


МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой  
теоретической физики  
наименование кафедры, отвечающей за реализацию дисциплины

  
Фролов М.В.  
подпись, расшифровка подписи

\_\_\_.\_\_\_.2023 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.В.ДВ.04.02 – Методы расчета лазерных резонаторов  
Код и наименование дисциплины в соответствии с учебным планом

1. Код и наименование направления подготовки/специальности: \_\_\_\_\_  
03.03.02 – Физика

2. Профиль подготовки/специализация: \_\_\_\_\_  
" Физика лазерных и спектральных технологий "

3. Квалификация выпускника: \_\_\_\_\_ бакалавр

4. Форма обучения: \_\_\_\_\_ очная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: 0802 – теоретической физики

6. Составители программы: \_\_\_\_\_ Каменский Александр Анатольевич  
ФИО

К.ф.-М.Н. \_\_\_\_\_  
ученая степень \_\_\_\_\_ ученое звание \_\_\_\_\_

7. Рекомендована: НМС физического факультета от 25.05.2023 г. протокол № 5  
(наименование рекомендующей структуры, дата, номер протокола)

8. Учебный год: \_\_\_\_\_ 2025-2026

Семестр(ы)/Триместр(ы): \_\_\_\_\_ 6

## 9. Цели и задачи учебной дисциплины

Целями освоения учебной дисциплины являются:

- формирование знаний и практических навыков в области теоретического расчета лазерных резонаторов.

Задачи учебной дисциплины:

- изучить основные методы расчета лазерных резонаторов, освоить технику оценки параметров излучателя и параметров лазерного пучка.

## 10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Данная дисциплина входит в модуль «Дисциплины по выбору» Б1.В.ДВ.4. Студенты должны обладать знаниями дисциплин базовой части – «Математический анализ», «Дифференциальные уравнения», «Теория функций комплексного переменного», «Механика», «Электричество и магнетизм», «Оптика», «Теоретическая механика и механика сплошных сред», «Электродинамика».

## 11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:

Код	Название компетенции	Код(ы)	Индикатор(ы)	Планируемые результаты обучения
ПК-1	Способность анализировать существующие технические решения для реализации параметров разрабатываемых лазерных устройств	ПК-1.1	Демонстрация глубоких современных знаний в области технологий приборов квантовой электроники и фотоники на основе наногетероструктур	Знать: основные методы расчета лазерных резонаторов.  Уметь: применять известные методы расчета к конкретным задачам лазерной физики, направленных на проектирование лазерных резонаторов.  Владеть (иметь навык(и)): методами расчета лазерных резонаторов.
		ПК-1.2	Способность критически оценивать и интерпретировать новейшие достижения теории и практики физических исследований для решения задач в области лазерных технологий	
		ПК-1.3	Умение осуществлять поиск лазеров с близкими характеристиками в литературе и в других современных источниках информации согласно составленному плану, определять по результатам анализа литературных данных и других источников	

			информации конструкции и технологии изготовления разрабатываемых лазерных устройств	
ПК-6	Способность разрабатывать оптимальные спецификации для производства приборов квантовой электроники и фотоники на основе наноструктурных материалов по данным экспериментальных исследований и результатам анализа коммерческой информации	ПК-6.4	Умение согласовывать технические требования к параметрам разрабатываемых изделий, сроки выполнения этапов разработки, перечня и объема документации	

**12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час.** (в соответствии с учебным планом) — 2/72.

**Форма промежуточной аттестации** (зачет/экзамен) *зачет с оценкой*

### 13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость			
	Всего	По семестрам		
		6	...	...
Аудиторные занятия	42	42		
в том числе:	лекции	14	14	
	практические			
	лабораторные	28	28	
Самостоятельная работа	30	30		
в том числе: курсовая работа (проект)				
Форма промежуточной аттестации (экзамен – _ час.)	Зачет с оц.	Зачет с оц.		
Итого:	72	72		

#### 13.1. Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК*
<b>1. Лекции</b>			
1.1	Световые волны и активная среда	Световые волны. Фотоны. Оптическая когерентность. Испускание и поглощение света. Активная среда и активные центры.	–

