

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт *высокоточных систем им. В.П. Грязева*
Кафедра «Приборы управления»

Утверждено на заседании кафедры
«Приборы управления»
« 22 » января 20 24 г., протокол № 1

Заведующий кафедрой

_____ В.В. Матвеев

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по проведению лабораторных работ по дисциплине
(модулю)
«Лазерная техника»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы бакалавриата

по направлению подготовки
12.03.03 Фотоника и оптоинформатика

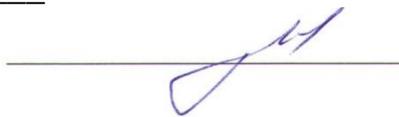
с направленностью (профилем)
Интеллектуальные фотонные системы
Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 120303-01-24

Тула 2024 год

Разработчик методических указаний:

Матвеев В.В., зав. каф., д.т.н., доц. _____



Оглавление

Лабораторная работа №1. Изучение лабораторного стенда для изучения твердотельного лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$.....	5
Управление терминалом:	6
Установка тока инжекции.....	6
Установка частоты.....	6
Установка коэффициента заполнения	6
Установка температуры.....	6
Лабораторная работа №2. Изучение процессов накачки твердотельного лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$.....	11
Физические принципы оптической накачки твердотельных лазеров.....	11
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	13
Экспериментальная установка	13
Библиографический список	19
Лабораторная работа №3. Твердотельный лазер на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$	20
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ	20
Балансные уравнения	21
Оптический резонатор. Моды резонатора	20
Типы резонаторов.....	23
Критерий устойчивости резонатора	23
Устройство и принцип работы лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$	25
Экспериментальная установка	25
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	26
Упражнение №1. Изучение принципа работы и сборка лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$, работающего на длине волны 1064 нм	26
Упражнение №2. Наблюдение пикового режима лазерной генерации на кристалле $YAG:Nd$	30
Упражнение №3. Критерий устойчивости резонатора	31
Упражнение №4. Измерение зависимости выходной мощности $YAG:Nd$ лазера от температуры (длины волны) диодного лазера накачки	31
Упражнение №5. Измерение дифференциального и полного КПД лазерной генерации.....	32
Упражнение №6. Сборка $YAG:Nd$ лазера на основе плоскопараллельного резонатора (резонатора Фабри-Перо).....	35
Упражнение №7. Сборка $YAG:Nd$ лазера на основе сферического и конфокального резонатора	35
Библиографический список	37
Лабораторная работа №4. Импульсный твердотельный лазер на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ с активной модуляцией добротности.....	15
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ	15
Дифракция Рамана-Ната и Дифракция Брэгга.....	16
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	19
Экспериментальная установка	19
Упражнение №1. Изучение принципа работы и сборка лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$, работающего на длине волны 1064 нм.....	20
Упражнение №2. Сборка $YAG:Nd$ лазера в режиме активной модуляции добротности	24
Библиографический список	27
Лабораторная работа №5. Импульсный твердотельный лазер на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ с пассивной модуляцией добротности	28
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ	28

ПАССИВНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ДОБРОТНОСТИ НА ОСНОВЕ НАСЫЩЕННОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ.....	30
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	32
Экспериментальная установка	33
Упражнение №1. Изучение принципа работы и сборка лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ работающего на длине волны 1064 нм	33
Упражнение №2. Изучение принципа работы и сборка лазера на кристалле $YAG:Nd$ работающего в режиме пассивной модуляции добротности.....	37
Упражнение №3. «Активное» управление импульсным режимом работы $YAG:Nd$ лазера с насыщающимся поглотителем.....	40
Библиографический список	42
Лабораторная работа №6. Генерация второй гармоники лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$	43
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ	43
Фазовый синхронизм.....	16
Мощность генерации второй гармоники.....	18
Нелинейные среды Кристалл калий-титанил-фосфата ($KTiOPO_4/KTP$).....	19
Кристалл бета-бората бария (BBO)	19
Кристалл ниобата лития ($LiNbO_3$)	20
Кристалл трибората лития (LBO/LiB_3O_5).....	20
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	20
Экспериментальная установка.....	21
Упражнение №1. Изучение принципа работы и сборка лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ работающего на длине волны 1064 нм	21
Упражнение №2. Генерация второй гармоники лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$.....	25
Библиографический список	28

Лабораторная работа №1. Изучение лабораторного стенда для изучения твердотельного лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$

Цель работы:

Изучение устройства и принципа работы лабораторного стенда для исследования характеристик твердотельного лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12}$, легированном ионами неодима (Nd:YAG-лазер).

Задачи:

1. Ознакомиться с устройством и основными компонентами лабораторного стенда Nd:YAG-лазера.
2. Изучить принцип работы Nd:YAG-лазера, включая процессы накачки, генерации и усиления лазерного излучения.

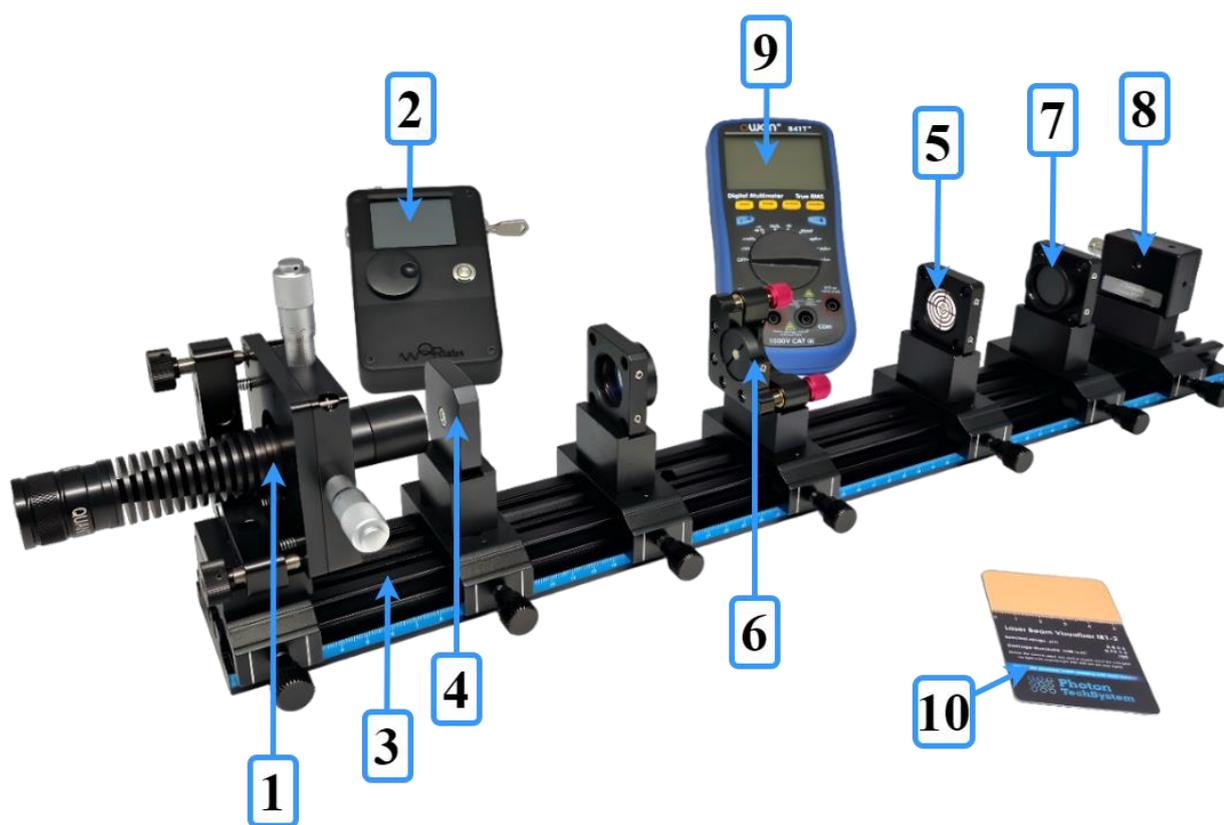
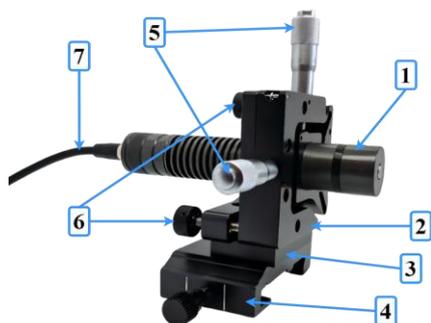


Рис. 1: Внешний вид твердотельного лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$, где (1) – диодный лазерный модуль накачки, (2) – терминал управления диодным лазерным модулем, (3) – оптический рельс, (4) – коллимирующая линза в держателе, (5) – диафрагма, (6) – активный элемент из кристалла $Y_3Al_5O_{12} : Nd$, (7) – нейтральный светофильтр, (8) – фотодетектор, (9) – мультиметр цифровой, (10) – визуализатор лазерного излучения.

Далее представлено подробное описание комплектующих лабораторного стенда LF-1001.

1 Диодный лазерный модуль

В качестве источника накачки $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ (YAG:Nd) лазера используется полупроводниковый лазер, температуру которого можно контролируемо изменять. Длина волны диодного лазера составляет 808 ± 10 нм. Максимальная выходная мощность данного лазера составляет 1 Вт.



Диодный лазерный модуль (1) устанавливается на регулируемый держатель (2), который крепится посредством установочной проставки (3) к оптической каретке (4); последняя в свою очередь крепится к оптическому рельсу. Винты высокой точности (5) используются для выравнивания оптической оси лазерного диода по отношению к механической оси установки вдоль осей X и Y. Винты (6) позволяют регулировать положение лазерного модуля по углу наклона. С помощью элемента Пельтье температура лазерного диода может изменяться в диапазоне от 15 до 50 °С. С помощью кабеля (7) лазерный диод подключается к терминалу управления.

2 Терминал управления диодным лазерным модулем

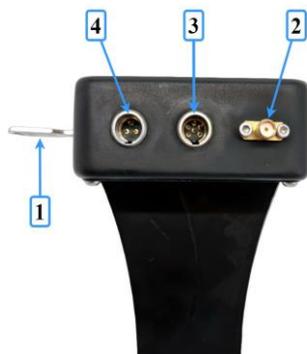
Ток инжекции, частота и ширина импульса, температура лазерного диода задаются с помощью терминала управления. Лазерный диод подключается к терминалу с помощью кабеля через специальный разъем.



