

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Проректор по учебной работе и  
довузовской подготовке**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Неодимовые лазеры
<b>по направлению:</b>	Ядерные физика и технологии
<b>профиль подготовки:</b>	Ядерная физика, УТС и компьютерные методы в физике Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра проблем инерционного термоядерного синтеза
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: Б.Г. Зималин, канд. физ.-мат. наук, преподаватель

Программа обсуждена на заседании кафедры проблем инерционного термоядерного синтеза 01.07.2019

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Целью курса является формирования у будущих магистров физических специальностей знаний о спектроскопических особенностях строения неодимсодержащих сред, а также принципах построения и работы неодимовых лазеров.

### Задачи дисциплины

Изучение дисциплины позволит студентам получить знания о механизмах возникновения инверсной населённости в неодимовых стёклах и кристаллах, конструктивных особенностях усилительных каскадов и способов создания в них инверсной населённости, принципах построения и работы оптических схем формирования спектральных, пространственно-временных и энергетических параметров лазеров на неодимовом стекле, а также получить представление об историческом развитии неодимовых лазерных установок, предназначенных для проведения экспериментов в области лазерного термоядерного синтеза и изучить современный уровень задач, решаемых в рамках действующих лазерных систем с неодимовыми активными средами.

Изучение механизмов возникновения нелинейно-оптических явлений, их роли в современной лазерной физике, их практическим применениям в технике физического эксперимента и серийно выпускаемых лазерных устройствах. Применение полученных знаний для экспериментальных исследований в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

## 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- спектроскопию лазерных переходов в атомах  $\text{Nd}^{3+}$ ;
- спектрально-люминесцентные, оптические и другие (радиационное время жизни, сечение усиления, теплопроводность, коэффициент термического расширения) характеристики силикатных и фосфатных неодимовых стекол;
- характеристики кристаллических активных сред  $\text{YAG:Nd}$  и  $\text{YLF:Nd}$  для неодимовых лазеров, их спектрально-люминесцентные и другие физические параметры (радиационное время жизни, сечение усиления, теплопроводность, коэффициент термического расширения);
- нелинейные и прочностные свойства лазерных стекол;
- способы и источники накачки;
- различные способы модуляции добротности резонатора, применяемые в неодимовых лазерах;
- спектр излучения лазеров на неодимовом стекле и методы управления им;
- режим усиления, балансное приближение, уравнение Франца-Нодвика;
- цели и способы формирования пространственно-угловых характеристик пучка в лазерах на неодимовом стекле;
- контраст излучения, от чего зависит контраст, методы и устройства для получения высокого контраста излучения;
- принципы построения крупномасштабной лазерной установки, ее основные системы (на примере установок Shiva, Nova, Omega, LMJ, NIF, “Кальмар”, “Прогресс”, “Дельфин”, “Луч”).

уметь:

- проводить экспериментальные исследования нелинейно-оптических процессов.
- выбирать параметры неодимсодержащих лазерных сред задающего генератора и усилительного тракта лазерной установки для оценки запасенной энергии методом сводной генерации, оценивать запасенную энергию по величине энергии свободной генерации;
- оценивать запасенную энергию усилительного тракта лазерной системы и предельные возможности энергосъёма при различных параметрах лазерного пучка;
- проводить расчёт параметров пространственно-угловых селекторов для обеспечения угловой оптической развязки между усилительными каскадами и согласования апертур пучка и оптических элементов на разных участках оптического тракта;
- оценивать допустимые паразитные отражения в ждущем режиме (в режиме накопления инверсной населенности).

владеть:

- навыками анализа и решения проблем формирования пучка в современных лазерных системах на неодимовой активной среде;
- методами управления основными параметрами лазерного пучка;
- методами измерения параметров лазерного пучка с проведением дальнейшего их анализа.
- методологией выбора адекватных методов исследования;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- основными навыками представления своих результатов на семинарах, конференциях;
- навыками освоения большого объема информации, включая работу с научной литературой;
- основными навыками написания научных статей.
- математическим моделированием физических задач.
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- экспериментальными и теоретическими методами исследования работы неодимовых лазеров.

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

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Основные параметры лазерных неодимовых сред и методы их определения	3	3		7
2	Принципы организации инверсной населённости в неодимовых средах и методы получения максимального энергосъёма	5	6		8
3	Управление параметрами лазерного пучка неодимовых лазеров	5	6		7
4	Мощные лазерные системы на неодимовом стекле для ЛТС	2			8
Итого часов		15	15		30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

##### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 2 (Весенний)

# 1. Основные параметры лазерных неодимовых сред и методы их определения

## Тема 1. Активная среда лазеров на неодимовом стекле

Введение в курс. Историческая справка. Спектроскопия лазерного перехода иона Nd. Ширина линии, сечение усиления, релаксация подуровней, люминесценция, штарковское расщепление подуровней. Спектрально-люминесцентные свойства неодимовых лазерных стёкол на силикатной и фосфатной основе.

## Тема 2. Кристаллические активные среды для неодимовых лазеров

Ширина линии, сечение усиления, релаксация подуровней, люминесценция. Термооптические характеристики. Спектральные характеристики лазеров на YAG:Nd и YLF:Nd.