		Принципиальные схемы уровней активных центров	
1.2	Оптические резонаторы	Лазерная генерация и оптический резонатор. Потери внутри резонатора и добротность. Мощность генерации и коэффициент усиления. Выходная мощность и оптимальные параметры. Линия усиления и резонансные частоты.	–
1.3	Твердотельные и жидкостные лазеры	Лазер на рубине, лазер на гранате с неодимом, лазеры на стёклах – схемы уровней, активные вещества, режимы генерации. Жидкостные лазеры.	–
1.4	Лазеры на основе газовых активных сред	Два типа Фотодиссоционных лазеров. Газоразрядные лазеры. Молекулярные лазеры. Плазменные лазеры. Электроионизационные лазеры. Газодинамические лазеры.	–
1.5	Эксимерные и химические лазеры.	Эксимерные лазеры, химические лазеры. – схемы уровней, активные вещества, конструктивные особенности.	–
1.6	Полупроводниковые лазеры	Энергетические зоны в полупроводниках. Полупроводниковые лазеры с накачкой электронным пучком. Инжекционные лазеры.	–
1.7	Внутрирезонансное управление спектральными характеристиками лазера	Типы оптических резонаторов. Гауссов пучок. Резонатор с вогнутыми зеркалами. Диаграмма устойчивости и неустойчивые резонаторы. Акустооптическая модуляция добротности. Пассивная модуляция добротности.	–
1.8	Генерация световых импульсов	Режимы генерации световых импульсов. Генерация последовательности импульсов с высокой частотой следования. Преобразование частоты излучения в нелинейной среде.	–
<b>2. Лабораторные занятия</b>			
2.1	Световые волны и активная среда	Световые волны. Фотоны. Оптическая когерентность. Испускание и поглощение света. Активная среда и активные центры. Принципиальные схемы уровней активных центров	–
2.2	Оптические резонаторы	Лазерная генерация и оптический резонатор. Потери внутри резонатора и добротность. Мощность генерации и коэффициент усиления. Выходная мощность и оптимальные параметры. Линия усиления и резонансные частоты.	–
2.3	Твердотельные и жидкостные лазеры	Лазер на рубине, лазер на гранате с неодимом, лазеры на стёклах – схемы уровней, активные вещества, режимы генерации. Жидкостные лазеры.	–
2.4	Лазеры на основе газовых активных сред	Два типа Фотодиссоционных лазеров. Газоразрядные лазеры. Молекулярные лазеры. Плазменные лазеры. Электроионизационные лазеры. Газодинамические лазеры.	–
2.5	Эксимерные и химические лазеры.	Эксимерные лазеры, химические лазеры. – схемы уровней, активные вещества, конструктивные особенности.	–
2.6	Полупроводниковые лазеры	Энергетические зоны в полупроводниках. Полупроводниковые лазеры с накачкой электронным пучком. Инжекционные лазеры.	–
2.7	Внутрирезонансное управление спектральными характеристиками лазера	Типы оптических резонаторов. Гауссов пучок. Резонатор с вогнутыми зеркалами. Диаграмма устойчивости и неустойчивые резонаторы. Акустооптическая модуляция добротности. Пассивная модуляция добротности.	–
2.8	Генерация световых импульсов	Режимы генерации световых импульсов. Генерация последовательности импульсов с высокой частотой следования. Преобразование частоты излучения в нелинейной среде.	–

\* заполняется, если отдельные разделы дисциплины изучаются с помощью онлайн-курса. В колонке Примечание необходимо указать название онлайн-курса или ЭУМК. В других случаях в ячейки ставятся прочерки.

### 13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (количество часов)				Всего
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	
6 семестр						
1	Световые волны и активная среда	1		2	2	5
2	Оптические резонаторы	2		4	4	10
3	Твердотельные и жидкостные лазеры	2		4	4	10
4	Лазеры на основе газовых активных сред	2		6	6	14
5	Экимерные и химические лазеры.	2		2	2	6
6	Полупроводниковые лазеры	2		4	4	10
7	Внутрирезонансное управление спектральными характеристиками лазера	2		4	4	10
8	Генерация световых импульсов	1		2	4	7
	Итого:	14		28	30	72

### 14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины: (рекомендации обучающимся по освоению дисциплины: указание наиболее сложных разделов, работа с конспектами лекций, презентационным материалом, рекомендации по выполнению курсовой работы, по организации самостоятельной работы по дисциплине и др.)

При освоении лекционного материала обучающимся необходимо понимать связь каждой лекции с предыдущими, ее место и роль в текущей главе; на занятиях рекомендуется задавать уточняющие вопросы преподавателю, домашние задания следует систематически выполнять.

