца. Понятие асимптотического разложения решения уравнения Гельмгольца. Вывод уравнений ГО для членов асимптотического ряда, образующего решение уравнения Гельмгольца. Вывод уравнений ГО из уравнений Максвелла.

Раздел 3. Общие свойства и некоторые методы решения уравнения эйконала

Решение уравнения эйконала с помощью характеристик системы уравнений в характеристической форме. Аналогия эйконала и действия в механике. Физический смысл эйконала и связанных с ним понятий: волновой фронт, поток энергии (луч), лучевой вектор, траектория луча, длина дуги луча. Уравнение траектории луча. Оптическая длина пути. Принцип Ферма. Дифференциальные уравнения для лучей в форме уравнений движения материальной точки в классической механике.

Раздел 4. Уравнение переноса и законы изменения интенсивности в ГО

Интенсивность света и закон сохранения энергии. Интенсивность поля волны иной физической природы. Уравнение переноса – закон сохранения интенсивности в ГО. Лучевые трубки. Изменение интенсивности вдоль лучевых трубок. Кривые волновые фронты и фокусирующиеся поля в лучевых трубках в однородной среде. Каустические поверхности. Изменение интенсивности вдоль луча в неоднородной среде. Использование решений лучевых уравнений для определения изменения интенсивности вдоль лучей. Лемма Соболева и ее применение к лучевым уравнениям. Уравнение для вектора поляризации поля. Геометрическая интерпретация изменения поляризации поля. Кручение траектории луча и кривизна луча.

Раздел 5. Отражение и преломление лучей на границе раздела сред

Принцип локальности и условия его применимости. Закон Снеллиуса и закон отражения для силовых полей в ГО.

Раздел 6. Геометрическая оптика слоисто-неоднородной среды

Лучи в сферически-слоистой среде. Плоский характер траектории луча. Закон Бугера. Аналогия уравнений распространения лучей в сферически-слоистой среде и движения материальной точки в симметричном центральном поле. Плоскостлоистая среда. Распространение радиоволн в неоднородной земной атмосфере: приведённый показатель преломления, точки поворота лучей и каустические поверхности. Интенсивность поля и площадь поперечного сечения лучевой трубки в точке поворота луча. Лучевое уравнение в аксиально-симметричной среде. Траектории лучей в плоскостях, содержащих ось симметрии и перпендикулярных оси. Лучи в линзоподобных (фокусирующих) средах. Траектории лучей в плоскости, содержащей ось симметрии. Приближение параксиальности лучей. Параксиальные лучи в аксиально-симметричных средах с медленно меняющимися коэффициентами преломления. Параксиальные лучи в плоскости, проходящей через ось симметрии.

Раздел 7. Матричный метод описания распространения лучей в центрированных линиях передачи силовых полей

Математические основы матричного метода описания распространения параксиальных лучей: координаты луча, лучевая матрица для параксиальных лучей. Матрица преобразования координат луча на участке однородного пространства (перемещения лучей). Матрицы преобразования координат луча на плоской и сферической границах раздела сред. Матрица преобразования координат луча тонкой линзой и сферическим зеркалом. Свойства матриц преобразования координат луча: норма, обратные матрицы. Матрицы Фурье-преобразования и изменения масштаба. Простейшие матричные тождества как элементы алгебры матричных преобразований. Сопоставление матриц и оптических систем.

Раздел 8. Закономерности распространения лучей в линиях передачи (периодических центрированных системах)

Сопоставление резонаторов и цилиндрических линий передачи. Классификация цилиндрических линий передачи (и резонаторов) по свойствам траекторий распространяющихся лучей. Собственные лучи в периодических центрированных системах. Финитные и инфинитные траектории. Условия финитности траектории луча в периодической цилиндрической линии передачи. Условие устойчивости движения лучей в периодических центрированных системах.

Раздел 9. Матричный метод описания распространения лучей в разъюстированных (нецентрированных) линиях передачи

Линии передачи и резонаторы с элементами, смещенными относительно центральной оси. Оператор смещения координат луча и его свойства. Эквивалентность центрированных и нецентрированных систем. Устойчивость движения лучей в разъюстированных периодических системах.

ЧАСТЬ II. КВАЗИОПТИКА ОДНОРОДНЫХ ЛИНЕЙНЫХ СРЕД

Раздел 10. Элементы теории дифракции скалярных и векторных полей

Дифракция и рассеяние. Принцип Гюйгенса. Принцип Гюйгенса-Френеля. Принцип Гюйгенса-Кирхгофа. Электродинамический принцип Гюйгенса и его модификации для задач дифракции на плоских объектах. Приближённые методы решения дифракционных задач: приближение Кирхгофа для скалярного поля; метод физической оптики.

Раздел 11. Основные закономерности распространения дифрагированных коротковолновых полей

Дифракция плоской волны на отверстии в экране и диаграмма направленности простейшего излучателя коротковолнового диапазона. Параксиальные волновые пучки гауссовой формы. Дифракция гауссова пучка на отверстии в экране. Угол дифракционной расходимости и дифракционная длина – основные параметры пространственного распределения дифрагированного поля. Соотношение между поперечным и продольным пространственными масштабами изменения лучевой амплитуды поля параксиального волнового пучка. Параксиальное приближение теории дифракции скалярного поля на отверстии в плоском экране. Дифракционная формула Френеля.

Раздел 12. Дифференциальный метод квазиоптического описания распространения коротковолновых полей

Параболическое (диффузионное) уравнение для амплитуды поля параксиального волнового пучка в однородной среде. Диффузия комплексной амплитуды поля. Решение параболического уравнения с помощью функции Грина. Продольный и поперечные компоненты векторной комплексной амплитуды электромагнитного поля параксиального волнового пучка. Связь продольного и поперечных компонентов поля в сечении параксиального пучка. Уравнение для поперечных компонентов векторной амплитуды поля параксиального пучка и его решение. Параксиальность как условие применимости квазиоптического описания распространения пучка – следствие из сопоставления свойств уравнений диффузии и Гельмгольца.

Раздел 13. Спектральный метод описания распространения параксиальных волновых пучков
Спектральное представление монохроматического поля параксиального волнового пучка в виде суперпозиции плоских волн. Определение комплексной лучевой амплитуды поля пучка в произвольной точке пространства по известному спектру пространственных частот его поля.