## Тема 3. Нелинейные свойства и лучевая прочность активной среды

Нелинейный показатель преломления  $n_2$  активной среды, В-интеграл. Крупно- и мелкомасштабная самофокусировка, механизмы её возникновения, последствия. Допустимые значения В-интеграла с точки зрения возникновения мелкомасштабной самофокусировки. Методы борьбы с самофокусировкой. Виды разрушения оптических элементов под воздействием мощного лазерного излучения, механизмы развития оптического пробоя в прозрачных диэлектриках, методы определения лучевой прочности активной среды неодимовых лазеров.

# 2. Принципы организации инверсной населённости в неодимовых средах и методы получения максимального энергосъёма

## Тема 1. Квантовые усилители неодимовых лазеров

Конструктивное исполнение квантовых усилителей с цилиндрическими и дисковыми активными элементами, преимущества и недостатки. Причины снижения качества пучка при прохождении квантовых усилителей на неодимовой активной среде и требования к качеству изготовления активных элементов. Принципы выбора параметров квантовых усилителей и режимов их работы в зависимости от параметров лазерного пучка. Методы защиты квантовых усилителей от паразитного сброса инверсной населённости.

## Тема 2. Типы схем усиления лазерных импульсов

Однонаправленный усилитель бегущей волны, преимущества и недостатки. Двух- и четырёхпроходные схемы усиления лазерных импульсов. Методы поляризационного и углового разведения пучка в многопроходных схемах усиления. Применение ячеек Поггеля, затвора Фарадея и двулучепреломляющих пластин в многопроходных схемах усиления. Методы защиты усилительных трактов от возникновения паразитной генерации и получение высокого контраста излучения на выходе усилительного тракта. Регенеративные усилители.

## Тема 3. Источники и системы оптической накачки неодимовых лазеров

Устройство, принцип работы, маркировка, спектр, предельная энергия разряда, фактор нагрузки, спектральный КПД и ресурс импульсных ксеноновых ламп накачки. Матрицы лазерных диодов. Механизм возникновения генерации излучения в лазерных диодах. Спектральные характеристики излучения и температурный режим работы лазерных диодов. Системы теплоотвода в матрицах лазерных диодов. Сравнительная эффективность накачки импульсных ксеноновых лампам и матриц лазерных диодов. Конструктивное исполнение осветителей систем оптической накачки усилительных каскадов. Материалы, применяемые для изготовления осветителей и их отражательная эффективность. Эффективность поглощения света накачки Nd стеклом.

# 3. Управление параметрами лазерного пучка неодимовых лазеров

## Тема 1. Управление спектральными параметрами излучения лазеров на неодимовом стекле

Продольные и поперечные моды резонатора. Причины генерации нескольких продольных или поперечных мод в резонаторе. Влияние ширины линии усиления неодимовых стёкол и кристаллов на число продольных мод. Методы генерации одночастотного излучения в задающих генераторах на неодимовых активных средах: составные резонаторы, дисперсионно-селектирующие элементы, эталон Фабри-Перро, поляризационные спектрально-селектирующие элементы. Пространственное выжигание дырок в активной среде.

## Тема 2. Формирование энергетических параметров излучения лазеров на неодимовом стекле

Уравнение Франца-Нодвига. Коэффициент усиления слабого сигнала, запасённая энергия, плотность энергии насыщения, сечение усиления. Режим насыщения усиления. Режим усиления излучения по трёх- и четырёхуровневой схеме. Эффективность энергосъёма. Влияние длительности лазерного импульса на эффективность энергосъёма. Проблемы получения предельной энергии излучения на выходе современных лазерных систем на неодимовом стекле.

#### Тема 3. Формирование временных параметров излучения лазеров на неодимовом стекле

Методы генерации лазерных импульсов наносекундного и пикосекундного диапазона длительностей. Режим свободной генерации. Пассивная и активная модуляция добротности. Красители и кристаллы с центрами окраски. Режим синхронизации мод в задающих генераторах. Применение ячеек Погкельса и Керра для формирования заданной временной формы лазерного импульса. Лазерный разрядник. Временная форма импульса излучения современных лазерных установок на неодимовом стекле для проведения экспериментов в области лазерного термоядерного синтеза.

#### Тема 4. Формирование угловых параметров излучения лазеров на неодимовом стекле

Понятие расходимости излучения. Расходимость Гауссова пучка. Дифракционная расходимость пучка сформированного квадратной и круглой диафрагмой. Метод определения дифракционной расходимости. Влияние неточности изготовления формы рабочих поверхностей оптических элементов на расходимость излучения. Методы снижения расходимости излучения. Пространственный фильтр. Адаптивная оптика.

#### Тема 5. Формирование пространственных параметров излучения лазеров на неодимовом стекле

Требования к пространственным параметрам пучков современных лазерных установок на неодимовом стекле. Понятие коэффициента заполнения апертуры пучка. Причины снижения коэффициента заполнения апертуры пучка в лазерных системах. Методы компенсации неоднородного распределения коэффициента усиления излучения в лазерных системах с дисковыми активными элементами. Назначение систем аподизации лазерного пучка. Системы аподизации пучка на основе двулучепреломляющих элементов и зубчатых диафрагм. Системы формирования пространственного профиля пучка современных лазерных установок на неодимовом стекле.