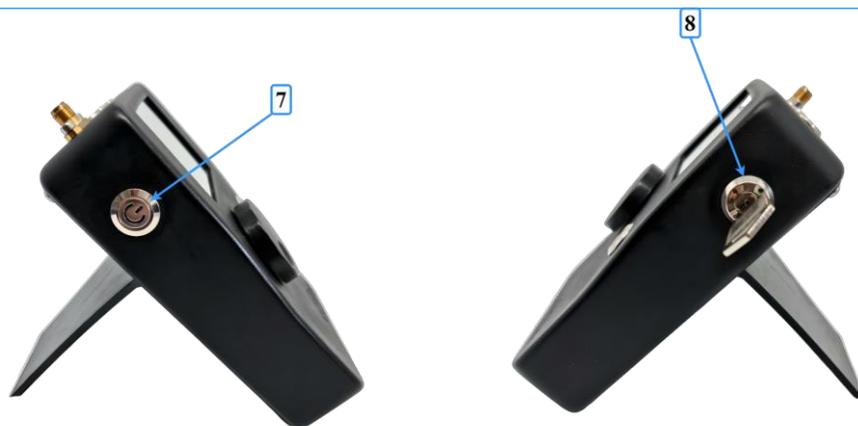
Характеристики:

- инжекционный ток: 0 – 1000 мА, шаг 10 мА;
- диапазон регулировки температуры: 15 – 50 °С;
- шаг изменения температуры: 1 °С;
- частота модуляции: 0 Гц – 2 кГц, шаг 1 Гц;

Устройство:



- 1 — Предохранительный ключ доступа
- 2 — Разъем синхронизации (SMA-F)
- 3 — Разъем питания / управления лазером
- 4 — Разъем питания
- 5 — Кнопка включения генерации
- 6 — Энкодер
- 7 — Кнопка включения питания
- 8 — Предохранительный замок



Управление терминалом:



Нажмите кнопку включения питания (7) на боковой панели терминала. Вставьте ключ доступа (1) в предохранительный замок (8) и поверните на 90° по часовой стрелке. Индикатор «ДОСТУП ЗАПРЕЩ.» изменится на «ДОСТУП РАЗРЕШ.». Нажмите кнопку (5) активации излучения. «СТАТУС ВЫКЛ» изменится на «СТАТУС ВКЛ» и индикатор статуса будет мигать зеленым и красным. По окончании работ с излучением выполнить операции в обратной последовательности.

Установка тока инъекции

Нажмите на кнопку «ТОК, мА» и установите требуемый ток в мА, вращая рукоятку энкодера. Выбираемое значение отображается в левом окне, которое выделяется синим цветом, в правом окне отображается фактическое значение (измеренное в процессе работы).

Установка частоты

Нажмите на кнопку «ЧАСТОТА, Гц» и установите требуемую частоту в Гц, вращая рукоятку энкодера. При первом нажатии на кнопку «ЧАСТОТА, Гц» один щелчок энкодера равен 1 Гц, при повторном нажатии один щелчок равен 100 Гц, следующее нажатие на кнопку возвращает предыдущий режим.

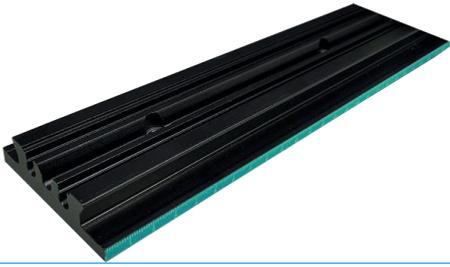
Установка коэффициента заполнения

Нажмите на кнопку «Заполнение, %» и установите требуемое заполнение в процентах, вращая рукоятку энкодера.

Установка температуры

Нажмите на кнопку «Температура, °С» и установите требуемую температуру термостатирования в °С, вращая рукоятку энкодера. Выбираемое значение отображается в левом окне, в правом фактическое значение. При необходимости активации термостабилизации следует нажать окно фактической температуры (при этом оно поменяет цвет на синий). Выключение термостатирования осуществляется также нажатием на то же окно со сменой цвета на белый.

3 Оптический рельс



Все элементы лабораторного стенда устанавливаются на оптический рельс, который позволяет перемещать их с помощью кареток с высокой точностью вдоль оптического рельса. Рельс имеет крепежные резьбовые отверстия М6 на верхней панели. Рекомендуется закрепить оптический рельс к основанию стола с помощью винтов или прижимов.

4 Коллимирующая линза в держателе



Для коллимации излучения диодного лазера накачки используется асферическая линза, закрепленная в соответствующий держатель. Фокусное расстояние линзы 13,86 мм. Торцы линзы имеют просветляющее покрытие в области 650–1100 нм. Асферическая линза (1) устанавливается в держатель (2). Последний через установочную проставку (3) крепится к каретке (4).

5 Диафрагма для настройки лазера



Диафрагма необходима для выставления оптической оси лабораторной установки. Диаметр диафрагмы составляет 25 мм. Она имеет центральное сквозное отверстие диаметром 2 мм.

Диафрагма (1) устанавливается в круглый держатель (2), который крепится в квадратный держатель (3). Последний через установочную проставку (4) устанавливается на оптическую каретку (5).

6 Активный элемент из кристалла $Y_3Al_5O_{12} : Nd$



Плоскопараллельный активный элемент (1) из кристалла $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ имеет длину и диаметр 5 мм. На торцы активного элемента нанесено просветляющее покрытие на длине волны 1064 нм. Концентрация ионов Nd^{3+} составляет 1 ат.%. Активный элемент расположен в сменном держателе (2), который крепится в регулируемый кинематический держатель (3). Последний через установочную проставку (4) крепится к каретке (5). Винты (6) позволяют регулировать положение зеркала резонатора по углу наклона.

7 Нейтральный светофильтр в держателе



Нейтральный светофильтр предназначен для ослабления интенсивности излучения для безопасной работы с фотодетектором.

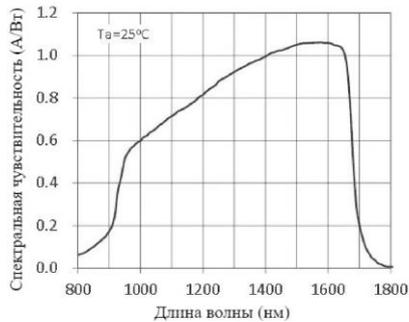
Светофильтр (1) устанавливается в круглый держатель (2), который крепится в квадратный держатель (3). Последний через установочную проставку (4) устанавливается на оптическую каретку (5).

8 Фотодетектор InGaAs в держателе



Фотодетектор на основе структуры InGaAs предназначен для детектирования интенсивности излучения накачки, генерации и люминесценции в спектральной области 800 — 1750 нм. Спектральная чувствительность фотодетектора представлена на спектре.

Фотодетектор InGaAs (1) устанавливается на оптическую каретку (2) через проставку (3). На корпусе фотодетектора расположен сигнальный разъем BNC (4) и разъем питания (5). В комплект поставки фотодетектора входит нагрузка с сопротивлением 50 Ом (6) и 10 кОм (7), кабель BNC и блок питания.



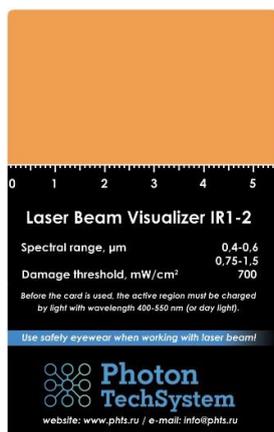
9 Мультиметр цифровой



Характеристики:

- Разрядность шкалы: 22000 отсчётов;
- Макс. измеряемое постоянное напряжение: 1000 В;
- Макс. измеряемое переменное напряжение: 750 В;
- Макс. измеряемый постоянный ток: 20 А;
- Макс. измеряемый переменный ток: 20 А;
- Макс. измеряемое сопротивление: 220 МОм;
- Макс. измеряемая ёмкость: 220 мФ;
- Макс. измеряемая частота: 220 МГц;
- Макс. измеряемая температура: 400°C.

10 Визуализатор лазерного излучения



Визуализатор предназначен для преобразования лазерного излучения в широкий диапазон длин волн в видимое излучение и позволяет контролировать ход луча для безопасной работы с лазерными системами.

Характеристики:

- Спектральный диапазон, мкм: 0,75–1,5;
- Размер зоны детектирования, мм: 30 × 54;
- Спектральная чувствительность на длине волны 808 нм: 1 мВт/мм²;
- Спектральная чувствительность на длине волны 1064 нм: менее 5 мВт/мм²;
- Порог разрушения, мВт/мм²: >700;
- Цвет свечения: оранжевый;
- Необходима зарядка дневным светом: Да.

11 Фокусирующая линза в держателе



Для фокусирования излучения диодного лазера накачки в активный элемент из кристалла $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ используется двояковыпуклая линза (1) с фокусным расстоянием 60 мм. Линза (1) устанавливается в круглый держатель (2), который крепится в квадратный держатель (3). Последний через установочную проставку (4) устанавливается на оптическую каретку (5).

12 Каретки для оптического рельса



Все элементы $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ лазера установлены на оптические каретки, которые позволяют перемещать их с высокой точностью вдоль оптического рельса. Каретка имеет крепежные резьбовые отверстия М4 и М6 на верхней панели. Каретка фиксируется на оптическом рельсе с помощью прижимного винта.

13 Лазерные защитные очки 1064



Очки предназначены для безопасной работы с лазерным излучением накачки на длине волны 808 нм и генерации на длине волны 1064 нм.

- Рабочий спектральный диапазон, нм: 630 – 1400;
- Степень защиты: L3.

14 Набор для чистки оптики



Набор для чистки оптики состоит из груши, безворсовых палочек и чистящей жидкости.

Лабораторная работа №2. Изучение процессов накачки твердотельного лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$

Цель работы: изучить физические принципы работы и схему накачки твердотельного лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$

Принадлежности: полупроводниковый лазерный диод, коллиматор, объектив, активный элемент из кристалла $Y_3Al_5O_{12} : Nd$, светофильтр, фотодетектор, диафрагма, визуализатор, оптический рельс, мультиметр.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В качестве активной среды в твердотельных лазерах выступают диэлектрические кристаллы и стекла, активированные редкоземельными (РЗ) или переходными ионами. Лазерная генерация в твердотельных лазерах обусловлена вынужденными переходами между энергетическими уровнями ионов активаторов. Важно отметить, что первый лазер был твердотельным. Он был создан Мейманом в 1960 году на кристалле рубина. Кристалл рубина представляет собой оксид алюминия (Al_2O_3), в котором около 0,05% атомов алюминия замещены ионами хрома Cr^{3+} . Лазерная генерация с длиной волны излучения 694 нм получена на переходе ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$ ионов Cr^{3+} . В настоящее время вынужденное излучение различных частот получено более чем на 250 кристаллах и около 20 видов стекол, активированных редкоземельными и переходными ионами. Одним из наиболее распространенных кристаллов, который используется в качестве активной среды твердотельных лазеров является алюмо-иттриевый гранат ($Y_3Al_5O_{12} : Nd$), активированный ионами Nd^{3+} .

В настоящей лабораторной работе изучаются физические принципы работы и схема полупроводниковой лазерной накачки твердотельного лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ (YAG:Nd).

Физические принципы оптической накачки твердотельных лазеров

Для создания инверсной населённости активной среды лазера используются различные механизмы. В твердотельных лазерах используется оптическая накачка. Она может быть реализована воздействием на активную среду излучением мощных газоразрядных ламп-вспышек, излучением других лазеров, либо сфокусированным солнечным излучением.

В настоящее время для твердотельных лазеров широкое распространение получила оптическая накачка, которая реализуется с помощью мощных полупроводниковых лазерных диодов, диодных линеек и матриц. Такой способ накачки стал актуальным после появления высокоэффективных (КПД > 60%) полупроводниковых лазеров. Спектральная ширина диодных лазеров может составлять ~ 1 нм, что обеспечивает хорошее согласование спектра излучения полупроводникового лазера со спектром поглощения иона-активатора в активной среде твердотельного лазера.

Следует заметить, что в соответствии с принципом детального равновесия получить инверсную населенность в двухуровневой системе нельзя, поэтому в твердотельных лазерах исполь-

зуются либо трёх-, либо четырёхуровневые схемы накачки, показанные на рис. 2.