Раздел 14. Аналогия лучевого и волнового описаний распространения полей в приближении параксиальной оптики

Преобразование поля параксиального волнового пучка на участке свободного пространства (преобразование Френеля). Преобразование поля параксиального волнового пучка тонкой линзой. Свойства преобразований поля на участке свободного пространства и тонкой линзой. Операторы обратного преобразования поля параксиального пучка на участке свободно-го пространстве и тонкой линзой. Оператор Фурье-преобразования поля.

Раздел 15. Распространение параксиальных волновых пучков гауссовой формы в одно-родном свободном пространстве

Основные характеристики структуры поля параксиального пучка гауссовой формы: ширина, кривизна поверхности фазового фронта, интенсивность поля на оси. Сохранение формы распространяющегося пучка. Угловая расходимость поля распространяющегося гауссова пучка. Изменение характеристик структуры поля распространяющегося пучка, имеющего первоначально плоский фазовый фронт. Преобразование характеристик структуры поля сфокусированных и дефокусированных гауссовых пучков на пути их распространения.

Раздел 16. Волновые пучки в недифрагмированных открытых цилиндрических линиях передачи
Собственные типы волн (моды) линзовых (и иных периодических центрированных) линий передачи силовых полей: периодическая зависимость структуры поля от продольной координаты, особые сечения. Уравнение для лучевой амплитуды поля моды открытой недифрагмированной линзовой линии простейшего типа – интегральное уравнение Фредгольма второго рода с симметричным ядром: параметр фокусировки пучка, коэффициент трансформации поля моды на периоде системы. Решения уравнения Фредгольма: собственные функции (функции Эрмита). Поперечные структуры полей мод открытой недифрагмированной цилиндрической линии передачи. Каустические поверхности мод. Условие существования энергетически реализуемых мод. Поляризации полей мод в линиях передачи оптического излучения. Изменение структуры поля моды в пространстве между корректорами фазы. Угловая расходимость поля моды, излучаемого из открытой линии передачи в свободное пространство (угловая расходимость излучения, выходящего из двухзеркального резонатора). Решение уравнения Фредгольма: собственные значения (коэффициент трансформации поля моды на периоде системы) и постоянные распространения ТЕМ_{mn}-мод.

Раздел 17. Сопоставление свойств ТЕМ_{mn}-мод и собственных лучей в открытых цилиндрических линиях передачи

Сопоставление условий существования финитных траекторий лучей и энергетически реализуемых ТЕМ_{mn}-мод в открытых линиях передачи. Сопоставление свойств геометрооптических и квазиоптических операторов преобразования характеристик распространяющегося поля: аддитивность операторов, связь с обратными себе операторами, консервативный характер преобразований поля в недифрагмированных линиях передачи и средах без диссипации. Полное соответствие тождеств матричных преобразований координат лучей и операторных преобразований полей параксиальных волновых пучков. Однозначное соответствие свойств квазиоптического оператора симметричного ядра интегрального уравнения Фредгольма и симметричной матрицы преобразования координат луча на периоде линзовой линии передачи. Использование ТЕМ_{mn}-мод и собственных лучей для описания распространения полей в открытых линиях передачи.

Раздел 18. Обобщения и приложения квазиоптической теории ТЕМ_{mn}-мод открытых линий передачи

Открытая линия передачи из эквидистантно расположенных двухфокусных корректоров фазы. Открытая линия передачи из двух типов эквидистантно расположенных разнофокусных линз (резонатор Фабри-Перо, образованный двумя различными сферическими зеркалами): условие устойчивости системы, зависимости размеров пучка главной моды на поверхностях линз от параметров линии передачи.

Открытый резонатор Фабри-Перо из двух плоских зеркал с размещённой внутри него линзой (открытая линия передачи в виде двойной периодической последовательности одинаковых линз): условие устойчивости системы в зависимости от параметров резонатора. Открытые линии передачи с потерями: затухание ТЕМ_{mn}-мод. Диафрагмированные открытые линии передачи: структуры полей, постоянные затухания ТЕМ_{mn}-мод. Моды открытых резонаторов – собственные ТЕМ_{mnq}-типы колебаний.

Основные характеристики ТЕМ_{mnq}-мод: собственные частоты, коэффициенты затухания, добротности, пространственная структура поля. Характеристическое уравнение открытого двухзеркального резонатора. Вырождение мод по частоте.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

1. Асимптотические методы в теории волн. Составитель: Миловский Н.Д. Учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014, 138 с.
2. Власов С.Н., Таланов В.И. Самофокусировка волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1997, 220 с.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-1:

Задача 1. Найти характеристики TEM_{00q} -моды открытого резонатора (комплексную частоту $\tilde{\omega}_{00q}$, добротность Q_{00q} , угловую расходимость излучения), полагая известными радиус кривизны R и коэффициент отражения $r \exp(i\varphi)$ зеркал, длину волны λ и размер резонатора L . Найти запасённую энергию и излучаемую мощность, зная амплитуду поля $\tilde{E}_0$ на оси системы каждого встречного параксиального пучка в центральном сечении резонатора.

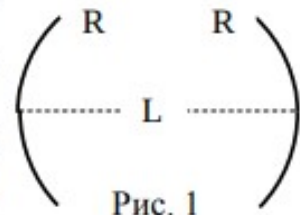


Рис. 1

Задача 2. Найти ширину параксиального волнового пучка (Рис.3) в плоскости $z > 0$ по заданному в плоскости $z_0 = 0$ полю

$$\tilde{E}_0(\vec{r}_\perp, 0) = \bar{x}_0 \tilde{E}_0 \exp\left\{-\left(x^2 + y^2\right)/2a_0^2\right\}.$$

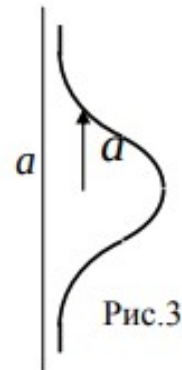


Рис.3

Задача 3. Найти комплексную амплитуду поля параксиального волнового пучка (Рис.3) в плоскости $z > 0$ по заданному в плоскости $z_0 = 0$ спектру пространственных частот

$$\tilde{E}_0(k_x, k_y) = \bar{x}_0 \tilde{E}_0 \exp\left\{-\left(k_x^2 + k_y^2\right)/2\kappa^2\right\}.$$