### 4. Мощные лазерные системы на неодимовом стекле для ЛТС

#### Тема 1. Развитие мощных лазерных систем для ЛТС

Основные задачи научно-исследовательских программ по ЛТС. Этапы развития исследовательских программ по ЛТС. Метод прямого и непрямого облучения мишеней. Современная оценка энергии лазерного излучения для достижения положительного энергосхода при зажигании мишени. Требования к пространственно-временным параметрам излучения при облучении мишеней прямым и непрямым методом.

#### Тема 2. Принципы построения оптической схемы мощного лазера для ЛТС

Блок-схема лазерной установки. Задающий генератор, каскады предварительного усиления, главный усилительный тракт, преобразование излучения в высшие гармоники, мишенная камера, системы диагностики параметров лазерного излучения и плазмы. Схемы прямого последовательно-параллельного усиления. Схемы многопроходного усиления. Схемы с компрессией импульсов. Преимущества и недостатки различных типов схем усиления. Выбор схемы усиления в современных лазерных системах для ЛТС.

#### Тема 3. Обзор крупнейших лазерных установок для ЛТС с наносекундной длительностью импульса прошлого поколения (СССР)

Принципы построения и основные достижения в области ЛТС лазерных установок: Кальмар, Прогресс, Дельфин. Генерация первых в мире лазерных термоядерных нейтронов.

#### Тема 4. Обзор крупнейших лазерных установок для ЛТС с наносекундной длительностью импульса прошлого поколения (США)

Принципы построения и основные достижения в области ЛТС лазерных установок: Long Path Laser, Janus, Cyclops, Argus, Shiva, Pharos II, Omega, Nova. Преимущества перехода от силикатных стёкол к фосфатным, разработка методов подавления мелкомасштабной самофокусировки.

#### Тема 5. Обзор крупнейших современных лазерных установок для ЛТС с наносекундной длительностью импульса (Россия, США)

Принципы построения и основные достижения в области ЛТС лазерных установок: Луч, Beamlet, NIF. Преодоление мегаджоульного барьера ультрафиолетового излучения. Перспективы развития лазерных систем для ЛТС. Лазерный термоядерный реактор. Проект HIPER.

## **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

Учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

Использование файлов-презентаций с задачами по темам занятий.

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

### Основная литература

1. Н.Н.Рукавишников, Б.Г.Зималин . Методическое пособие «Неодимовые лазеры» Саров, 2011 г.
2. Н.Н.Рукавишников, Б.Г.Зималин. Методическое пособие «Мощные лазерные установки на неодимовом стекле». Саров, 2011 г
- 3 А.А.Мак, Л.Н.Сомс, В.А.Фромзель, В.Е.Яшин. Лазеры на неодимовом стекле М., "Наука", 1990г.
- 4 О.Звелто. Принципы лазеров. М., "Мир", 1990г.
- 5 Н.Е.Алексеев, В.П.Гапонцев, М.Е.Жаботинский, В.Б.Кравченко, Ю.П.Рудницкий. Лазерные фосфатные стёкла. М., "Наука", 1980г.
- 6.Дж.Л.Эммет, У.Ф.Крупке, Дж.Б.Тренхольм. Будущее мощных твёрдотельных лазерных систем. Квантовая электроника, т.10, №1, 1983г., стр.5-44.
7. Ландсберг Г.С Оптика. М., «Наука», 1976г.
8. А.Л.Микаэлян, М.Л.тер-Микаэлян, Ю.Г.Турков. Оптические генераторы на твёрдом теле. М., «Советское радио», 1967г.
9. М.Борн, Э.Вольф Основы оптики. М., «наука», 1973г.
10. И.С.Маршак.Импульсные источники света. М.-Л.: Энергия, 1978г.
11. С.Г.Лукишова, И.К.Красюк, П.П.Пашинин, А.М.Прохоров. Аподизация световых пучков как метод повышения яркости лазерных установок на неодимовом стекле. Труды института общей физики АН СССР, т.7, стр.92-147, 1987г.