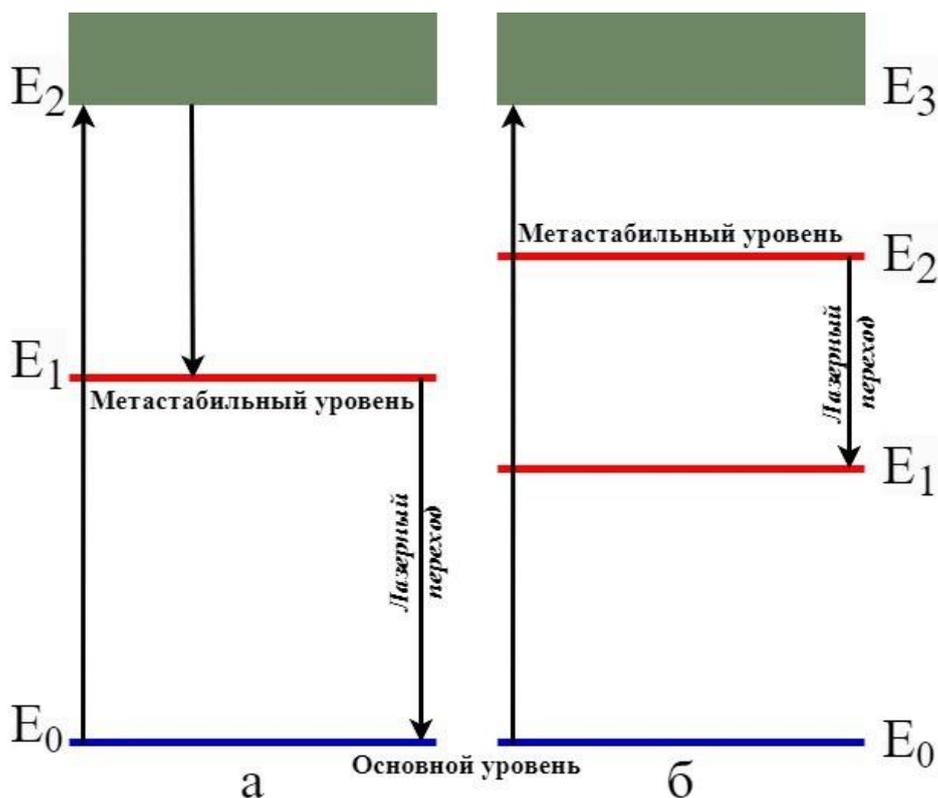


Рис. 2: Трёхуровневая (а) и четырёхуровневая (б) схемы накачки активной среды лазера.

Например, трёхуровневая схема накачки активной среды используется, в рубиновом лазере. Как отмечалось выше, рубин представляет собой кристалл корунда Al_2O_3 , активированный ионами Cr^{3+} . Лазер на кристаллах $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Cr}$ работает по трёхуровневой схеме. Под действием оптической накачки ион Cr^{3+} переходит из основного состояния с энергией E_0 в возбуждённое состояние с энергией E_2 . В этом состоянии он находится относительно недолго (порядка 10^{-8} с). Затем происходит безызлучательный переход на метастабильный уровень E_1 , время жизни которого $\sim 10^{-3}$ с. Как только будет достигнута инверсная населенность между уровнями E_1 и E_0 , спонтанно испущенные фотоны могут инициировать вынужденное излучение и, если усиление в активной среде превзойдет потери, то в ней возникнет лазерная генерация.

В твердотельном лазере на кристалле $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Nd}$ при получении лазерной генерации на ионах неодима Nd^{3+} используется четырёхуровневая схема накачки. В этом случае между метастабильным E_2 и основным уровнем E_0 имеется промежуточный — рабочий уровень E_1 . Вынужденное излучение возникает при переходе иона Nd^{3+} с уровня E_2 на уровень E_1 . Преимущество этой схемы заключается в том, что в данном случае легко выполнить условие инверсной населенности, так как время жизни верхнего рабочего уровня (E_2) на несколько порядков больше времени жизни нижнего уровня (E_1).

Подобная схема позволяет создавать мощные лазеры, работающие в непрерывном режиме. Лазеры, работающие по четырёхуровневой схеме накачки, имеют по сравнению с лазерами, работающими по трёхуровневой схеме накачки более низкое значение квантового КПД, который определяется как отношение энергии излученного фотона к энергии поглощенного фотона накачки ($\eta = \frac{h\nu_{\text{изл}}}{h\nu_{\text{нак}}}$).

Энергетическая схема уровней ионов Nd^{3+} показана на рис. 3.

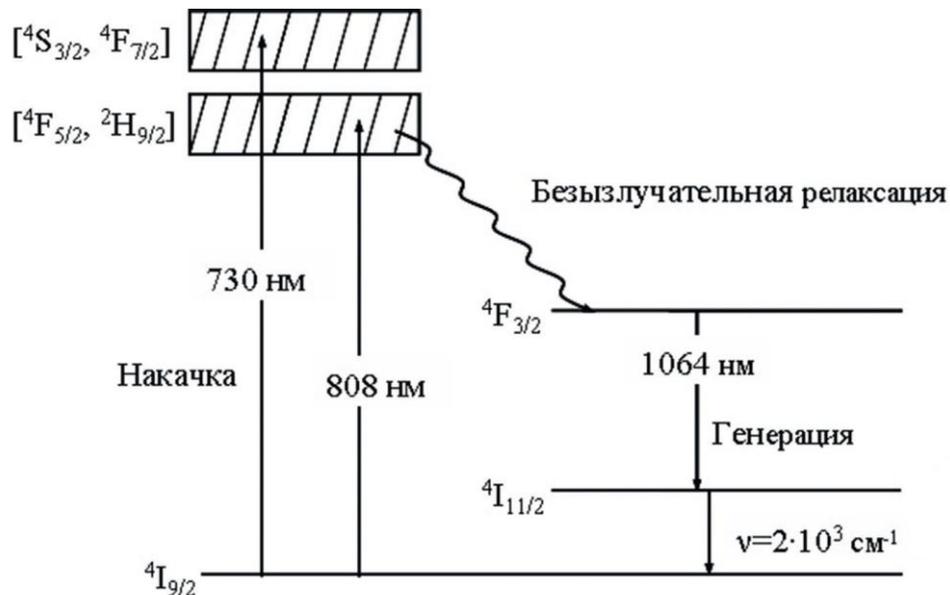


Рис. 3: Энергетическая схема энергетических уровней ионов Nd^{3+} .

Используя схему, показанную на рис. 3, рассмотрим процесс возникновения лазерной генерации на переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ионов Nd^{3+} в кристаллах $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Nd}$.

При использовании полупроводникового лазера с длиной волны излучения ~ 800 нм, ионы Nd^{3+} переходят из основного состояния ${}^4I_{9/2}$ на возбужденный уровень ${}^4F_{5/2}$, затем безызлучательно релаксируют на верхний лазерный уровень ${}^4F_{3/2}$. Лазерная генерация с длиной волны 1.06 мкм осуществляется на переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ионов Nd^{3+} .

Целью настоящей работы является определение контура спектра поглощения для перехода ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$ ионов Nd^{3+} , который задействован в процессе оптической накачки лазера на кристалле $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Nd}$ лазерным диодом. Также необходимо определить значение длины волны излучения лазерного диода, наиболее оптимальной для осуществления оптической накачки.

Методика, используемая в настоящей работе для получения спектра поглощения ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$ ионов Nd^{3+} в кристаллах $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Nd}$ основана на явлении зависимости длины волны излучения полупроводникового лазерного диода от температуры.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Внимание!

- 1) Перед началом сборки экспериментальных установок внимательно изучите устройство и порядок включения всех компонент лазера в разделе «Комплектация».
- 2) При работе с лазерным излучением обязательно используйте лазерные защитные очки.
- 3) После установки положения каждого элемента лазера на рельсе, зафиксируйте их с помощью прижимных винтов на оптической каретке.

Экспериментальная установка

Внешний вид экспериментальной установки для определения контура спектра поглощения перехода ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$ ионов Nd^{3+} в кристалле $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Nd}$ показан на рис. 4. Основными компонентами установки являются диодный лазерный модуль накачки (1), терминал управления диодным лазерным модулем (2), оптический рельс (3), коллимирующая линза в держателе (4), диафрагма (5), активный элемент из кристалла $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Nd}$ (6), диафрагма для настройки лазера (7), нейтральный светофильтр (8), фотодетектор (9), мультиметр цифровой (10), визуализатор лазерного излучения (11).

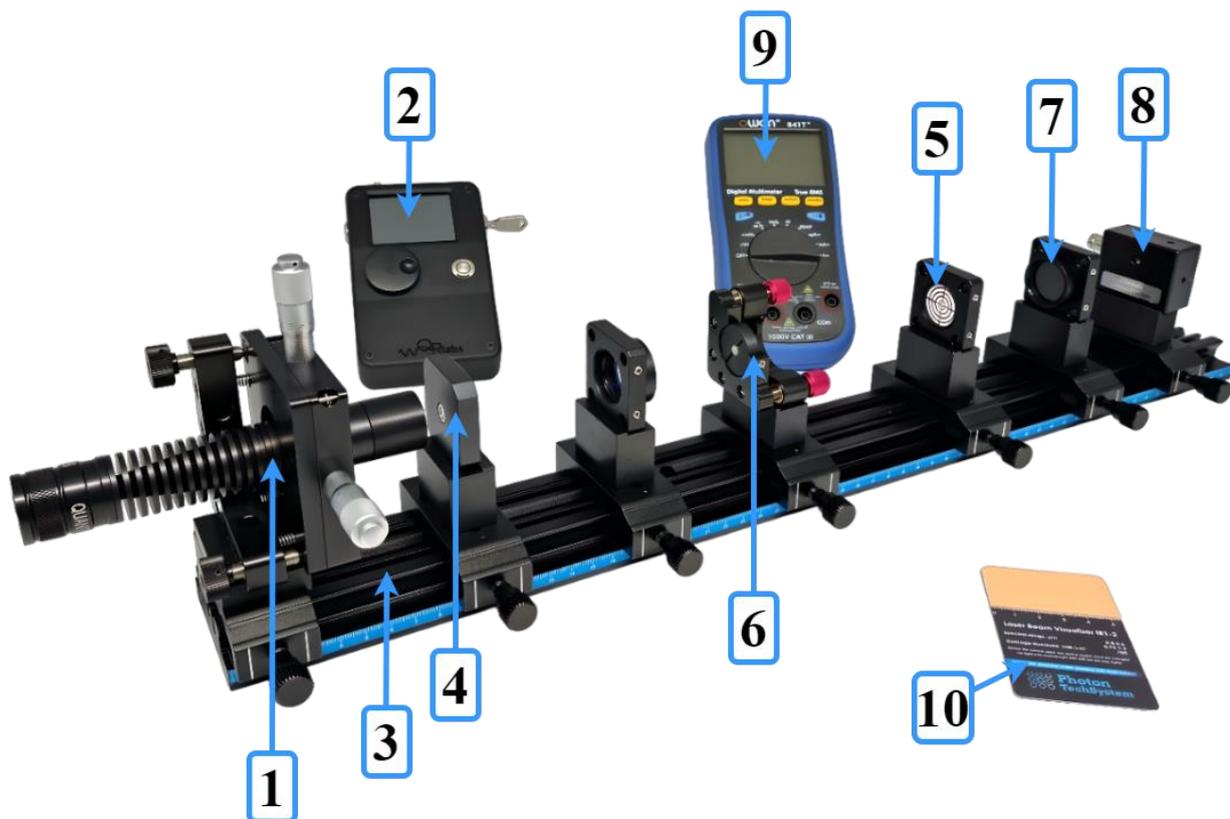


Рис. 4: Внешний вид экспериментальной установки для определения контура спектра поглощения соответствующего переходу ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$ ионов Nd^{3+} в кристалле YAG:Nd .