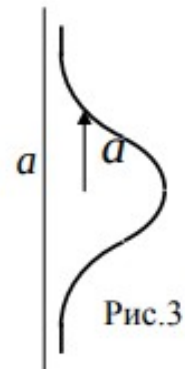
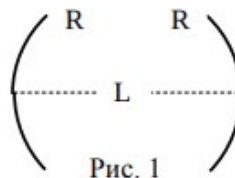
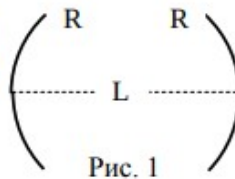


Рис.3

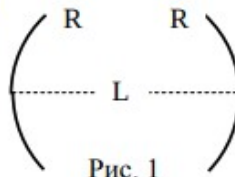
Задача 4. Найти добротность моды представленного на Рис.1 резонатора, идентичные зеркала которого имеют радиусы кривизны $R = \infty$ и коэффициенты отражения $r = 0.99$. Известны длина резонатора L и её отношение к длине волны $(L / \lambda) = 10^6$. Дифракционными потерями моды следует пренебречь



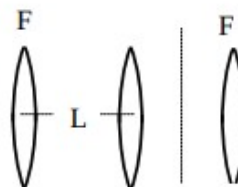
Задача 5. Найти условие на диаметр D_R зеркал резонатора (представленного на Рис.1), при выполнении которого можно пренебречь дифракционными потерями моды TEM_{00q} . Заданы радиусы кривизны зеркал $R = L$ и их коэффициенты отражения $r = 0.99$, отношение $(L / \lambda) = 10^6$ длины резонатора к длине волны.



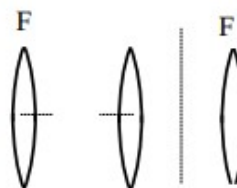
Задача 6. Найти зависимость ширины пучка основной TEM_{00q} -моды резонатора, изображённого на Рис.1, от продольной координаты. Заданы радиусы кривизны зеркал $R = L$ и отношение $(L / \lambda) = 10^6$ длины резонатора к длине волны генерируемого на этой моде излучения.



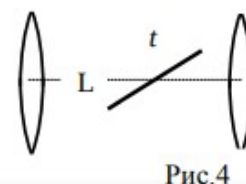
Задача 7. Найти зависимость ширины пучка основной TEM_{00} -моды открытой линии передачи, изображённой на Рис.2, от продольной координаты в пространстве между линзами. Заданы расстояние между линзами $L = 0.75 F$ и отношение $(L / \lambda) = 10^6$ этого расстояния к длине волны распространяющегося на этой моде излучения.



Задача 8. Найти условие на диаметр D_R линз открытой линии (Рис.2), при выполнении которого можно пренебречь дифракционными потерями моды TEM_{00} . Заданы расстояние между линзами $L = 2 F$, отношение $(L / \lambda) = 10^6$ этого расстояния к длине волны распространяющегося излучения, длина линии передачи $S = 100 \cdot L$ и потери 0.1%.



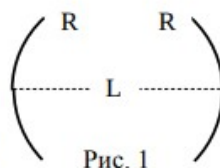
Задача 9. Найти постоянную распространения $\tilde{h}_{00}$ основной TEM_{00} -моды открытой линии передачи (изображённой на Рис.4). Заданы расстояние $L = 2 F$ между линзами, отношение $(L / \lambda) = 10^6$ этого расстояния к длине волны распространя-



10

ющегося на этой моде излучения, а также коэффициент пропускания по полю $t < 1$ плоскопараллельной пластинки.

Задача 10. Найти в приближении геометрической оптики комплексную частоту $\tilde{\omega}_{00q}$ и добротность Q_{00q} моды TEM_{00q} открытого резонатора с плоскими зеркалами (радиус кривизны $R = \infty$), полагая известными коэффициент отражения $r \exp(i\varphi)$ зеркал, длину волны λ и размер резонатора L . Зная амплитуду поля $\tilde{E}_0$ на зеркале в сечении $z = 0$, найти распределение плотности запасённой энергии и мощность, излучаемую через единичное сечение площади каждого зеркала.



5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-2:

Задача 1. Найти параметр фокусировки и исследовать области устойчивости открытого резонатора (Рис.1) в зависимости от соотношения длины L и радиуса кривизны R .

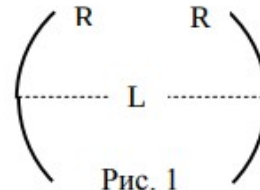


Рис. 1

Задача 2. Найти параметр фокусировки и исследовать области устойчивости открытого резонатора (Рис.1), сферические зеркала которого имеют разные радиусы кривизны $R_{1,2}$.

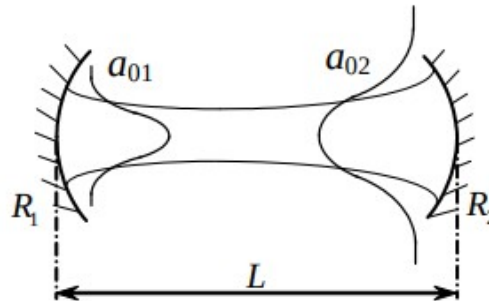


Рис. 1

Задача 3. Найти параметр фокусировки и исследовать области устойчивости открытого резонатора (Рис.1), имеющего два плоских зеркала (радиусы кривизны $R_{1,2} = \infty$) и линзу на оси симметрии

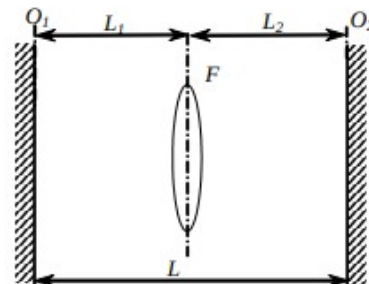


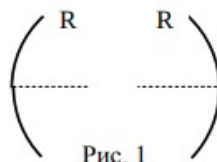
Рис. 1

Задача 4. Найти в геометрикооптическом приближении (плоской волны) собственные частоты $\tilde{\omega} = \omega' + i\omega''$ резонатора (Рис.1) и одномерное излучательное решение, которое описывает поле его моды на частоте $\tilde{\omega}_q$. Найти распределение (по продольной координате) плотности электромагнитной энергии и потока вектора Пойнтинга через единичное поперечное сечение. Заданы коэффициенты отражения $r_{1,2}$ плоских зеркал резонатора и амплитуда поля $\tilde{E}_0$ на зеркале 1.