### Дополнительная литература

1. Y.Kato, H.Yoshida, H.Fujita, S.Nakai. Temporal waveform control of laser pulse by frequency chirping. Fusion Engineering and design, 44 (1999), 427-430.
2. Справочник по лазерам, том 1. Перевод с англ. под ред. А.М.Прохорова.М., «Советское радио», 1978г.
3. В.Е.Гаврилов. Распределение энергии в спектре излучения ксеноновых импульсных трубчатых ламп. Оптика и спектроскопия, т.59, вып.2, 1985г., стр.426-431.
4. А.В.Левашкин, А.А.Мак, В.А.Фромзель. Влияние потерь в импульсной лампе на предельную эффективность лазеров на неодимовом стекле. Квантовая электроника, т.16, №1, 1989г., стр.167-170.
5. А.Р.Кузнецов, С.Г.Лунтер, А.Г.Плюхин, М.Н.Толстой, Ю.К.Фёдоров. Эффективность поглощения света ксеноновых ламп накачки неодимовым стеклом. Квантовая электроника, т.16, №10, 1989г., стр.2101-2106.
6. И.С.Байков, В.В.Безотосный. Полупроводниковые лазерные диоды. Прикладная физика, 2-95, стр.3-35.
7. K.Naito, M.Yamanaka, M.Nakatsuka, T.Kanabe, C.Yamanaka, X.Nakai. Conceptual design studies of a laser diode pumped solid state laser system for the laser fusion driver. Jpn.J.Appl.Phys., 1992, v.31, №2A, 259-273.
8. C.D.Marshall, S.A.Payne, M.E.Emanuel, L.K.Smith, H.T.powell, W.F.Krupke. Diode-pumped solid-state laser driver experiments for inertial fusion energy applications. First Annual International Conference on Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion. 31 May – 2 June 1995, Monterey, California. SPIE, v.2633, pp.282-289.
9. П.Г.Крюков, В.С.Летохов. Распространение импульса света в резонансно усиливающей (поглощающей) среде. Успехи физических наук, 1969г., т.99, вып.2, стр.169-227.
10. А Джеррард, Дж.М.Бёрч. Введение в матричную оптику. М., «Мир», 1978г.
11. C.Bibeau, J.B.trenholme, S.Payne. Pulse Length and Terminal-Level Lifetime Dependence of Energy Extraction for Neodymium-Doped Phosphate Amplifier Glass. IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.32, No.8, August 1996, pp.1487-1496.
12. Е.В.Ешметьева, В.И.Королёв, Е.П.Меснянкин, В.А.Серебряков, В.В.Шашкин, В.Е.Яшин. О предельных энергетических параметрах излучения в лазерных системах на неодимовом стекле. Квантовая электроника, т.19, №9 (1992), стр.837-841.
13. Н.Ф.Борисова и др. Формирование лазерного пучка с равномерным пространственным распределением. Квантовая электроника, т.18, №3, 1991г., стр.355-358.
14. B.M.Van Wontergherm, J.R.Murray, J.H.Campbell, et al. Performance of a prototype for a large-aperture multipass Nd:glass laser for inertial confinement fusion. Applied optics, Vol.36, No.21, July 1997, pp.4932-4953.
15. O.E.Martinez. Design of High-Power Ultrashort Pulse Amplifiers by Expansion and Recompression. IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-23, No.8, August 1987, pp.1385-1387.
16. B.C.Stuart, M.D.Perry, J.Miller, et al. 125-TW Ti:sapphire/Nd:glass laser system. Optics Letters, Vol.22, No.4, February 15, 1997, pp.242-244.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

1. <http://lib.mipt.ru/catalogue/> – электронная библиотека Физтеха.
2. <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
3. <http://benran.ru> – библиотека по естественным наукам Российской академии наук.
4. <http://www.i-exam.ru> – единый портал Интернет-тестирования в сфере образования.
5. <http://ufn.ru/> «Успехи физических наук» обзоры по актуальным физическим проблемам

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

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. Использование файлов (в формате pdf), содержащих визуальный материал для лекций в виде презентаций, а также при необходимости специализированных научных реферируемых журналов: российских (УФН, ЖЭТФ, письма в ЖЭТФ, Физика твердого тела и др) и англоязычных (Physical Review Letters, Physical Review A, Physical Review B, Journal of Chemical Physics, International Journal of Quantum Chemistry и др.), доступных через Internet. Для контроля и коррекции знаний обучающиеся могут использовать компьютерное тестирование, в том числе на портале [www.i-exam.ru](http://www.i-exam.ru).

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий курс, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные понятия и подходы к физике и оптике неодимовых лазеров, знать основные модели и их недостатки и достоинства, применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. Самостоятельная работа включает в себя:

- проработку учебного материала (по материалам лекций в виде презентации), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях,
- подготовку к практическим занятиям и экзамену.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций или контроля.

При подготовке к практическим занятиям необходимо повторять ранее изученный материал. В начале занятия, как правило, проводится короткий (10-15 минут) опрос по материалу прошедших занятий в устной или письменной форме. Так как важно добиться понимания изучаемого материала, при затруднении в восприятии материала студентам рекомендуется обращаться за консультациями к преподавателю.

Промежуточный контроль знаний проводится в виде экзамена, на котором студенту предлагается письменно ответить на теоретический вопрос, решить одну задачу и ответить на вопросы по теме курса.



**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Ядерная физика и технологии
<b>профиль подготовки:</b>	Ядерная физика, УТС и компьютерные методы в физике Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра проблем инерционного термоядерного синтеза
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** Б.Г. Зималин, канд. физ.-мат. наук, преподаватель

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

### 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Неодимовые лазеры» обучающийся должен:

#### знать:

- спектроскопию лазерных переходов в атомах  $\text{Nd}^{3+}$ ;
- спектрально-люминесцентные, оптические и другие (радиационное время жизни, сечение усиления, теплопроводность, коэффициент термического расширения) характеристики силикатных и фосфатных неодимовых стекол;
- характеристики кристаллических активных сред  $\text{YAG:Nd}$  и  $\text{YLF:Nd}$  для неодимовых лазеров, их спектрально-люминесцентные и другие физические параметры (радиационное время жизни, сечение усиления, теплопроводность, коэффициент термического расширения);
- нелинейные и прочностные свойства лазерных стекол;
- способы и источники накачки;
- различные способы модуляции добротности резонатора, применяемые в неодимовых лазерах;
- спектр излучения лазеров на неодимовом стекле и методы управления им;
- режим усиления, балансное приближение, уравнение Франца-Нодвика;
- цели и способы формирования пространственно-угловых характеристик пучка в лазерах на неодимовом стекле;
- контраст излучения, от чего зависит контраст, методы и устройства для получения высокого контраста излучения;
- принципы построения крупномасштабной лазерной установки, ее основные системы (на примере установок Shiva, Nova, Omega, LMJ, NIF, “Кальмар”, “Прогресс”, “Дельфин”, “Луч”).