Упражнение №1. Определение контура спектра поглощения, соответствующего переходу ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$ ионов Nd^{3+} в кристалле YAG:Nd

Соберите экспериментальную установку так как показано на рис.4 согласно методике, представленной ниже.

- 1) Закрепите рельс к оптическому столу или другому жёсткому основанию с помощью винтов М6 и шестигранной отвертки.
- 2) Установите на край оптического рельса диодный лазер накачки в держателе. Далее установите диафрагму на расстоянии около 6 см от диодного лазера накачки (рис. 5).



Рис. 5: Установка оптической оси лабораторного станда.

- 3) Включите в сеть терминал управления диодного лазера, настройте непрерывный режим работы лазера установив значения частоты 0 Гц и заполнения 100%. Для безопасной работы с лазерным излучением воспользуйтесь защитными лазерными очками.
- 4) Установите ток инжекции диодного лазера накачки равный 270 мА и включите лазер. Вращая регулировочные винты держателя лазера накачки, убедитесь, что излучение примерно попадает в центр диафрагмы. Контроль положения и формы луча осуществляйте с помощью визуализатора лазерного излучения. Переместите диафрагмы на противоположный от диодного лазера конец рельса и также проверьте попадание излучения в центр диафрагмы.
Обратите внимание на особенность диодных лазеров, связанную с большой расходимостью лазерного луча.
- 5) Установите коллиматор на расстоянии 13,86 мм от диодного лазера накачки. Изменяя расстояние между коллиматором и лазерным модулем накачки, добейтесь коллимированного лазерного пучка, т.е. плоскопараллельного пучка, который практически не изменяет своей формы на всей длине оптического рельса. Для контроля формы лазерного пучка накачки используйте визуализатор, возвратно перемещая его вдоль оптического рельса (рис. 6).

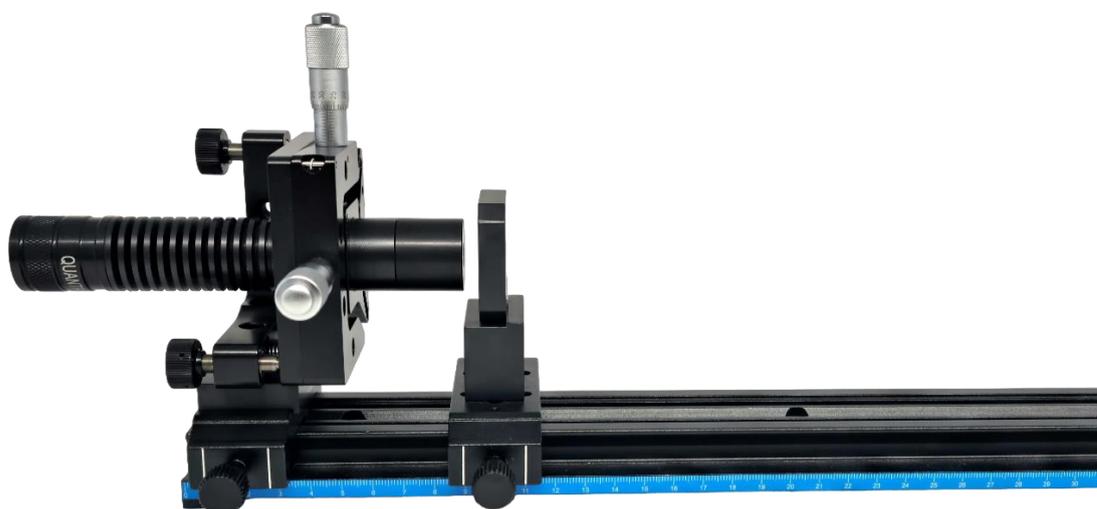


Рис. 6: Настройка положения коллиматора.

- 6) Установите диафрагму с мишенью после коллиматора на расстоянии около 6 см (рис. 7). С помощью юстировочных винтов держателя полупроводникового лазерного модуля добейтесь того, чтобы коллимированное излучение лазера попадало в центры диафрагмы. Переместите диафрагмы на противоположный от диодного лазера конец рельса и также проверьте попадание излучения в центр диафрагмы.



Рис. 7: Настройка положения коллиматора.

- 7) Увеличьте расстояние между коллиматором и лазерным модулем до 15-18 мм, так чтобы получилось сфокусированное излучения с фокусом примерно в середине оптического рельса. Проверьте чтобы излучение также попадало в центр диафрагмы. Запомните положение фокуса излучения диодного лазера.
- 8) Далее установите активный элемент в фокус лазерного пучка (рис. 8). Запомните положение каретки с активным элементом на оптическом рельсе с помощью шкалы.

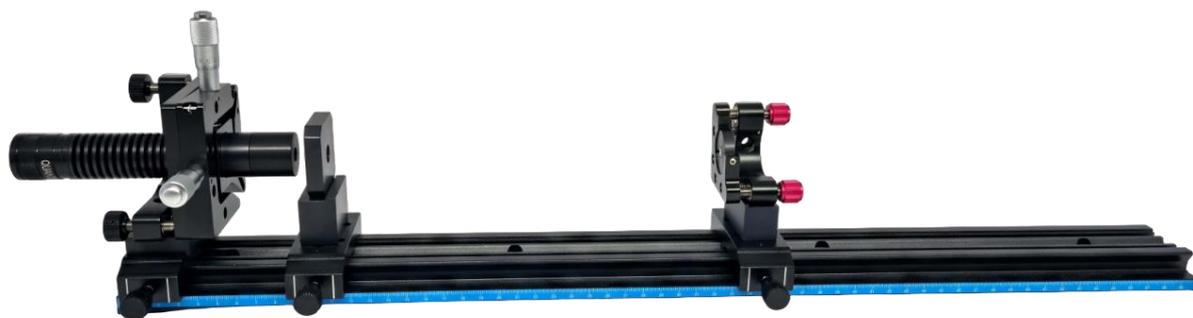


Рис. 8: Установка активного элемента.

- 9) Установите диафрагму между коллиматором и активным элементом. После активного элемента установите фотодетектор ближе к краю оптического рельса для измерения интенсивности излучения лазера (рис. 9). С помощью визуализатора проверьте чтобы излучение лазера попадало на активную область фотодетектора.

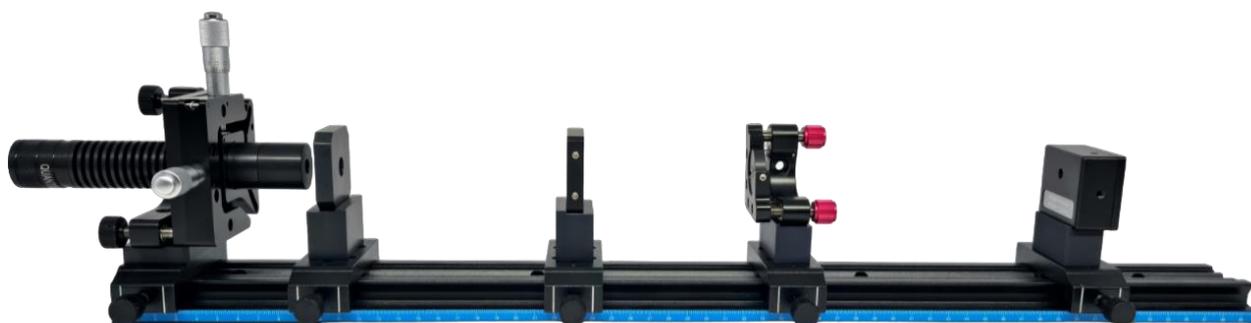


Рис. 9: Установка фотодетектора.

- 10) Соедините фотодетектор с мультиметром с помощью кабеля типа banana. Установите на мультиметре режим измерения напряжения.
- 11) Установите нейтральный светофильтр для ослабления излучения после активного элемента (рис. 10).



Рис. 10: Установка нейтрального светофильтра.

- 12) Установите значение тока инжекции полупроводникового лазера 460 мА. Изменяя значение температуры в интервале от 18°C до 50°C через 2°C измерьте с помощью фотодетектора интенсивность I излучения лазера прошедшую через кристалл YAG:Nd. Повторите измерение не менее 3 раз. Найдите среднее значение интенсивности излучения. Запишите полученные значения в таблицу №1.

Таблица 1: Один из вариантов оформления таблицы с экспериментальными данными.

T, °C	I_1 , мВ	I_2 , мВ	I_3 , мВ	$\langle I \rangle$, мВ	I_{01}	I_{02}	I_{03}	$\langle I_0 \rangle$, мВ	D
18									
20									
22									
...									
50									

- 13) Аккуратно снимите держатель со стержнем из кристалла YAG:Nd с оптического рельса.
- 14) Изменяя значение температуры в интервале от 18°C до 50°C через 2°C измерьте с помощью фотодетектора интенсивность I_0 излучения лазера падающую на кристалл YAG:Nd. Повторите измерение не менее 3 раз. Найдите среднее значение интенсивности излучения. Запишите полученные значения в таблицу №1.
- 15) Постройте график зависимости оптической плотности $D = \lg \frac{\langle I_0 \rangle}{\langle I \rangle}$ от температуры T. Примерный вид контура спектра поглощения соответствующего переходу ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$ ионов Nd^{3+} в кристалле YAG:Nd представлен на рис. 11 наблюдаемые пики соответствуют длинам волн 804.4 нм и 808.4 нм.

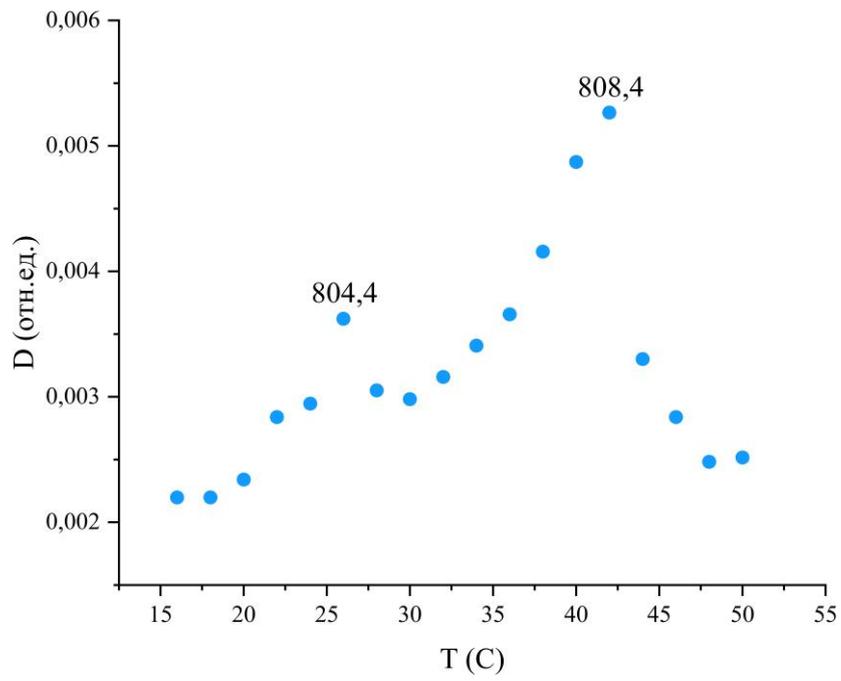


Рис. 11: Контур спектра поглощения соответствующего переходу ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$ ионов Nd^{3+} в кристалле YAG:Nd .