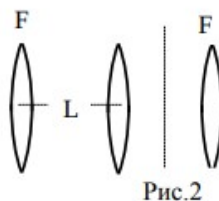


Рис. 1

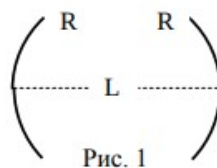
Задача 5. Найти в плоскостях $z_1 = 0$; $z_2 = (L/2)$ площади поперечных сечений TEM_{mnq} -моды открытого резонатора (Рис.1) для излучения, имеющего длину волны λ . Рассмотреть случаи $R_a = 4L/(4 - \sqrt{15})$ и $R_b = L$, $n=m$; $n=m=0$.



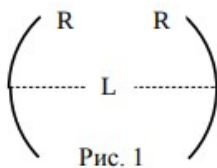
Задача 6. Найти в пространстве между линзами минимальный размер (радиус) пучка TEM_{mn} -моды открытой линии передачи (Рис.2) для излучения, имеющего длину волны λ . Рассмотреть случаи $F_a = 2L/(4 - \sqrt{15})$; $F_b = L/2$; $F_c = L$; $F_d = 2L$; $F_e = L/3$.



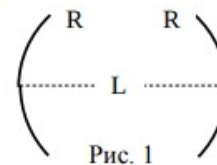
Задача 7. Найти угловую расходимость излучения, которое имеет длину волны λ и структуру поля TEM_{mnq} -моды резонатора, представленного на Рис.1.
 $n = m$; $n=m=0$.



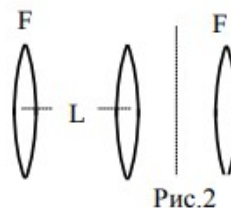
Задача 8. Найти комплексные частоты $\tilde{\omega}_{mnq}$ и добротности Q_{mnq} TEM_{mnq} -мод резонатора (Рис.1), идентичные зеркала которого имеют коэффициенты отражения по полю $r \exp(i\varphi)$. Рассмотреть случаи $R_a = L$; $R_b = 2L$; $R_c = 4L$; $R_d = 2L/3$. Провести численные расчёты для $r = 0.98$, $\varphi = \pi$; $m = n = 0$; $q = 2 \times 10^6$; $L = 100$ см; $\varepsilon = \mu = 1$.



Задача 9. Найти добротность TEM_{00q} -моды резонатора (Рис.1), идентичные зеркала которого имеют радиус кривизны $R = 2L$ и гауссов профиль коэффициента отражения $r = \exp\left\{-\frac{k}{2a}(x^2 + y^2)\right\}$, где $a = L$.



Задача 10. Найти характеристики основной моды TEM_{00} в открытой линии передачи (Рис.2). Найти ширину пучка и установить её зависимость от продольной координаты на периоде системы, определить фазовую скорость и мощность, полагая заданными фокусное расстояние линзы F и период системы L , а также длину волны λ и амплитуду поля E_0 на оси линии передачи.



Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Превосходная, отличная, хорошая или удовлетворительная подготовка. Студент на удовлетворительно или лучше отвечает на вопросы программы–минимум и основные

Оценка	Критерии оценивания
	вопросы билета, а также на большинство дополнительных вопросов
не зачтено	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий, допускает значительные ошибки при ответах на большинство дополнительных вопросов. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.

5.1.3 Типовые задания (оценочное средство - Задания) для оценки сформированности компетенции ПК-1:

1. Объяснить содержание теории дифракции на отверстиях в плоском экране скалярного поля в виде параксиального волнового пучка и записать дифракционную формулу Френеля.
2. Записать решение параболического уравнения для амплитуды поля параксиального волнового пучка и объяснить содержание понятий диффузия комплексной амплитуды и функция Грина диффузионного уравнения.
3. Объяснить содержание спектрального метода описания распространения параксиальных волновых пучков.
4. Записать квазиоптический оператор преобразования поля параксиального пучка на участке свободного пространства.
5. Записать квазиоптический оператор преобразования поля параксиального пучка тонкой линзой.
6. Записать формулы преобразования ширины и интенсивности поля на оси параксиального сфокусированного пучка гауссовой формы, распространяющегося в свободном пространстве.
7. Объяснить содержание понятий собственные (нормальные) типы волн или моды, элементарные ячейки и особые сечения в теории открытых цилиндрических линий (периодических центрированных систем) передачи силовых полей.
8. Записать интегральное уравнение (Фредгольма) для амплитуды поля моды открытой линзовой линии простейшего типа и преобразовать ядро уравнения к симметричному виду с помощью параметра фокусировки.
9. Объяснить свойства функций Эрмита, являющихся собственными функциями решений уравнений Фредгольма с симметричным ядром.
10. Сформулировать условие существования энергетически реализуемых мод в недифрагмированных открытых цилиндрических линиях передачи.
11. Объяснить содержание понятия угловая расходимость поля, излучаемого в свободное пространство из открытой линии передачи (или из резонатора).

12. Объяснить связь коэффициента трансформации поля моды на периоде системы и постоянной распространения TE_{mnp} -моды цилиндрической линии передачи с собственными значениями решения уравнения Фредгольма.

13. Объяснить связь собственной частоты, коэффициента затухания, добротности и пространственной структуры поля TE_{mnp} -моды открытого резонатора с решением интегрального уравнения Фредгольма для поля открытой линзовой линии (соответствующей резонатору).

14. Записать характеристическое уравнение открытого двухзеркального резонатора, используя решение интегрального уравнения Фредгольма для поля открытой линзовой линии (соответствующей резонатору).