#### уметь:

- проводить экспериментальные исследования нелинейно-оптических процессов.
- выбирать параметры неодимсодержащих лазерных сред задающего генератора и усилительного тракта лазерной установки для оценки запасенной энергии методом сводной генерации, оценивать запасенную энергию по величине энергии свободной генерации;
- оценивать запасенную энергию усилительного тракта лазерной системы и предельные возможности энергосъема при различных параметрах лазерного пучка;
- проводить расчёт параметров пространственно-угловых селекторов для обеспечения угловой оптической развязки между усилительными каскадами и согласования апертур пучка и оптических элементов на разных участках оптического тракта;
- оценивать допустимые паразитные отражения в ждущем режиме (в режиме накопления инверсной населенности).

#### владеть:

- навыками анализа и решения проблем формирования пучка в современных лазерных системах на неодимовой активной среде;
- методами управления основными параметрами лазерного пучка;
- методами измерения параметров лазерного пучка с проведением дальнейшего их анализа.
- методологией выбора адекватных методов исследования;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- основными навыками представления своих результатов на семинарах, конференциях;
- навыками освоения большого объема информации, включая работу с научной литературой;
- основными навыками написания научных статей.
- математическим моделированием физических задач.
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- экспериментальными и теоретическими методами исследования работы неодимовых лазеров.

### 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

### **3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков**

Формы контроля: промежуточный – домашние задания, контрольные работы – экзамен- 10семестр.

Контрольные вопросы:

#### **Раздел 1. Основные параметры лазерных неодимовых сред и методы их определения**

1. Назовите основные длины волн генерации неодимовых фосфатных и силикатных стёкол.
2. Назовите основные длины волн генерации кристаллов Nd:YAG и Nd:YLF.
3. Что такое однородное и неоднородное уширение линии люминесценции?
4. Назовите преимущества и недостатки кристаллических неодимсодержащих сред.
5. Объясните механизм возникновения мелкомасштабной самофокусировки лазерного пучка.
6. Что такое В-интеграл?
7. Назовите методы подавления самофокусировки лазерного пучка.
8. Назовите основные факторы, повышающие риск разрушения оптических элементов под действием лазерного излучения.

#### **Раздел 2. Принципы организации инверсной населённости в неодимовых средах и методы получения максимального энергосъёма**

1. Что такое суперлюминесценция?
2. Назовите методы снижения паразитной генерации лазерного излучения в усилительном тракте и внутри усилительных каскадов на неодимовом стекле.
3. Объясните принцип действия затворов Поккельса и Фарадея.
4. Приведите пример двух и четырёхпроходной схемы усиления.
5. Объясните принцип организации регенеративного усилителя.
6. Что такое фактор нагрузки импульсной газонаполненной лампы?
7. Что такое излучательный КПД источника накачки?
8. Что такое квантовый КПД?

#### **Раздел 3. Управление параметрами лазерного пучка неодимовых лазеров**

1. Объяснить принцип пассивной и активной модуляции добротности.
2. Почему при формировании лазерного пучка методом модуляции добротности необходимо продолжительное (~мкс) время развития генерации излучения в резонаторе?
3. Для чего применяется и каким образом осуществляется синхронизация мод в резонаторе?
4. Что такое составной резонатор и для чего применяется?
5. Принцип селекции мод эталоном Фабри-Перро.
6. Почему при уменьшении длительности лазерного импульса снижается эффективность энергосъёма в усилительных каскадах?
7. Что такое аподизация лазерного пучка и для чего применяется?
8. Объяснить принцип действия адаптивного зеркала.

#### **Раздел 4. Мощные лазерные системы на неодимовом стекле для ЛТС**

Рассказать об конструктивных особенностях и основных достижениях на лазерных установках:

1. Long Path Laser, Janus, Cyclops и Argus
2. Shiva
3. Pharos II
4. Omega
5. Nova
6. Beamlet
7. “Кальмар”
8. “Прогресс”
9. “Дельфин”
10. “Луч”

**Основные задачи:**

1. При каком коэффициенте усиления слабого сигнала  $K_0$  на выходе усилителя достигается плотность выходной энергии  $\varepsilon_{\text{вых}} = 10 \text{ Дж/см}^2$ . Диаметр пучка 5 см, входная энергия 1 Дж. Какова активная длина усилителя, если  $\alpha_{\text{ус}} = 0,12 \text{ см}^{-1}$ ? Плотность энергии насыщения  $4,5 \text{ Дж/см}^2$ . Воспользоваться приближением Франца-Нодвига.