### 15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины (список литературы оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ и используется общая сквозная нумерация для всех видов источников)

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Тарасов, Л.В. Четырнадцать лекций о лазерах / Л.В. Тарасов // М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 176 с.
2	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=208584">Шангина, Л. И.</a> Квантовая и оптическая электроника : учебное пособие / Л.И. Шангина .— Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012 .— 303 с. // «Университетская библиотека online» : электронно-библиотечная система. – URL: <a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=208584">http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=208584</a>

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
3	<a href="http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN5922102974.html">Быков, В.П.</a> Лазерные резонаторы [Электронный ресурс] / Быков В. П., Силичев О.О. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. — Москва : Физматлит, 2003. — 320 с. // «Университетская библиотека online» : электронно-библиотечная система. – URL: <a href="http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN5922102974.html">http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN5922102974.html</a>
4	Быков В.П. Лазерные резонаторы / В.П. Быков, О.О. Силичев // М. : Физматлит, 2004 – 320 с.
5	Ходгсон Н. Лазерные резонаторы и распространение пучков / Н. Ходгсон, Х. Вебер // М:

ДМК Пресс 2017–744 с.	
в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет)*:	
№ п/п	Ресурс
5	www.lib.vsu.ru – ЗНБ ВГУ

Вначале указываются ЭБС, с которыми имеются договора у ВГУ, затем открытые электронно-образовательные ресурсы, онлайн-курсы, ЭУМК

**16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы (учебно-методические рекомендации, пособия, задачки, методические указания по выполнению практических (контрольных), курсовых работ и др.)**

№ п/п	Источник
-------	----------

**17. Образовательные технологии, используемые при реализации учебной дисциплины, включая дистанционные образовательные технологии (ДОТ, электронное обучение (ЭО), смешанное обучение):**

**18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:**

Лекционная аудитория, аудитории для лабораторных работ, доска (мел, маркеры).

**19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций**

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
1.	Разделы 1.1 – 1.8, 2.1 – 2.8	ПК-1	ПК-1.1 ПК-1.2 ПК-1.3	Тестовые задания
		ПК-6	ПК-6.4	
Промежуточная аттестация форма контроля – зачет с оц.				Вопросы к зачету

**20. Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания**

**20.1. Текущий контроль успеваемости**

Контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

**Примеры заданий для контрольных работ**

1. Даны радиусы вогнутых зеркал:  $R_1 = 5L$ ,  $R_2 = -3L$ , где  $L$  – длина резонатора. Определить, является ли резонатор устойчивым.
2. Даны радиусы вогнутых зеркал:  $R_1 = -L$ ,  $R_2 = -L$ , где  $L$  – длина резонатора. Определить, является ли резонатор устойчивым.
3. Даны радиусы вогнутых зеркал:  $R_1 = 2L$ ,  $R_2 = \infty$ , где  $L$  – длина резонатора. Определить, является ли резонатор устойчивым.

## Описание технологии проведения

Текущая аттестация проводится в соответствии с Положением о текущей аттестации обучающихся по программам высшего образования Воронежского государственного университета. Текущая аттестация проводится в форме(ах): **устного опроса (индивидуальный опрос); письменных работ (контрольные);**.

### 20.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

#### Перечень тестовых заданий

1. К какому типу частиц по статистическим свойствам относятся фотоны?
2. Закон Бэра для прохождения света через вещество
3. Как показатель поглощения связан с эффективным сечением поглощения?
4. При каком условии активную среду считают инвертированной?
5. На рабочем переходе процессы поглощения конкурируют с процессами вынужденного испускания. Какие из них преобладают, если среда находится в инвертированном состоянии?
6. Что такое добротность резонатора, в каких единицах она измеряется?
7. Как коэффициент излучательных потерь зависит от коэффициента отражения  $R$  выходного зеркала резонатора?
8. Как коэффициент усиления зависит от заселённостей рабочих уровней?
9. На длине резонатора  $L$  укладывается целое число полуволн в количестве  $q$ . Чему равна соответствующая резонансная частота?
10. Чему равна разность между соседними резонансными частотами резонатора длины  $L$  ?
11. Сколько полуволн укладывается на длине резонатора для моды  $TEM_{mnq}$  ?
12. Какой вид накачки (импульсная, непрерывная) используется для активных сред с низкой теплопроводностью?
13. Какой вид накачки (импульсная, непрерывная) делает несущественным требование быстрого очищения нижнего рабочего уровня.
14. На сколько световых фрагментов разделено пятно (на зеркале) для поперечной световой моды  $TEM_{01}$  ?  $TEM_{11}$  ?
15. Что больше по величине (для стандартной 4-уровневой схемы лазера) – длина волны накачки или длина волны излучения генерации?
16. Какой способ накачки применяется в твердотельных лазерах?
17. Самостоятельный или несамостоятельный газовый разряд используется в электроионизационном лазере?
18. Какие атомы являются активными центрами в гелий-неоновом лазере?
19. Что является активными центрами в плазменном лазере на стронций-гелии?
20. Какой из  $CO_2$ -лазеров – газоразрядный или электроионизационный – имеет большую плотность световой мощности?
21. Какие два типа стационарных разрядов применяют в газоразрядных лазерах?
22. В аргоновом лазере скорость возбуждения верхнего рабочего уровня (при накачке) меньше, чем у нижнего. Как же достигается инверсная заселённость?
23. Энергия каких колебаний молекул (симметричных, деформационных, асимметричных) превращается в энергию когерентного оптического излучения в газодинамическом  $CO_2$ -лазере?
24. Зачем нужны добавки в газовой смеси молекулярного  $CO_2$ -лазера?
25. Что произойдёт с КПД гелий-неонового лазера, если увеличивать диаметр газоразрядной трубки?
26. Плазма находится в ионизационном режиме. Что больше – температура разряда или электронная температура?
27. Плазма находится в рекомбинационном режиме. Что больше – температура разряда или электронная температура?
28. Как в эксимерных лазерах очищается нижний рабочий уровень?