5.1.4 Типовые задания (оценочное средство - Задания) для оценки сформированности компетенции ПК-2:

1. Написать и объяснить физический смысл волнового уравнения и уравнения Гельмгольца в неоднородной линейной среде.

2. На примере решения уравнения Гельмгольца объяснить содержание понятий внутреннего и внешнего пространственных масштабов и сформулировать приближение геометрической оптики.

3. На примере решения уравнения Гельмгольца объяснить физический смысл эйконала и написать уравнение эйконала.

4. Получить из уравнений Максвелла уравнение эйконала и уравнения го для электромагнитного поля.

5. Используя уравнения го для электромагнитного поля, ввести понятие луча и определить свойства лучевого вектора.

6. Ввести понятие длины дуги и написать уравнения, описывающие изменения траектории луча.

7. Ввести понятие оптической длины между точками на траектории луча и сформулировать принцип Ферма.

8. Написать уравнения для координат луча и градиента эйконала и сравнить их с уравнениями движения материальной частицы в классической механике.

9. Используя понятие интенсивности в го, написать закон сохранения энергии стационарного электромагнитного поля.

10. Написать и объяснить физическое содержание уравнения переноса для лучевой амплитуды решения уравнения Гельмгольца.

11. Ввести понятие интенсивности (плотности потока энергии) скалярного поля волны и сформулировать закон её изменения вдоль лучевых трубок.

12. Ввести в однородной среде фокусирующиеся поля в лучевых трубках и каустические поверхности в пространстве.

13. Объяснить содержание законов преломления и отражения лучей на границе раздела сред и сформулировать условия их корректности в го.

14. Сформулировать закон (Бугера) расположения траектории луча в пространстве сферически-слоистой среды и привести примеры траекторий.
15. Привести примеры траекторий лучей в плоскослоистой среде, найти точки поворота и каустические поверхности.
16. Привести примеры траекторий лучей в аксиально-симметричной среде в плоскостях, перпендикулярных оси и содержащих ось симметрии.
17. Привести примеры траекторий лучей в линзоподобных (фокусирующих) средах в плоскости, содержащей ось симметрии.
18. Записать условия параксиальности и привести примеры уравнений для описания параксиальных лучей в различных аксиально-симметричных средах.
19. Сформулировать математические основы матричного метода описания распространения параксиальных лучей с участием вектора-столбца координат луча (поперечных компонентов лучевого вектора и вектора смещения луча от оси).
20. Записать матрицу преобразования координат луча на участке свободного пространства (перемещения).
21. Записать матрицу преобразования координат луча на плоской границе раздела сред.
22. Записать матрицу преобразования координат луча на сферической границе раздела сред.
23. Записать матрицу преобразования координат луча тонкой линзой (сферическим зеркалом).
24. Сформулировать основные свойства матриц преобразования координат луча и объяснить их физическую природу.
25. Объяснить содержание понятия собственные лучи в периодических центрированных системах.
26. Сформулировать условие устойчивости (финитного движения) лучей в периодических центрированных системах.
27. Объяснить содержание понятия разъюстированная линия передачи и метода описания распространения лучей с помощью оператора смещения координат луча.
28. Объяснить принципы (вторичные источники) Гюйгенса и Гюйгенса-Френеля и основанные на них расчёты в задачах дифракции волн скалярного поля.
29. Объяснить принцип (вторичные источники поля) Гюйгенса-Кирхгофа и основанные на нём расчёты в задачах дифракции волн скалярного поля.
30. Объяснить электродинамический принцип (вторичные источники поля) Гюйгенса и основанные на нём расчёты в задачах дифракции электромагнитных волн на плоских объектах.
31. Объяснить содержание приближённых методов решения задач дифракции скалярного поля (приближение Кирхгофа) и электромагнитных волн (метод физической оптики).

32. Объяснить методику расчёта дифракции плоской волны на отверстии в экране и сделать оценку угловой ширину диаграммы направленности дифрагированного излучения.
33. Объяснить методику расчёта дифракции параксиального волнового пучка гауссовой формы на отверстии в экране и сделать оценки угла дифракционной расходимости и дифракционной длины дифрагированного излучения.
34. Объяснить содержание теории дифракции на отверстии в плоском экране скалярного поля в виде параксиального волнового пучка и записать дифракционную формулу Френеля.
35. Записать параболическое (диффузионное) уравнение для амплитуды поля параксиального волнового пучка в однородной среде.
36. Записать решение параболического уравнения для амплитуды поля параксиального волнового пучка и объяснить содержание понятий диффузия комплексной амплитуды и функция Грина диффузионного уравнения.
37. Объяснить содержание спектрального метода описания распространения параксиальных волновых пучков.
38. Записать соотношения между продольным и поперечными компонентами комплексной лучевой амплитуды векторного поля параксиального электромагнитного пучка.
39. Записать квазиоптический оператор преобразования поля параксиального пучка на участке свободного пространства.
40. Записать квазиоптический оператор преобразования поля параксиального пучка тонкой линзой.
41. Записать формулы преобразования ширины и интенсивности поля на оси параксиального сфокусированного пучка гауссовой формы, распространяющегося в свободном пространстве.
42. Объяснить содержание понятия и записать формулу для угловой дифракционной расходимости поля распространяющегося сфокусированного гауссова пучка.
43. Объяснить содержание понятий собственные (нормальные) типы волн или моды, элементарные ячейки и особые сечения в теории открытых цилиндрических линий (периодических центрированных систем) передачи силовых полей.
44. Записать интегральное уравнение (Фредгольма) для амплитуды поля моды открытой линзовой линии простейшего типа и преобразовать ядро уравнения к симметричному виду с помощью параметра фокусировки.
45. Объяснить свойства функций Эрмита, являющихся собственными функциями решений уравнений Фредгольма с симметричным ядром.
46. Объяснить связь поперечных структур полей мод открытой линзовой линии с собственными функциями решений уравнений Фредгольма с симметричным ядром.

47. Объяснить связь коэффициента трансформации поля моды на периоде системы и постоянной распространения TEM_{np}-моды цилиндрической линии передачи с собственными значениями решения уравнения Фредгольма.