Библиографический список

- 1) Лабораторный практикум по физике лазеров / П.А. Рябочкина, А.А. Ляпин – Изд. 2-е доп. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2020. – 96 с.
- 2) Звелто О. Принципы лазеров: Пер. с англ.- 3-е перераб. и доп. 3 изд. -Москва: Мир, 1990. -560 с., ил.
- 3) Айрапетян, В.С. Физика лазеров [Текст]: учебное пособие / В.С. Айрапетян, О.К. Ушаков. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 134 с.
- 4) Ю.Айхлер, Г.-И. Айхлер. Лазеры. Исполнение, управление, применение: Пер. с англ. – Москва: Техносфера, 2008. – 440 с.
- 5) Кулешов, Н.В. Активные среды твердотельных лазеров: учебно-методическое пособие по дисциплинам «Твердотельные лазерные системы» и «Теория и расчет лазеров» / Н.В. Кулешов, А.С. Ясюкевич. – Минск: БНТУ, 2010 – 134 с.

Лабораторная работа №3. Твердотельный лазер на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$

Цель работы: изучить физические принципы работы лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$, собрать макет этого лазера и получить зависимость выходной мощности $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ лазера от тока инжекции полупроводникового лазера накачки.

Принадлежности: полупроводниковый лазерный диод, коллиматор, набор объективов, активный элемент из кристалла $Y_3Al_5O_{12} : Nd$, входное плоское зеркало резонатора, набор выходных сферических зеркал резонатора с различным пропусканием, светофильтр, фотодетектор, терминал сопротивлений, осциллограф, диафрагма, визуализатор, оптический рельс, нож Фу-ко, визуализатор.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространенных коммерческих лазеров, который широко применяется в промышленных технологиях, медицине, при проведении научных исследований является твердотельный лазер на кристалле иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами Nd^{3+} . Кристаллы иттрий-алюминиевого граната активированного ионами Nd^{3+} ($Y_3Al_5O_{12} : Nd$), обладают уникальным сочетанием спектрально-люминесцентных, механических и тепловых свойств, что обеспечило их привлекательность в качестве активной среды твердотельных лазеров.

Лазерная генерация на длине волны 1.06 мкм в кристаллах $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ осуществляется на переходе $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2}$ ионов Nd^{3+} . При использовании газоразрядных ламп осуществляется накачка осуществляется на уровни, расположенные выше уровня $4F_{3/2}$, с которых затем происходит безызлучательная релаксация на верхний лазерный уровень $4F_{3/2}$ ионов Nd^{3+} . Полупроводниковая лазерная накачка осуществляется на уровень $4F_{5/2}$, с которого возбуждение безызлучательно релаксирует на верхний лазерный уровень $4F_{3/2}$.

В твердотельном лазере на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ при получении лазерной генерации на ионах неодима Nd^{3+} используется четырёхуровневая схема накачки.

Схема энергетических уровней ионов Nd^{3+} , участвующих в процессе лазерной генерации на переходе $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2}$, показана на рис. 2.

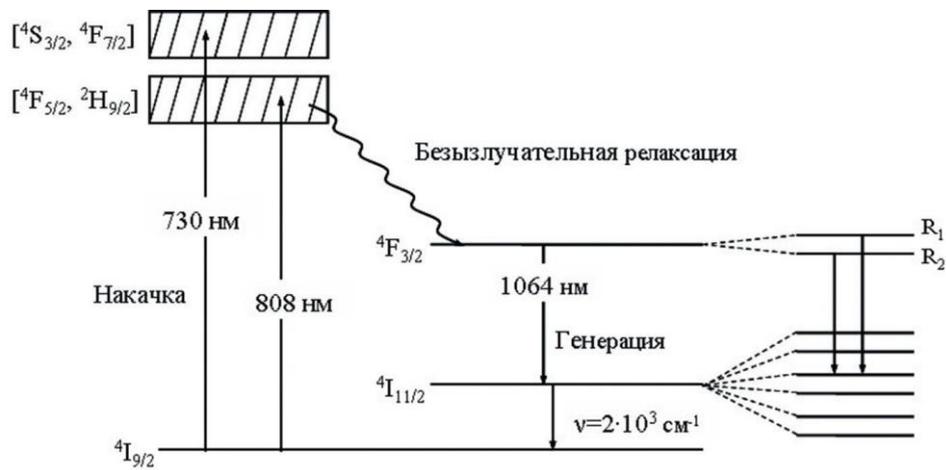


Рис. 2: Энергетическая схема энергетических уровней ионов Nd^{3+} , участвующих в процессе лазерной генерации на переходе $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2}$.

В настоящее время имеются в наличии коммерческие полупроводниковые лазеры и линейки полупроводниковых лазерных диодов, которые используются в качестве источников оптической накачки для получения лазерной генерации с длиной волны излучения 1064 нм на переходе $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2}$ ионов Nd^{3+} в кристаллах $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Nd}$.

При использовании полупроводникового лазера с длиной волны излучения ~ 800 нм, ионы Nd^{3+} переходят из основного состояния $4I_{9/2}$ на возбужденный уровень $4F_{5/2}$, затем безызлучательно релаксируют на верхний лазерный уровень $4F_{3/2}$. Лазерная генерация с длиной волны 1064 нм осуществляется на переходе $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2}$ ионов Nd^{3+} .

Балансные уравнения

При описании физических процессов, происходящих в лазере, преимущественно пользуются полуклассическим подходом. Сущность этого подхода заключается в том, что электромагнитное поле описывается в рамках классической физики с помощью уравнений Максвелла, а поведение атомов рассматривается квантовомеханически на основе уравнения Шрёдингера. В общем случае амплитуды векторов напряжённости электромагнитного поля и амплитуды атомных состояний зависят от времени и координат. Однако многие физические процессы, характерные для лазера, можно понять и количественно описать, используя упрощённую теорию, основанную на приближении балансных уравнений. В этих уравнениях вместо векторов напряжённости электрического и магнитного полей применяют объёмные плотности электромагнитной энергии или пропорциональные им числа фотонов, а вместо амплитуд атомных состояний, являющихся комплексными величинами, используют квадраты их модулей или пропорциональные им населённости соответствующих уровней атомов. Дополнительно производят усреднение этих величин по пространственным координатам внутри резонатора. При таком упрощённом подходе работу лазера можно описать с помощью системы обыкновенных дифференциальных уравнений, зависящих от времени, переменными величинами в которых являются числа атомов на различных уровнях и число фотонов в резонаторе. Достоинство этого подхода заключается в том, что он даёт простое и наглядное описание работы лазера.

Для простоты примем, что активная среда лазера характеризуется только одной полосой поглощения в области накачки. Кроме того, будем считать, что лазер генерирует только на одной моде резонатора. Рассмотрим трёхуровневую схему работы лазера, которая показана на рис. 3.

Обозначим концентрации атомов на уровнях 1, 2, 3 соответственно через N_1 , N_2 , N_3 , а число фотонов в резонаторе — через M . В процессе накачки ионы примесных центров активной среды лазера переходят с основного уровня 1 на уровень 3, с которого осуществляется быстрая релаксация на уровень 2. Тогда приближенно можно положить $N_3 \approx 0$.

Кинетические уравнения, описывающие баланс числа фотонов и числа частиц в резонаторе, при сделанных выше предположениях имеют вид:

$$N_1 + N_2 = N, \tag{1}$$

$$\dot{N}_2 = QN_1 - BM(N_2 - N_1) - \frac{N_2}{\tau_a}, \tag{2}$$

$$\dot{M} = V_0 MB(N_2 - N_1) - \frac{M}{\tau_0}. \tag{3}$$

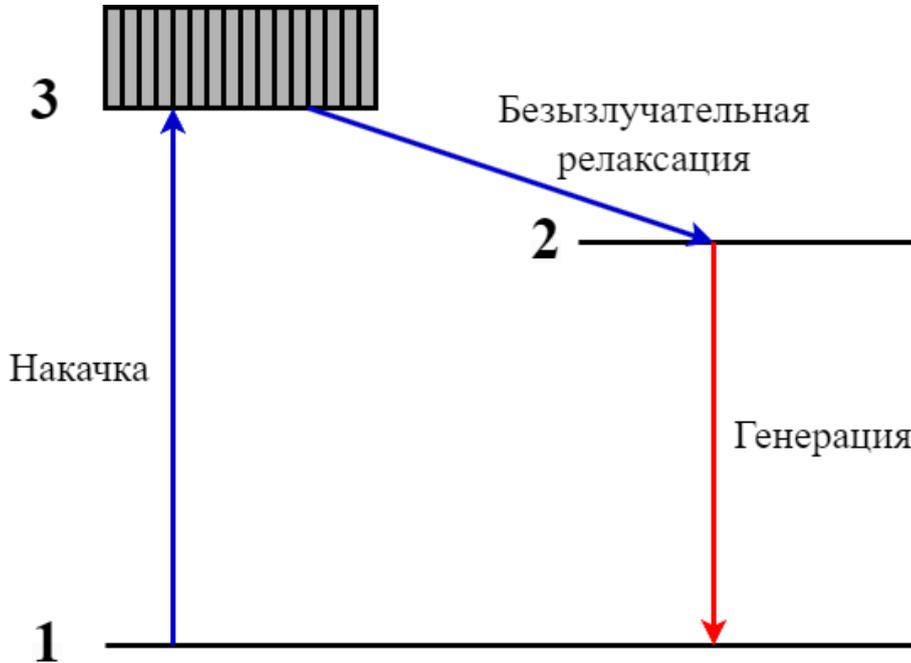


Рис. 3: Трёхуровневая схема накачки активной среды лазера

В уравнении (1 – 3), N — полная концентрация атомов примеси в активной среде, величина Q — скорость некогерентной накачки, размерность $[Q] = \frac{1}{c}$. В общем случае $Q = Q(t)$. Произведение QN_1 (QN_0) определяет число атомов, совершивших переходы с уровня 1 на уровень 3 в единицу времени. В тех же уравнениях B - скорость вынужденного излучения (поглощения), т.е. число испущенных (поглощённых) фотонов в единицу времени в расчёте на один фотон, находящийся в резонаторе. Произведение BMN_2 — определяет число атомов, переходящих с уровня 2 на уровень 1 вследствие вынужденного излучения. Величина τ_a — время жизни верхнего лазерного уровня.

В уравнении (3), V_0 - объём, занимаемый модой внутри активной среды. В общем случае он не совпадает с объёмом резонатора. Величина τ_0 — время жизни фотона в резонаторе. Смысл слагаемого V_0BMN_2 аналогичен смыслу слагаемого BMN_2 . Произведение V_0N_2 определяет число активных атомов на уровне 2, участвующих в генерации данной моды.

Для лазера, работающего по четырёхуровневой схеме (рис. 3), концентрации атомов на уровнях 0, 1, 2, 3 аналогично случаю, рассмотренному выше, обозначим как N_0, N_1, N_2, N_3 . В рассматриваемой схеме происходит быстрая безызлучательная релаксация с уровня 3 на уровень 2 и с уровня 1 на уровень 0, соответственно. Поэтому, как и ранее, можно приближенно принять, что $N_1 \approx N_3 \approx 0$.