29. Дана схема энергетических уровней иона хрома для лазера на рубине. Показать рабочие уровни и переходы, соответствующие накачке.
30. Дана схема энергетических уровней иона неодима для лазера на иттрий-алюминиевом гранате. Показать рабочий переход, на который приходится максимальная интенсивность излучения лазера.
31. Дана краткая схема энергетических уровней йодного лазера. Показать рабочие уровни и переход, соответствующий накачке.
32. Дана краткая схема энергетических уровней гелий-неонового лазера. Показать рабочие переходы и переходы накачки с резонансной передачей энергией между атомами гелия и неона.
33. Дана схема энергетических уровней иона аргона (для аргонового лазера). Показать рабочий переход.
34. Дана краткая схема энергетических уровней газоразрядного CO<sub>2</sub>-лазера. Показать рабочие уровни и переходы накачки с резонансной передачей энергией между атомами азота и углекислого газа.
35. В чём основное отличие химических HF- и DF-лазеров? Какой из них генерирует излучение с большей длиной волны?
36. Что такое процесс рекомбинации в плазме?
37. Как называется полупроводник, в котором реализуется высокая концентрация электронов у нижнего края зоны проводимости?
38. Как называется полупроводник, в котором реализуется высокая концентрация дырок у верхнего края валентной зоны?
39. Какой способ накачки в полупроводниковых лазерах требует большего охлаждения – электронным пучком или электрическим током?
40. Электрон в полупроводнике совершил квантовый переход из валентной зоны в зону проводимости. Что произошло с электрон-дырочной парой?
41. Электрон в полупроводнике совершил квантовый переход из зоны проводимости в валентную зону. Что произошло с электрон-дырочной парой?
42. Какой поперечной моде в резонаторе соответствует гауссов пучок?
43. Что такое сечение перетяжки пучка, заполняющего конфокальный резонатор?
44. Где находится перетяжка пучка, если апертуры зеркал конфокального резонатора одинаковы?
45. Формула для радиуса пучка в сечении перетяжки для симметричного резонатора.
46. Резонатор телескопического типа является устойчивым или нет?
47. Присутствует ли в резонаторе телескопического типа плоская волна? ...сферическая волна?
48. При электрооптической модуляции добротности две волны, поляризованы во взаимно-перпендикулярных плоскостях. Чему равна их разность фаз после прохождения через ячейку Поккельса, на которую подаётся “полуволновое” напряжение?
49. При электрооптической модуляции поляризаторы ориентированы одинаково. Будет ли добротность минимальна или максимальна, если на ячейку Поккельса напряжение не подаётся?
50. Используется режим генерации импульсов с модуляцией добротности. В каком случае время линейного развития импульса больше – в режиме активной или пассивной модуляции?

### **Описание технологии проведения**

Промежуточная аттестация проводится в соответствии с Положением о промежуточной аттестации обучающихся по программам высшего образования.

Контрольно-измерительные материалы промежуточной аттестации включают в себя теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень полученных знаний и практическое задание, позволяющее оценить степень умения решать практические задачи. Критерии оценивания приведены выше.

### **Требования к выполнению заданий, шкалы и критерии оценивания**

Критерии оценок:

Отлично – Полное знание учебно-программного материала на уровне количественной характеристики. Способность самостоятельно ответить на дополнительные корректирующие вопросы преподавателя..

Хорошо – Знание основного программного материала на основе качественной характеристики, допускающее погрешности в ответах. Способность самостоятельно ответить на дополнительные корректирующие вопросы преподавателя.



Удовлетворительно – Знание основного программного материала на основе качественной характеристики, допускающее погрешности в ответах. Способность скорректировать ответ под руководством преподавателя.

Неудовлетворительно – Не знание основного программного материала. Неспособность скорректировать ответ под руководством преподавателя.