Критерии оценивания (оценочное средство - Задания)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Превосходная, отличная, хорошая или удовлетворительная подготовка. Студент на удовлетворительно или лучше отвечает на вопросы программы–минимум и основные вопросы билета, а также на большинство дополнительных вопросов
не зачтено	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий, допускает значительные ошибки при ответах на большинство дополнительных вопросов. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатор достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнен	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов

				недочетами		ы все задания в полном объеме	
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-1

1. Параболическое (диффузионное) уравнение для амплитуды поля параксиального волнового пучка в однородной среде.
2. Решение параболического уравнения для амплитуды поля параксиального волнового пучка: диффузия амплитуды, функция Грина, дифракционная формула Френеля.

3. Спектральный метод описания распространения параксиальных волновых пучков.
4. Связь продольного и поперечных компонентов комплексной лучевой амплитуды векторного поля параксиального электромагнитного пучка.
5. Квазиоптический оператор преобразования поля параксиального пучка в свободном пространстве.
6. Квазиоптический оператор преобразования поля параксиального пучка тонкой линзой.
7. Преобразование ширины, кривизны фазового фронта и интенсивности поля на оси параксиального сфокусированного пучка гауссовой формы при распространении в свободном пространстве.
8. Угловая дифракционная расходимость поля распространяющегося сфокусированного гауссова пучка.
9. Открытые цилиндрические линии (периодические центрированные системы) передачи силовых полей: элементарные ячейки периодической системы; собственные (нормальные) типы волн (моды); особые сечения.
10. Интегральное уравнение для амплитуды поля моды открытой линзовой линии простейшего типа (уравнение Фредгольма с симметричным ядром): параметр фокусировки, коэффициент трансформации поля моды на периоде системы.
11. Решение уравнения Фредгольма с симметричным ядром: собственные функции (функции Эрмита).
12. Поперечные структуры полей мод открытой линзовой линии простейшего типа.
13. Условие существования энергетически реализуемых мод в недифрагмированных открытых цилиндрических линиях передачи.
14. Угловая расходимость поля, излучаемого из открытой линии передачи (или из резонатора) в свободное пространство.
15. Решение уравнения Фредгольма: собственные значения (коэффициент трансформации поля моды на периоде системы) и постоянные распространения ТЕМ_{mp}-мод.
16. Основные характеристики ТЕМ_{mpq}-мод открытых резонаторов (собственные частоты, коэффициенты затухания, добротности, пространственная структура поля).
17. Характеристическое уравнение открытого двухзеркального резонатора.

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-2

1. Волновое уравнение и уравнение Гельмгольца в неоднородной линейной среде.
2. Внутренний и внешний пространственные масштабы решений уравнения Гельмгольца, приближение геометрической оптики.
3. Уравнение эйконала. Физический смысл эйконала.

4. Лучи в ГО. Свойства лучевого вектора.
5. Траектория и длина дуги луча.
6. Оптическая длина между точками на траектории луча.
7. Оптический путь. Принцип Ферма.
8. Уравнения для координат луча и градиента эйконала и их аналоги в классической механике.
9. Интенсивность в ГО.
10. Уравнение переноса для лучевой амплитуды и его физическое содержание.
11. Изменение интенсивности вдоль лучевых трубок.
12. Фокусирующиеся поля в лучевых трубках и каустические поверхности в однородной среде.
13. Принцип локальности и законы отражения и преломления лучей (волн) на границе раздела сред в ГО.
14. Траектории лучей в сферически-слоистой среде: закон Бугера.
15. Траектории лучей в плоскостной среде: точки поворота и каустические поверхности.
16. Траектории лучей в аксиально-симметричной среде в плоскостях, перпендикулярных и содержащих ось симметрии.
17. Траектории лучей в линзоподобных (фокусирующих) средах в плоскости, содержащей ось симметрии.
18. Приближение параксиальности. Параксиальные лучи в аксиально-симметричных средах.
19. Математические основы матричного метода описания распространения параксиальных лучей.
20. Матрица перемещения (преобразования координат луча на участке свободного пространства).
21. Матрица преобразования координат луча на плоской границе раздела сред.
22. Матрица преобразования координат луча на сферической границе раздела сред.
23. Матрица преобразования координат луча тонкой линзой (сферическим зеркалом).
24. Свойства матриц преобразования координат луча: норма, обратные матрицы.
25. Собственные лучи в периодических центрированных системах.
26. Условие устойчивости (финитного движения) лучей в периодических центрированных системах.
27. Разъюстированная линия передачи. Оператор смещения координат луча.

28. Принципы (вторичные источники поля) Гюйгенса и Гюйгенса-Френеля в задачах дифракции волн скалярного поля.
29. Принцип (вторичные источники поля) Гюйгенса-Кирхгофа в задачах дифракции волн скалярного поля.
30. Электродинамический принцип (вторичные источники поля) Гюйгенса в задачах дифракции электромагнитных волн на плоских объектах.
31. Приближённые методы решения дифракционных задач: приближение Кирхгофа и метод физической оптики.
32. Дифракция плоской волны на отверстии в экране: угловая ширина диаграммы направленности излучения гигантской антенны.
33. Дифракция параксиального волнового пучка гауссовой формы на отверстии в экране: угол дифракционной расходимости и дифракционная длина.
34. Параксиальное приближение теории дифракции скалярного поля на отверстии в плоском экране: дифракционная формула Френеля.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Превосходная, отличная, хорошая или удовлетворительная подготовка. Студент на удовлетворительно или лучше отвечает на вопросы программы–минимум и основные вопросы билета, а также на большинство дополнительных вопросов
не зачтено	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий, допускает значительные ошибки при ответах на большинство дополнительных вопросов. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.

5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Задания) для оценки сформированности компетенции ПК-1

1. Объяснить содержание теории дифракции на отверстии в плоском экране скалярного поля в виде параксиального волнового пучка и записать дифракционную формулу Френеля.
2. Записать решение параболического уравнения для амплитуды поля параксиального волнового пучка и объяснить содержание понятий диффузия комплексной амплитуды и функция Грина диффузионного уравнения.
3. Объяснить содержание спектрального метода описания распространения параксиальных волновых пучков.
4. Записать квазиоптический оператор преобразования поля параксиального пучка на участке свободного пространства.