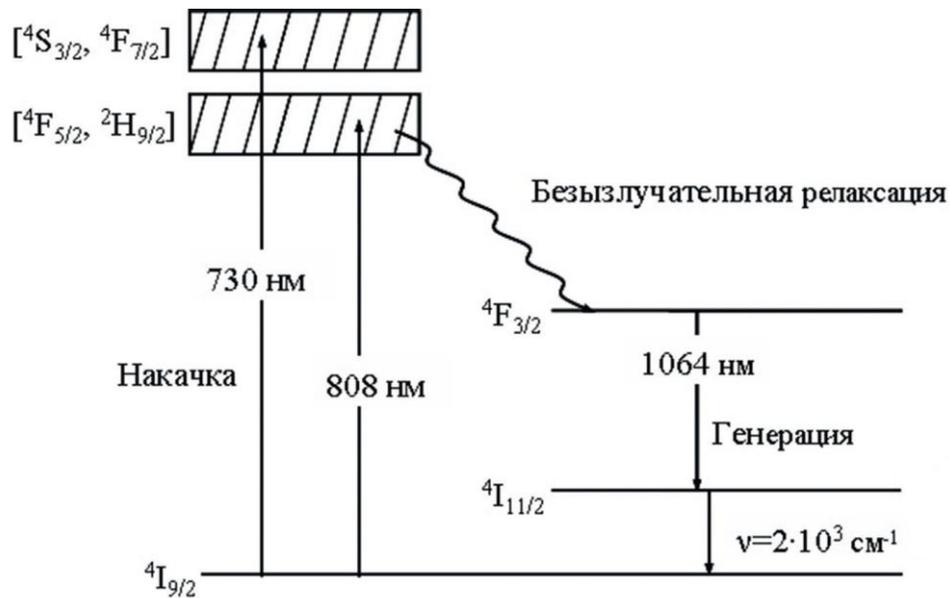


Рис. 4: Четырёхуровневая схема накачки активной среды лазера.

Кинетические уравнения в рассматриваемом случае имеют вид:

$$N_0 + N_2 = N, \quad (4)$$

$$\dot{N}_2 = QN_0 - BMN_2 - \frac{N_2}{\tau_a}, \quad (5)$$

$$\dot{M} = V_0 BMN_2 - \frac{M}{\tau_0} \quad (6)$$

В уравнении, (4-6) N — полная концентрация атомов примеси в активной среде, величина Q — скорость некогерентной накачки, размерность $[Q] = \text{с}^{-1}$. В общем случае $Q = Q(t)$. Произведение QN_0 (QN_0) — число атомов, совершивших переходы с уровня 0 на уровень 3 в единицу времени. В тех же уравнениях B — скорость вынужденного излучения (поглощения), т.е. число испущенных (поглощённых) фотонов в единицу времени в расчёте на один фотон, находящийся в резонаторе. Произведение BMN_2 — число атомов, переходящих с уровня 2 на уровень 1 вследствие вынужденного излучения. Величина τ_a — время жизни верхнего лазерного уровня. В уравнении (1.6), V_0 — объем, занимаемый модой внутри активной среды. В общем случае он не совпадает с объемом резонатора. Величина τ_0 — время жизни фотона в резонаторе. Смысл слагаемого V_0BMN_2 аналогичен смыслу слагаемого BMN_2 . Произведение V_0N_2 — число активных атомов на уровне 2, участвующих в генерации данной моды.

Так как уровень 1 в случае четырёхуровневой схемы накачки активной среды лазера не заселён, то отличие уравнения (5) от уравнения (2) состоит в том, что последнее содержит дополнительный член BMN_1 , представляющий собой число атомов, переходящих в единицу времени с уровня 1 на уровень 2, вследствие вынужденного поглощения. Член V_0BMN_1 , которым уравнение (3) отличается от уравнения (6), имеет аналогичный смысл и ответственен за убыль фотонов в резонаторе при трёхуровневой схеме накачки активной среды лазера из-за процессов вынужденного поглощения.

Рассмотрим, как можно определить величины B , V_0 , τ_a и τ_0 , используя характеристики активной среды.

Поскольку объемная плотность фотонов пропорциональна среднему по периоду оптических колебаний значению квадрата вектора напряжённости электрического поля, то объём моды можно приближенно найти из соотношения:

$$V_0 = \int_{V_a} \frac{E(x, y, z)^2}{E_0^2} dx dy dz \quad (7)$$

где V_a — объём активной среды, $E(x, y, z)$ - амплитуда напряжённости электрического поля в произвольной точке резонатора, а E_0 — её максимальное значение.

В резонаторе лазера с двумя диэлектрическими сферическими зеркалами электрическое поле возникает как результат наложения двух электромагнитных волн, распространяющихся в противоположных направлениях. Если поглощение такой волны за один проход мало, то результирующую волну можно приближенно рассматривать как стоячую. Поэтому в выражении (7) необходимо взять вещественную часть функции $\frac{E(x,y,z)}{E_0}$, где $E(x, y, z)$ — комплексная амплитуда гауссова пучка, радиусы кривизны которого на границах резонатора совпадают с радиусами кривизны зеркал. Например, если радиусы кривизны зеркал R_1, R_2 много больше длины резонатора L , то изменением радиуса гауссова пучка можно пренебречь, т.е. $a(z) \approx a_0$, а волновой фронт пучка можно принять за плоский, т.е. $R(z) \approx R(0) \approx \infty$. В этом случае для TEM_{00} моды имеем:

$$V_a = 2\pi \int_0^l \int_0^\infty \exp\left[-\frac{2r^2}{a_0^2} \cos^2 kz - \eta(z)\right] r dr dz \approx \frac{\pi a_0^2 l}{4} \quad (8)$$

где a_0 — радиус гауссова пучка в центре резонатора, l — длина активной среды. При выводе этого выражения мы учли тот факт, что $\eta(z)$ — медленно меняющаяся по сравнению с kz функция z . В общем случае объём моды можно рассчитать численно, используя явное выражение для функции $E(x,y,z)$.

Выражение для скорости индуцированного излучения (поглощения) и времени жизни фотона в резонаторе можно получить, исходя из следующих простых соображений. При прохождении волны через слой dz активной среды её интенсивность изменяется на величину $dI = \sigma(N_2 - N_1)Idz$, где σ — сечение перехода на частоте рассматриваемой моды резонатора. Поэтому на длине $2l$ это изменение составит $\Delta I = I_0(\exp(2\sigma(N_2 - N_1)l) - 1)$. Пусть T_1, T_2 — коэффициенты пропускания, а a_1, a_2 — соответствующие относительные коэффициенты потерь для зеркал, T_i — относительный коэффициент внутренних потерь за проход. Тогда полное изменение интенсивности за полный проход резонатора:

$$\Delta I = (1 - a_1 - T_1)(1 - a_2 - T_2)(1 - T_i)^2 \exp(2\sigma(N_2 - N_1)l) - 1 I_0 \quad (9)$$

Предположим далее, что потери на зеркалах и коэффициенты их пропускания малы, так что $1 - a_1 - T_1 \approx (1 - a_1)(1 - T_1)$, $1 - a_2 - T_2 \approx (1 - a_2)(1 - T_2)$, где $a_1 = a_2 = a$. Если, кроме того, ввести логарифмические потери за проход согласно:

$$\gamma_1 = -\ln(1 - T_1), \gamma_2 = -\ln(1 - T_2), \gamma_i = -(\ln(1 - a) + \ln(1 - T_i)), \quad (10)$$

то выражение для величины ΔI можно переписать как:

$$\Delta I = I_0 \exp(2\sigma(N_2 - N_1)l - \gamma) - 1, \quad (11)$$

где

$$\gamma = \gamma_i + \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2) \text{ — полные логарифмические потери за проход.} \quad (12)$$

Введём дополнительное условие:

$$\sigma(N_2 - N_1)l - \gamma \ll 1. \quad (13)$$

Разложим экспоненциальную функцию в уравнении (11) в степенной ряд и ограничимся линейными членами. В результате получим выражение:

$$\Delta I = 2\sigma(N_2 - N_1)l - \gamma I_0. \quad (14)$$

Разделим обе части выражения (14) на интервал времени Δt , за который световая волна совершает полный проход резонатора, т.е. на величину $\Delta t = \frac{2L'}{c}$, где $L' = L + (n - 1)l$, а n — показатель преломления активной среды. Тогда, используя приближение $\frac{\Delta I}{I} \approx \frac{dI}{I}$, получим:

$$\frac{dI}{I} = \frac{\sigma I c}{L'}(N_2 - N_1) - \frac{\gamma c}{L'} I. \quad (15)$$

Поскольку $M \sim I$, то, сравнивая уравнения (3) и (15), или (6) и (15), в котором $N_1 \approx 0$, найдём:

$$B = \frac{\sigma I c}{V_0 L'} = \frac{\gamma c}{V_0}, \quad (16)$$

$$\tau_0 = \frac{L'}{\gamma c}, \quad (17)$$

где $V = L' V_0$ — эффективный объём моды резонатора.

Если известно $M(t)$, то нетрудно определить выходную мощность через одно из двух зеркал резонатора. Действительно, согласно формулам (17), (12), можно записать:

$$\frac{1}{\tau_0} = \frac{\gamma_1 c}{L'} + \frac{\gamma_1 c}{2L'} + \frac{\gamma_2 c}{2L'}. \quad (18)$$

Если это выражение подставить в уравнение (3) или (6), то легко видеть, что $\frac{c\gamma_2 M}{2L'}$ есть скорость ухода фотонов из резонатора через зеркало 2. Следовательно, выходная мощность через зеркало 2 равна:

$$P_2 = \frac{\gamma_2 c}{2L'} \hbar \omega M. \quad (19)$$

В качестве начальных условий для лазера с тремя уровнями примем:

$$N_1(0) = N, N_2(0) = 0, M(0) = M_0. \quad (20)$$

Для лазера с четырёхуровневой схемой накачки активной среды можно записать:

$$N_0 = N, N_2(0) = 0, M(0) = M_0, \quad (21)$$

где N_0 — начальная концентрация атомов на нижнем основном уровне 1, M_0 — начальное малое число фотонов в резонаторе, имитирующее спонтанное испускание.

Для численного решения дифференциальных уравнений (1)–(3), (4)–(6) целесообразно перейти к безразмерным величинам. С этой целью масштабы времени, энергии, концентрации и т.д., выбираются исходя из условий конкретной задачи.

Рассмотрим переход к безразмерным величинам на примере лазера с четырёхуровневой схемой накачки активной среды. Основными величинами для него являются: время жизни фотона в резонаторе — τ_0 , число фотонов в резонаторе при стационарном режиме работы лазера — M_c , концентрация атомов на основном уровне в начальный момент времени — N . Для нахождения величины M_c положим $M = 0$ в уравнении (6):

$$M_c = V_0 B \tau_0 M N_2. \quad (22)$$

Совместное решение уравнения (22) с уравнениями (4), (5) позволяет определить концентрации атомов на уровнях 2 и 0 при стационарном режиме работы лазера:

$$N_{2,c} = \frac{1}{t_0 V_0 B}, \quad (23)$$

$$N_{0,c} = N - N_{2,c}. \quad (24)$$

Подставляя теперь эти выражения в уравнение (22), найдём:

$$M_c = \frac{V_0 t_0 Q}{\tau_0} \frac{N - N_{2,c}}{N_{2,c}} = \frac{N_{2,c}}{\tau_0}, \quad (25)$$

где Q_0 — пиковое значение скорости некогерентной накачки. Для непрерывного лазера $Q(t) = Q_0 = const$.

Решая кинетические уравнения, с использованием приведённых выше числовых значений параметров для лазера на основе $Y_3Al_5O_{12} : Nd$, можно получить зависимости от времени относительной инверсной населённости $(N_2 - N_1)(t)$ и выходной мощности генерации $P(t)$.