Параметры усилительного каскада на Nd фосфатном стекле:

- длина активной среды  $L = 25 \text{ см}$ ;
- коэффициент усиления слабого сигнала  $K_0 = 0,06 \text{ см}^{-1}$ ;
- распределение  $K_0$  по апертуре усилителя – равномерное;
- плотность энергии насыщения  $\varepsilon_{\text{нас}} = 4,5 \text{ Дж/см}^2$ .

Параметры лазерного излучения на входе:

- распределение плотности энергии в пучке – равномерное;
- площадь пучка  $10 \text{ см}^2$ ;
- длительность усиливаемого импульса  $\approx 10 \text{ нс}$ .

2. Определить энергию лазерного пучка на выходе усилительного каскада (воспользоваться приближением Франца-Нодвига).

3. Из кристаллического кварца необходимо изготовить четвертьволновую фазовую пластинку  $\lambda/2$  на длине волны  $\lambda_1 = 1054 \text{ нм}$ . Определить минимально возможную толщину такой пластинки.

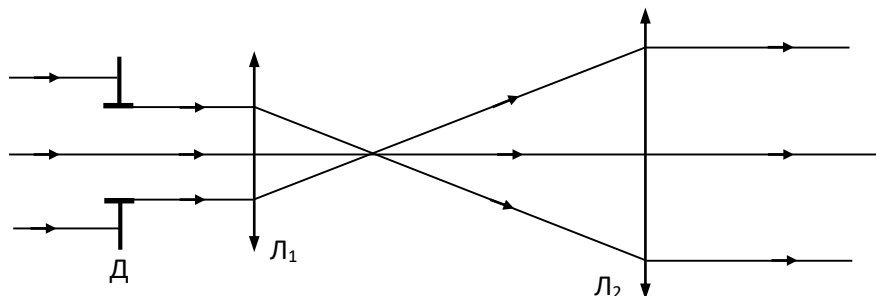
4. Интерферометр Фабри-Перро представляет плоскопараллельную пластину толщиной  $d = 5 \text{ мм}$  с показателем преломления  $n = 1,5$ . На обе грани нанесено зеркальное покрытие  $R_1 = R_2 = 80\%$  ( $\lambda_0 = 1054 \text{ нм}$ ). Определить дисперсию и резкость интерферометра. При каком минимальном угле наклона к падающему излучению  $\theta$  (плоская волна) он будет иметь пропускание  $T_{\text{max}} = 100\%$  на  $\lambda_0$ ?

5. На вход усилительного каскада подаётся лазерный импульс с энергией 4 Дж, апертура пучка - квадрат размером  $2 \times 2 \text{ см}$ , пространственный профиль интенсивности - прямоугольный. Плотность энергии насыщения активной среды  $\varepsilon_{\text{нас}} = 4.5 \text{ Дж/см}^2$ , плотность запасённой энергии  $\varepsilon_{\text{зап}} = 10.4 \text{ Дж/см}^2$ . Определить энергию лазерного импульса на выходе каскада. Считать, что процесс усиления происходит по идеальной четырёхуровневой системе.

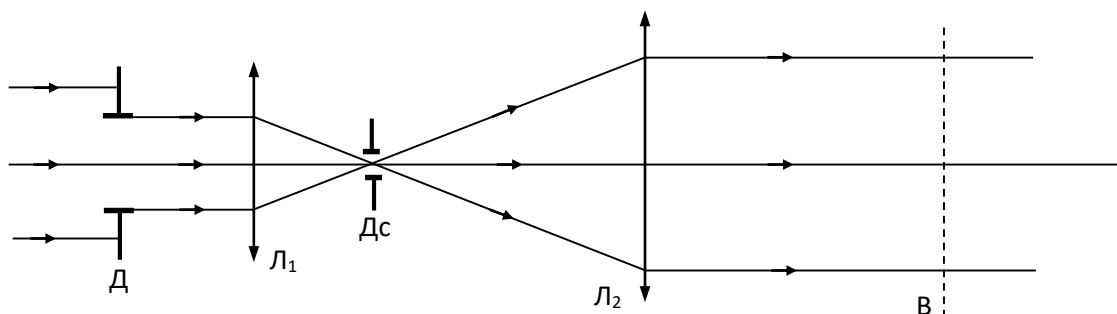
6. Усилительный каскад содержит стержень из кристалла Nd:YAG диаметром  $\varnothing 30 \text{ мм}$  и длиной  $L = 19.5 \text{ см}$ . Плотность энергии насыщения Nd:YAG –  $0.55 \text{ Дж/см}^2$ , коэффициент усиления слабого сигнала  $g_0 = 0.35 \text{ 1/см}$ . Определить коэффициент усиления  $K_0$  слабого сигнала и общую запасённую энергию в каскаде. Считать, что процесс усиления происходит по идеальной четырёхуровневой системе.