5. Записать квазиоптический оператор преобразования поля параксиального пучка тонкой линзой.
6. Записать формулы преобразования ширины и интенсивности поля на оси параксиального сфокусированного пучка гауссовой формы, распространяющегося в свободном пространстве.
7. Объяснить содержание понятий собственные (нормальные) типы волн или моды, элементарные ячейки и особые сечения в теории открытых цилиндрических линий (периодических центрированных систем) передачи силовых полей.
8. Записать интегральное уравнение (Фредгольма) для амплитуды поля моды открытой линзовой линии простейшего типа и преобразовать ядро уравнения к симметричному виду с помощью параметра фокусировки.
9. Объяснить свойства функций Эрмита, являющихся собственными функциями решений уравнений Фредгольма с симметричным ядром.
10. Сформулировать условие существования энергетически реализуемых мод в недифрагмированных открытых цилиндрических линиях передачи.
11. Объяснить содержание понятия угловая расходимость поля, излучаемого в свободное пространство из открытой линии передачи (или из резонатора).
12. Объяснить связь коэффициента трансформации поля моды на периоде системы и постоянной распространения TE_{mnp} -моды цилиндрической линии передачи с собственными значениями решения уравнения Фредгольма.
13. Объяснить связь собственной частоты, коэффициента затухания, добротности и пространственной структуры поля TE_{mnpq} -моды открытого резонатора с решением интегрального уравнения Фредгольма для поля открытой линзовой линии (соответствующей резонатору).
14. Записать характеристическое уравнение открытого двухзеркального резонатора, используя решение интегрального уравнения Фредгольма для поля открытой линзовой линии (соответствующей резонатору).

5.3.4 Типовые задания (оценочное средство - Задания) для оценки сформированности компетенции ПК-2

1. Написать и объяснить физический смысл волнового уравнения и уравнения Гельмгольца в неоднородной линейной среде.
2. На примере решения уравнения Гельмгольца объяснить содержание понятий внутреннего и внешнего пространственных масштабов и сформулировать приближение геометрической оптики.
3. На примере решения уравнения Гельмгольца объяснить физический смысл эйконала и написать уравнение эйконала.
4. Получить из уравнений Максвелла уравнение эйконала и уравнения го для электромагнитного поля.
5. Используя уравнения го для электромагнитного поля, ввести понятие луча и определить свойства лучевого вектора.

6. Ввести понятие длины дуги и написать уравнения, описывающие изменения траектории луча.
7. Ввести понятие оптической длины между точками на траектории луча и сформулировать принцип Ферма.
8. Написать уравнения для координат луча и градиента эйконала и сравнить их с уравнениями движения материальной частицы в классической механике.
9. Используя понятие интенсивности в го, написать закон сохранения энергии стационарного электромагнитного поля.
10. Написать и объяснить физическое содержание уравнения переноса для лучевой амплитуды решения уравнения Гельмгольца.
11. Ввести понятие интенсивности (плотности потока энергии) скалярного поля волны и сформулировать закон её изменения вдоль лучевых трубок.
12. Ввести в однородной среде фокусирующиеся поля в лучевых трубках и каустические поверхности в пространстве.
13. Объяснить содержание законов преломления и отражения лучей на границе раздела сред и сформулировать условия их корректности в го.
14. Сформулировать закон (Бугера) расположения траектории луча в пространстве сферически-слоистой среды и привести примеры траекторий.
15. Привести примеры траекторий лучей в плоскостной среде, найти точки поворота и каустические поверхности.
16. Привести примеры траекторий лучей в аксиально-симметричной среде в плоскостях, перпендикулярных оси и содержащих ось симметрии.
17. Привести примеры траекторий лучей в линзоподобных (фокусирующих) средах в плоскости, содержащей ось симметрии.
18. Записать условия параксиальности и привести примеры уравнений для описания параксиальных лучей в различных аксиально-симметричных средах.
19. Сформулировать математические основы матричного метода описания распространения параксиальных лучей с участием вектора-столбца координат луча (поперечных компонентов лучевого вектора и вектора смещения луча от оси).
20. Записать матрицу преобразования координат луча на участке свободного пространства (перемещения).
21. Записать матрицу преобразования координат луча на плоской границе раздела сред.
22. Записать матрицу преобразования координат луча на сферической границе раздела сред.
23. Записать матрицу преобразования координат луча тонкой линзой (сферическим зеркалом).

24. Сформулировать основные свойства матриц преобразования координат луча и объяснить их физическую природу.
25. Объяснить содержание понятия собственные лучи в периодических центрированных системах.
26. Сформулировать условие устойчивости (финитного движения) лучей в периодических центрированных системах.
27. Объяснить содержание понятия разъюстированная линия передачи и метода описания распространения лучей с помощью оператора смещения координат луча.
28. Объяснить принципы (вторичные источники) Гюйгенса и Гюйгенса-Френеля и основанные на них расчёты в задачах дифракции волн скалярного поля.
29. Объяснить принцип (вторичные источники поля) Гюйгенса-Кирхгофа и основанные на нём расчёты в задачах дифракции волн скалярного поля.
30. Объяснить электродинамический принцип (вторичные источники поля) Гюйгенса и основанные на нём расчёты в задачах дифракции электромагнитных волн на плоских объектах.
31. Объяснить содержание приближённых методов решения задач дифракции скалярного поля (приближение Кирхгофа) и электромагнитных волн (метод физической оптики).
32. Объяснить методику расчёта дифракции плоской волны на отверстии в экране и сделать оценку угловой ширину диаграммы направленности дифрагированного излучения.
33. Объяснить методику расчёта дифракции параксиального волнового пучка гауссовой формы на отверстии в экране и сделать оценки угла дифракционной расходимости и дифракционной длины дифрагированного излучения.
34. Объяснить содержание теории дифракции на отверстии в плоском экране скалярного поля в виде параксиального волнового пучка и записать дифракционную формулу Френеля.
35. Записать параболическое (диффузионное) уравнение для амплитуды поля параксиального волнового пучка в однородной среде.
36. Записать решение параболического уравнения для амплитуды поля параксиального волнового пучка и объяснить содержание понятий диффузия комплексной амплитуды и функция Грина диффузионного уравнения.
37. Объяснить содержание спектрального метода описания распространения параксиальных волновых пучков.
38. Записать соотношения между продольным и поперечными компонентами комплексной лучевой амплитуды векторного поля параксиального электромагнитного пучка.
39. Записать квазиоптический оператор преобразования поля параксиального пучка на участке свободного пространства.
40. Записать квазиоптический оператор преобразования поля параксиального пучка тонкой линзой.