Оптический резонатор. Моды резонатора

Одним из основных элементов лазера является оптический резонатор. Оптический резонатор служит для обеспечения обратной связи для взаимодействия лазерного излучения с активным элементом. В простейшем случае резонатор лазера представляет собой интерферометр Фабри-Перо, представляющий собой два плоских зеркала, расположенных напротив друг друга. Световая волна, распространяющаяся в резонаторе лазера, отражается от зеркал и возвращается обратно параллельно оптической оси. Для фиксированного расстояния между зеркалами в резонаторе возникают стоячие волны (моды) с нулевой напряженностью электрического поля на границах зеркал. В интерферометре Фабри-Перо возникают продольные моды, которые

удовлетворяют условию

$$L = \frac{q\lambda}{2}, \quad (26)$$

где q — целое число, которое называется порядком моды. Стоячие волны в плоскопараллельном резонаторе показаны на рис. 5.

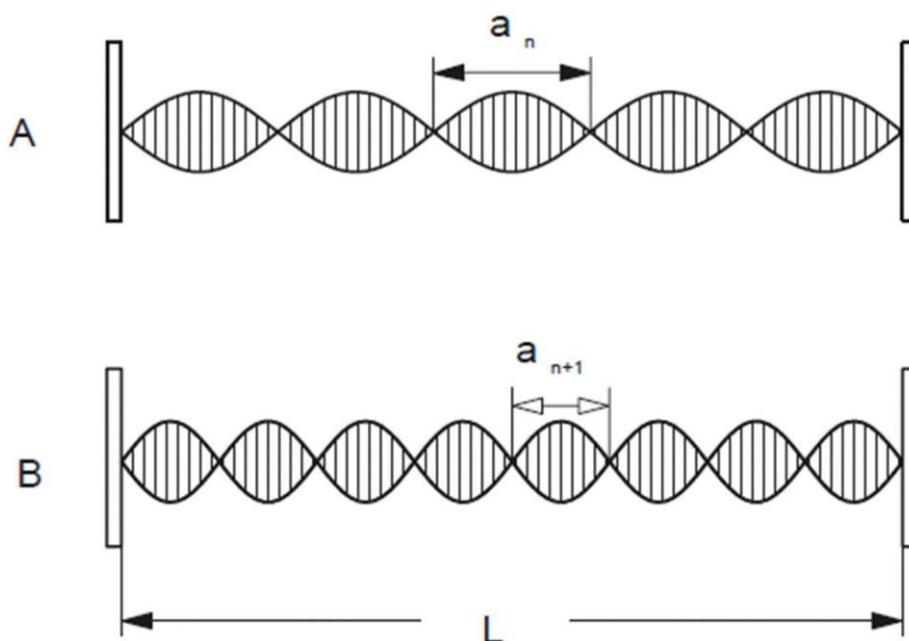


Рис. 5: Стоячие волны в плоскопараллельном резонаторе. На рис. а изображены пять продольных мод, которые заполняют полость резонатора длиной L , на рис. б, количество мод $q=8$.

Условия для двух соседних мод запишутся в виде:

$$L = \frac{q\lambda_q}{2}. \quad (27)$$

С учётом того, что частота стоячей волны $\nu_q = q \frac{c}{2L}$ из (25) и (27) можно определить величину межмодового интервала и спектрального разрешения продольной моды резонатора:

$$\delta\nu = \nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2L} \quad (28)$$

Величина $\delta\nu$ называется спектральным разрешением продольной моды. Число резонансных частот m_q (продольных мод), на которых может осуществляться генерация:

$$m_q = \frac{\delta\nu_{\text{усил.}}}{\delta\nu} \quad (29)$$

где $\delta\nu_{\text{усил.}}$ — ширина контура усиления.

Неоднородный профиль усиления мод резонатора показан на рис. 6.

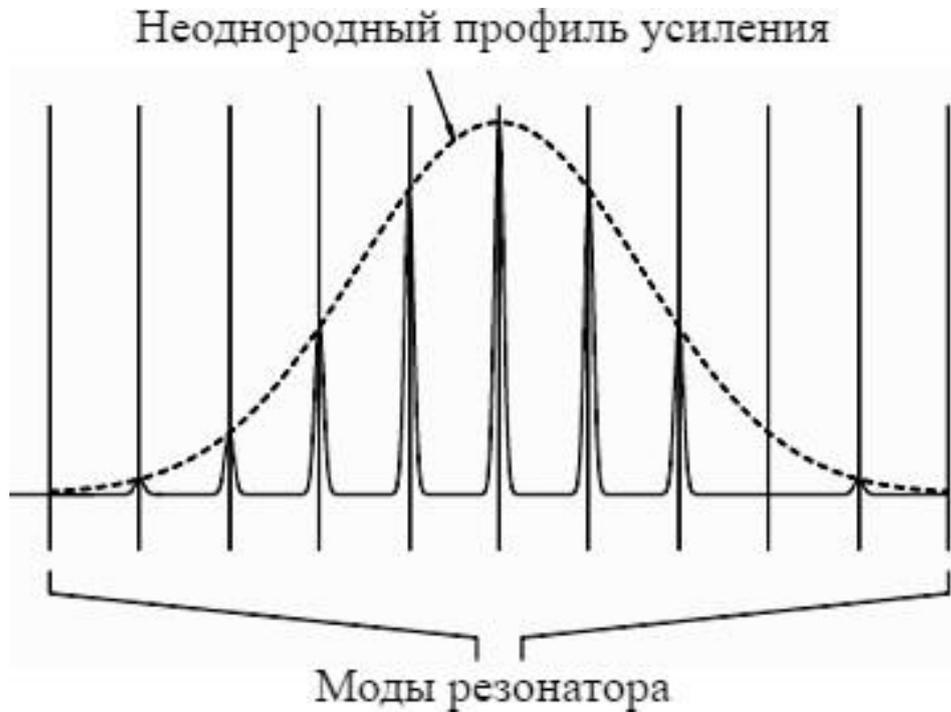


Рис. 6: Пример, иллюстрирующий возникновение многомодовой генерации.

Из решения системы кинетических уравнений известно, что в стационарном режиме работы лазера инверсия населенности уменьшается до достижения ею порогового значения, а избыток фотонов накачки формирует выходное лазерное излучение. В свою очередь это означает, что коэффициент усиления достигает определенного значения, при котором компенсируются потери в резонаторе. Этому условию соответствует прямая горизонтальная линия на рис. 6, которая является касательной к графику и соответствует максимальному усилению. В этом случае будет генерироваться только одна мода, та, которая ближе всего к точке пересечения кривой усиления и прямой линии. Такой режим соответствует режиму генерации, когда достаточная для генерации инверсная населенность создаётся лишь для одной моды.

Лазерные материалы состоят из атомов и молекул с различными химическими и физическими свойствами. Это имеет значение в случае газовых лазеров, например, для He-Ne лазера, атомы активной среды которого могут свободно перемещаться в разрядной трубке. В соответствии с распределением Максвелла-Больцмана по скоростям, различные группы атомов движутся с различными скоростями и обладают различным профилем усиления. Таким образом, результирующий профиль усиления будет неоднородным. Лазеры такого типа работают в режиме многомодовой генерации.



Рис. 7: Пример, иллюстрирующий возникновение одномодовой генерации.

Следует заметить, что не существует идеально однородных или неоднородных систем, но профиль усиления лазера Nd:YAG можно назвать практически однородным. Тем не менее, небольшая неоднородность и в этом случае приводит к многомодовой генерации.

Системы с оптической накачкой и однородным профилем усиления особенно восприимчивы к изменению мощности накачки, и к изменениям длины резонатора в результате механического воздействия, вибраций, различных шумов и т.д. Параметры усиления резонатора (активной среды) лазера изменяются под действием этих эффектов, что приводит к генерации дополнительных мод. Тем не менее, одним из преимуществ такого изменения является возможность режима генерации связанных мод. Такой режим работы лазера за счет модуляции коэффициента усиления называется режимом синхронизации мод, и позволяет получить очень короткие импульсы выходного излучения лазера порядка сотен и десятков фемтосекунд.

Кроме продольных мод лазерные резонаторы характеризуются поперечными модами. Поперечные моды определяют распределение интенсивности в сечении пучка, т.е. расходимость пучка.

Поперечные моды характеризуются индексами m и n , и обозначаются TEM_{mn} . Индекс поперечной моды указывает на число интерференционных минимумов интенсивности излучения в поперечном сечении пучка. Для резонатора с плоскими зеркалами индекс m определяет число минимумов вдоль оси X , а индекс n соответствует числу минимумов вдоль оси Y .

Поперечные моды с различными значениями m и n показаны на рис.8.



Рис. 8: Поперечные моды оптического резонатора.

Типы резонаторов

Существуют три основных типа оптических резонаторов: плоско-параллельный резонатор (А), полусферический резонатор (В) и сферический (С) (рис. 9).

Для лазеров с мощностью излучения в диапазоне 1 мВт — 200 Вт, в основном используется полусферический резонатор. Достоинством этого резонатора являются высокая выходная мощность излучения. Кроме того, для него не требуется высокая точность механической регулировки положения выходных зеркал. В отличие от остальных параметров, выходная мощность лазерного излучения зависит от эффективности использования активной среды резонатора, а именно объема накачки и объема мод резонатора. Под объемом накачки подразумевают объем активной среды резонатора, генерирующий лазерное излучение под действием оптической накачки. Объем мод резонатора это объем, который занимают моды внутри активной среды резонатора. Данные параметры можно изменить, изменяя точку фокусировки, мощность накачки и размеры резонатора. Объем моды зависит от того, как распространяется лазерный луч в резонаторе. Эти параметры определяются путем выбора типа резонатора, радиуса кривизны зеркал R и расстояния L между зеркалами. Необходимо заметить, что в определенных случаях для заданного значения радиуса кривизны зеркал R невозможно изменить расстояние между зеркалами L .

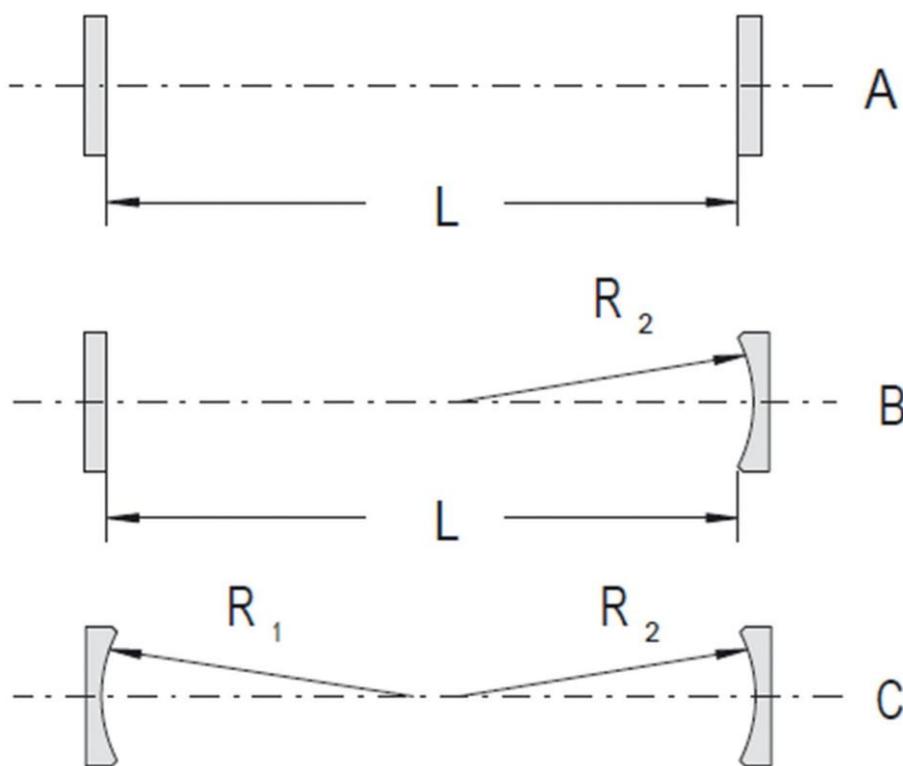


Рис. 9: Примеры различных типов резонаторов.