7. Требуется рассчитать минимальную длину активного элемента, выполненного из фосфатного стекла, при которой возможна работа в следующем режиме усиления: входной импульс - квадратной апертуры  $2 \times 2 \text{ см}$  с прямоугольным пространственным профилем интенсивности, энергия  $E_{\text{вх}} = 4 \text{ Дж}$ ; энергия выходного импульса  $E_{\text{вых}} = 16 \text{ Дж}$ . Плотность энергии насыщения фосфатного стекла  $\varepsilon_{\text{нас}} = 4.5 \text{ Дж/см}^2$ , коэффициент усиления слабого сигнала  $g_0 = 0.08 \text{ 1/см}$ .

8. В оптической схеме, приведённой на рисунке, формируют резкое изображение апертурной диафрагмы  $D$  размером  $10 \times 10$  мм. Перестроение изображения диафрагмы  $D$  осуществляют телескопом, образованного линзами  $F_{Л1}=1$ м и  $F_{Л2}=3$ м (телескопическая система). Расстояние между диафрагмой  $D$  и линзой  $Л1$  –  $a=0.5$  м. Определить размер и местоположение относительно линзы  $Л2$  изображения диафрагмы  $D$ , а также дифракционную расходимость  $\theta_{\text{дифр}}$  пучка на выходе телескопа. Считать, что на диафрагму  $D$  падает идеально коллимированный пучок лазера на неодимовом стекле, полностью покрывающий апертуру диафрагмы. Аберрациями и толщинами линз пренебречь.

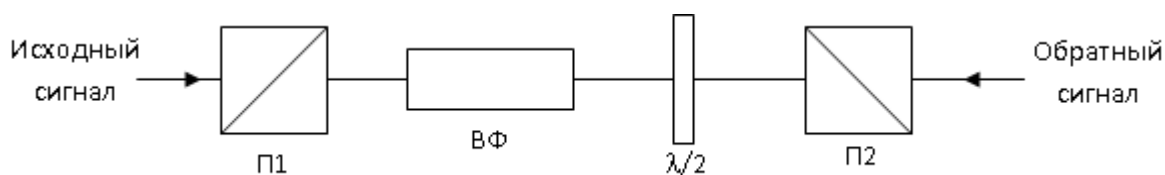


9. В оптической схеме, приведённой на рисунке, формируют пучок излучения неодимового лазера в плоскости В. Оптическая схема состоит из апертурной круглой диафрагмы  $D$  диаметром  $\varnothing 5$ мм и пространственного фильтра, состоящего из линз  $F_{Л1}=2$ м и  $F_{Л2}=4$ м (телескопическая система), и селектирующей диафрагмы  $D_c$ , расположенной между линзами в их общей фокальной плоскости. Определить размер  $d$  селектирующей диафрагмы  $D_c$ , если требуется провести угловую селекцию пучка на уровне  $3 \times \theta_{\text{дифр}}$ . Будет ли изображение диафрагмы в плоскости В резким? Считать, что на диафрагму  $D$  подаётся идеально коллимированный пучок, полностью покрывающий её апертуру. Аберрациями и толщинами линз пренебречь.



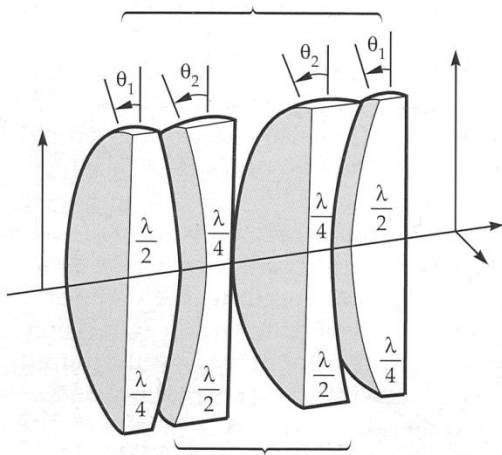
10. Дисковый усилительный каскад лазерной установки “Луч” содержит 9 слэбов. Проведённые измерения показали, что коэффициент усиления слабого сигнала  $K_0$  при некотором зарядном напряжении на батарее равен 7. Толщина каждого слэба  $d=4$  см, слэбы расположены под углом Брюстера относительно падающего излучения. Определить коэффициент усиления слабого сигнала  $g_0$ . Поглощением излучения пренебречь.

11. Затвор Фарадея, применяемый для защиты оптического тракта от обратного сигнала, состоит из двух скрещенных поляризаторов  $П1$  и  $П2$ , между которыми расположены вращатель Фарадея  $ВФ$  и фазовая пластинка  $\lambda/2$ . Определить с какой угловой точностью необходимо устанавливать ось  $z$  фазовой пластинки, чтобы через поляризатор  $П1$  в схему попадало не более 1% интенсивности излучения обратного сигнала.



### Дополнительные задачи:

1. Одним из ключевых элементов, формирующих пространственный профиль интенсивности пучка установки Beamlet, является система, состоящая из четырёх линз, выполненных из двулучепреломляющего материала. Толщины линз в центре и на краях кратны либо  $\lambda/2$  либо  $\lambda/4$  (см. рисунок). Оси  $z$  линз расположены в плоскости, перпендикулярной оптической оси системы. На вход системы подаётся линейно поляризованный в вертикальной плоскости пучок. Посредством вращения внешней и внутренней пары линз можно менять пропускание излучения на краях и в центре пучка, тем самым, например, можно вершину пучка с Гауссовым пространственным профилем интенсивности сделать плоской. Определить пропускание излучения в центре и на краях апертуры данной системы в зависимости от угла между плоскостью поляризации излучения и осями  $z$  внешней (угол  $\theta_1$ ) и внутренней (угол  $\theta_2$ ) пары линз.