41. Записать формулы преобразования ширины и интенсивности поля на оси параксиального сфокусированного пучка гауссовой формы, распространяющегося в свободном пространстве.
42. Объяснить содержание понятия и записать формулу для угловой дифракционной расходимости поля распространяющегося сфокусированного гауссова пучка.
43. Объяснить содержание понятий собственные (нормальные) типы волн или моды, элементарные ячейки и особые сечения в теории открытых цилиндрических линий (периодических центрированных систем) передачи силовых полей.
44. Записать интегральное уравнение (Фредгольма) для амплитуды поля моды открытой линзовой линии простейшего типа и преобразовать ядро уравнения к симметричному виду с помощью параметра фокусировки.
45. Объяснить свойства функций Эрмита, являющихся собственными функциями решений уравнений Фредгольма с симметричным ядром.
46. Объяснить связь поперечных структур полей мод открытой линзовой линии с собственными функциями решений уравнений Фредгольма с симметричным ядром.
49. Объяснить связь коэффициента трансформации поля моды на периоде системы и постоянной распространения ТЕМ_{np}-моды цилиндрической линии передачи с собственными значениями решения уравнения Фредгольма.

Критерии оценивания (оценочное средство - Задания)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Превосходная, отличная, хорошая или удовлетворительная подготовка. Студент на удовлетворительно или лучше отвечает на вопросы программы–минимум и основные вопросы билета, а также на большинство дополнительных вопросов
не зачтено	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий, допускает значительные ошибки при ответах на большинство дополнительных вопросов. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.

5.3.5 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-1

Комплект задач для промежуточной аттестации соответствует комплекту для текущего контроля.

5.3.6 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-2

Комплект задач для промежуточной аттестации соответствует комплекту для текущего контроля.

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Превосходная, отличная, хорошая или удовлетворительная подготовка. Студент на удовлетворительно или лучше отвечает на вопросы программы–минимум и основные вопросы билета, а также на большинство дополнительных вопросов
не зачтено	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий, допускает значительные ошибки при ответах на большинство дополнительных вопросов. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Борн М. Основы оптики / пер. с англ.: С. Н. Бреуса [и др.] ; под ред. Г. П. Мотулевич. - М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1970. - 855 с. - 85.00., 18 экз.
2. Ярив А. Введение в оптическую электронику / пер. с англ. Г. Киселева ; под ред. О. В. Богданкевича. - М. : Высшая школа, 1983. - 398 с. - 1.90., 12 экз.
3. Теория волн : [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Наука, 1990. - 432 с. : граф. - ISBN 5-02-014050-3 (в пер.) : 3.10. - Текст : непосредственный., 4 экз.
4. Бабич Василий Михайлович. Асимптотические методы в задачах дифракции коротких волн. Метод эталонных задач. - М. : Наука, 1972. - 456 с. : черт. - 1.96. - Текст : непосредственный., 3 экз.
5. Вайнштейн Лев Альбертович. Электромагнитные волны. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Радио и связь, 1988. - 440 с. : ил. - ISBN 5-256-00064-0 (в пер.) : 2.90. - Текст : непосредственный., 225 экз.
6. Маркузе Д. Оптические волноводы : пер. с англ. / под ред. [и с предисл.] В. В. Шевченко. - М. : Мир, 1974. - 576 с. : черт. - 3.03. - Текст : непосредственный., 3 экз.
7. Файн Вениамин Моисеевич. Квантовая радиофизика. - М. : Советское радио, 1965. - 608 с. : ил. - 2.02. - Текст : непосредственный., 4 экз.

Дополнительная литература:

1. Ваганов Роальд Борисович. Основы теории дифракции / АН СССР, Моск. физ. -техн. ин-т. - М. : Наука, 1982. - 272 с. : ил. - (Современные физико-технические проблемы). - 2.50., 20 экз.
2. Каценеленбаум Борис Захарович. Высокочастотная электродинамика. Основы математического аппарата. - М. : Наука, 1966. - 240 с. : черт. - 0.57., 100 экз.
3. Джеррард А. Введение в матричную оптику / пер. с англ. А. И. Божкова и Д. В. Власова ; под ред. [и с предисл.] В. В. Коробкина. - М. : Мир, 1978. - 341 с. : ил. - 2.10. - Текст : непосредственный., 2 экз.
4. Вайнштейн Лев Альбертович. Открытые резонаторы и открытые волноводы. - М. : Советское радио, 1966. - 475 с. : ил. - 2.26. - Текст : непосредственный., 4 экз.
5. Карлов Николай Васильевич. Лекции по квантовой электронике. - Изд. 2-е, испр. и доп. - М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. - 334, [1] с. : ил. - ISBN 5-02-013855-X (в пер.) : 2.20. - Текст : непосредственный., 3 экз.
6. О'Нейл Э. Введение в статистическую оптику / пер. с англ. Алексеева ; [предисл. Г.

Г.Слюсарева, П. В. Паршина] ; под ред. П. Ф. Паршина . - М. : Мир, 1966. - 254 с. - 0.98. - Текст : непосредственный., 3 экз.

7. Кравцов Юрий Александрович. Геометрическая оптика неоднородных сред. - М. : Наука, 1980. - 304 с. : ил. - 3.30. - Текст : непосредственный., 2 экз.

8. Ананьев Юрий Алексеевич. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. - М. : Наука, 1979. - 328 с. : ил. - 2.60. - Текст : непосредственный., 1 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

-

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 03.03.03 - Радиофизика.

Автор(ы): Мартынова Ольга Владимировна, кандидат физико-математических наук.

Рецензент(ы): Бакунов Михаил Иванович, доктор физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Бакунов Михаил Иванович, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 06.11.25, протокол № 04/25.