2. Длина резонатора 150 см. Определить спектральный интервал между двумя соседними продольными модами резонатора на длине волны 1 мкм. Ответ привести в Гц,  $\text{см}^{-1}$ , см, мкм, нм, ангстремах.

3. Интерферометр Фабри-Перро представляет плоскопараллельную пластину толщиной  $d=5\text{мм}$  с показателем преломления  $n=1,5$ . На обе грани нанесено зеркальное покрытие  $R_1=R_2=80\%$  ( $\lambda_0=1054\text{нм}$ ). Определить дисперсию и резкость интерферометра. При каком минимальном угле наклона к падающему излучению  $\theta$  (плоская волна) он будет иметь пропускание  $T_{\text{max}}=100\%$  на  $\lambda_0$ ?

### ВОПРОСЫ к экзамену

1. Структура лазерных уровней  $\text{Nd}^{3+}$ . Времена релаксации.
2. Основные характеристики (время жизни возбуждённого состояния, ширина линии люминесценции, сечение вынужденного излучения) активной среды неодимовых лазеров на фосфатном и силикатном стекле.
3. Основные характеристики (время жизни возбуждённого состояния, ширина линии люминесценции, сечение вынужденного излучения) кристаллических активных сред ( $\text{Nd}:\text{YAG}$ ,  $\text{Nd}:\text{YLF}$ ) неодимовых лазеров.
4. Нелинейные свойства активной среды неодимовых лазеров. В-интеграл.
5. Лучевая прочность активной среды и оптических элементов неодимовых лазеров. Методы определения лучевой прочности.
6. Источники накачки неодимовых лазеров. КПД систем накачки.
7. Задающие генераторы наносекундной длительности импульса. Пассивная и активная модуляция добротности резонатора. Модулирующие устройства.
8. Методы и устройства формирования временного профиля лазерного импульса.
9. Вентиль и затвор Фарадея. Принцип работы и назначение.
10. Спектр излучения лазеров на неодимовом стекле. Продольные моды резонатора. Селекция продольных мод.
11. Селекция продольных мод с помощью интерферометра Фабри-Перро.

12. Селекция продольных мод с помощью внутрирезонаторной фазовой пластины.
13. Режим усиления. Энергия насыщения. Формула Франца-Нодвика.
14. Физические величины, характеризующие качество пучка и методы их измерения.
15. Пространственно-угловые характеристики лазерного излучения и методы их регистрации.
16. Факторы и параметры, определяющие качество пучка.
17. Адаптивные зеркала. Назначение. Принцип работы.
18. Пространственные фильтры. Назначение. Принцип работы.
19. Структурная схема, назначение и характеристика основных систем установок наносекундной длительности.
20. Многопроходные усилители. Принцип построения оптических схем многопроходного усилительного канала.

На экзамене студенту достается билет, где ему предлагается

- 1.) письменно ответить на теоретический вопрос,
- 2.) решить одну задачу и
- 3.) ответить на вопросы по теме курса.

Теоретический вопрос выбирается из набора контрольных тем, приведенных выше. Задача выбирается из списка контрольных задач, приведенных выше. Некоторые из дополнительных (уточняющих) вопросов приведены выше.

#### **4. Критерии оценивания**

Оценка «отлично (10)» выставляется обучающемуся, если он показал всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений;

оценка «отлично (9)» выставляется обучающемуся, если он показал всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений, но при этом были допущены небольшие неточности, которые были самостоятельно обнаружены и исправлены;

оценка «отлично (8)» выставляется обучающемуся, если он показал всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений, но при этом были допущены небольшие неточности, которые после указания экзаменатора были самостоятельно исправлены;

оценка «хорошо (7)» выставляется обучающемуся, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает неточности в ответе или делает несущественные ошибки при решении задач;

оценка «хорошо (6)» выставляется обучающемуся, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает небольшие ошибки в ответе и (или) при решении задач;

оценка «хорошо (5)» выставляется обучающемуся, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но отвечает неуверенно и (или) допускает ошибки при решении задач;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется обучающемуся, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, неточные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, если при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «удовлетворительно (3)» выставляется обучающемуся, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, неточные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, не владеющему некоторыми разделами учебной программы, но умеющему применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2)» выставляется обучающемуся, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач;

оценка «неудовлетворительно (1)» выставляется обучающемуся, показавшему полное незнание учебной программы дисциплины.

#### **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

При проведении экзамена студенту предоставляется 35-50 минут на подготовку ответа по выбранной теме и решению задачи. Ответ студента длится 15-25 минут. Если задача решена неправильно, студенту указывается на его ошибку и предлагается решить заново с учетом замечания.

Оценка ставится по итогам текущей успеваемости, результатам ответов на контрольные вопросы и решения контрольной задачи.

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, справочной литературой, вычислительной техникой, и своими конспектами.