Критерий устойчивости резонатора

Диапазон допустимых изменений, в пределах которых резонатор будет обеспечивать стабильную генерацию излучения, может быть получен с помощью критерия устойчивости. Резонатор называется устойчивым, если после любого количества отражений свет по-прежнему будет оставаться в резонаторе, проходить через активную среду, и не покинет резонатор через края зеркал. Для плоско-параллельного резонатора (А), в котором луч света отражается от зеркал без изменения поперечного сечения пучка, необходимым условием устойчивости является параллельность зеркал относительно друг друга. Такой тип резонаторов является наиболее сложным в плане юстировки и обеспечения необходимого режима работы лазера.

Сферический резонатор (С) проще в юстировке, однако его недостатком является наличие нежелательных поперечных мод в выходном излучении лазера. Это означает, что выходная мощность лазерного излучения поделена между некоторым количеством поперечных мод, пространственно разделенных в резонаторе, и такие моды, в отличие от продольных мод не могут быть сфокусированы в одну точку.

Компромиссное решение между резонаторами (А) и (С) является полусферический тип резонатора. Он обеспечивает необходимую стабильность излучения и легче юстируется по сравнению с плоским резонатором. Рассмотрим этот тип резонатора более подробно. Для определения критерия устойчивости введем параметр g :

$$g_i = \frac{L}{R_i}, \quad (30)$$

где g — параметр устойчивости, L — расстояние между зеркалами, R_i — радиус кривизны зеркала резонатора, индекс i равен 1 для левого зеркала и 2 — для правого.

При выполнении условия:

$$|g_1 g_2| \leq 1, \quad (31)$$

обеспечивается оптическая стабильность резонатора, и свет не покидает объем активной среды резонатора, проходя через края зеркал. Наилучшим условием будет распространение света параллельно оптической оси резонатора.

Диаграмма стабильности лазерного излучения для полусферического резонатора изображена на рис. 10.

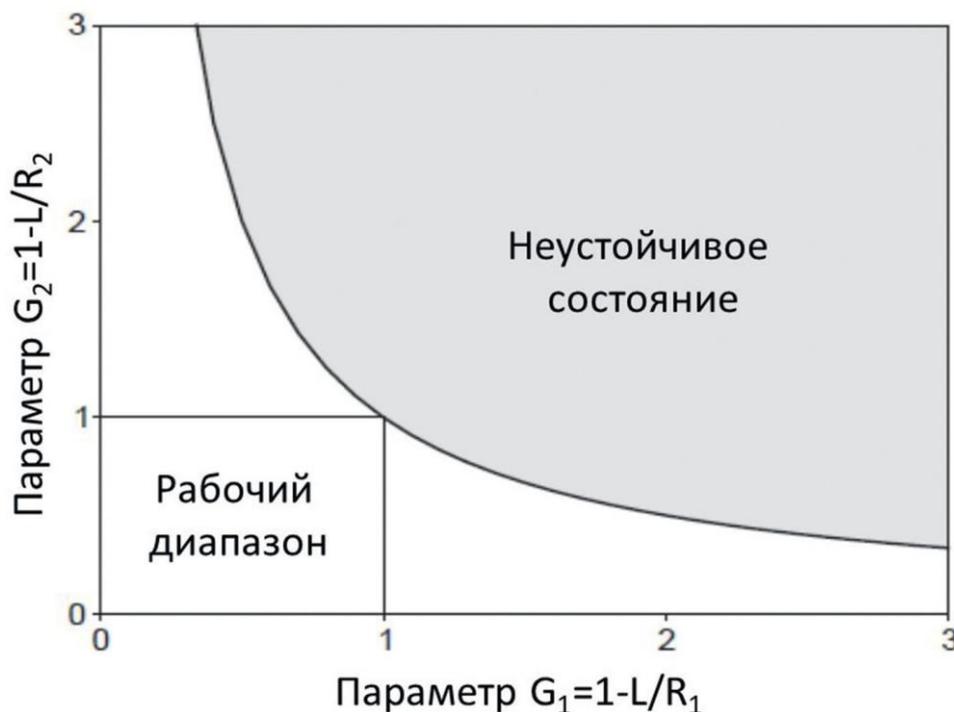


Рис. 10: Диаграмма устойчивости.

Для полусферического резонатора $g_1 = 1$, так как $R_1 = \infty$ (плоское зеркало). Все типы резонаторов являются неустойчивыми выше кривой $g_1 g_2 = 1$ и устойчивыми — ниже этой кривой. Так как $g_1 = 1$, то для заданного $2R$, расстояние между зеркалами можно изменять в диапазоне от $L = 0$ ($g_2 = 1$) до $L = R_2$ ($g_2 = 0$). Расстояние между зеркалами, установленное в этих пределах, обеспечивает стабильный режим работы. Следует заметить, что чем ближе режим работы резонатора к стабильному, тем более он чувствителен к неточной юстировке, так как в этом случае даже малые изменения в режиме работы могут вывести его из стабильного состояния (например, вследствие теплового расширения материала активной среды лазера). Конечно, можно уменьшить расстояние между зеркалами, но при этом уменьшается и объем мод резонатора, что в конечном итоге влияет на мощность выходного излучения лазера.

Устройство и принцип работы лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$

Рассмотрим принципы работы лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$. С использованием схемы энергетических уровней ионов Nd^{3+} , показанных на рис. 2.

Оптическая накачка, которая осуществляется полупроводниковым лазерным диодом с $\lambda_{изл} \sim 800$ нм переводит ионы Nd^{3+} из основного состояния $4I_{9/2}$ на уровни $4F_{5/2}$, $4H_{9/2}$. С этих уровней посредством безызлучательной релаксации возбуждение переходит на верхний лазерный уровень $4F_{3/2}$. Нижним лазерным уровнем является уровень $4I_{11/2}$.

Из энергетической схемы уровней, показанной на рис. 1 видно, что как верхний $4F_{3/2}$ уровень, так и нижний $4I_{9/2}$ уровень кристаллическим полем расщепляются на штарковские подуровни. Это означает, что лазерную генерацию можно получать на переходах между отдельными состояниями подуровней $4F_{3/2}$ и $4I_{11/2}$. Однако в большинстве случаев получают генерацию на длине волны 1064 нм, обладающего наибольшим значением сечения перехода.

Экспериментальная установка

Внешний вид макета лазера на кристалле YAG:Nd показан на рис. 11. Он состоит из лазерного модуля накачки (1), терминала управления лазером (2), оптического рельса (3), коллимирующей линзы (4), фокусирующей линзы (5), входного плоского зеркала (6), активного элемента из кристалла YAG:Nd (7), выходного сферического зеркала (8), оптического светофильтра (9), фотодетектора (10), диафрагмы (11), визуализатора лазерного излучения (12), мультиметра (13), цифрового осциллографа (14).

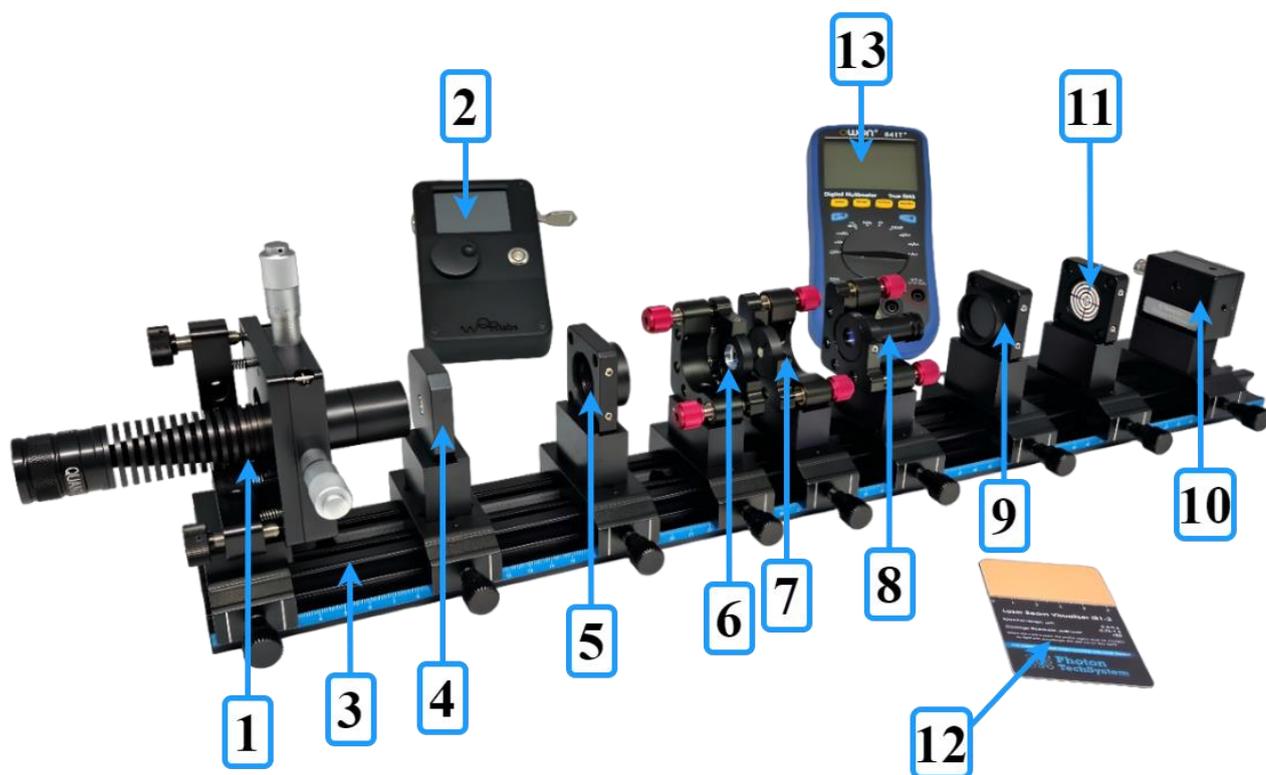


Рис. 11: Внешний вид экспериментальной установки макета лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Внимание!

- 1) Перед началом сборки экспериментальных установок внимательно изучите устройство и порядок включения всех компонент лазера в разделе «Комплектация».
- 2) При работе с лазерным излучением обязательно используйте лазерные защитные очки.
- 3) После установки положения каждого элемента лазера на рельсе, зафиксируйте их с помощью прижимных винтов на оптической каретке.
- 4) Перед началом сборки YAG:Nd лазера рекомендуется выполнить упражнения из лабораторных стендов LF-1001, LF-1002, LF-3001.

Упражнение №1. Изучение принципа работы и сборка лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$, работающего на длине волны 1064 нм

Соберите экспериментальную установку так как показано на рис.4 согласно методике, представленной ниже.

Сборка лазера YAG:Nd работающего в режиме генерации второй гармоники начинается со стороны макета YAG:Nd лазера работающего на длине волны 1064 нм. Соберите макет твердотельного лазера согласно приведённой ниже инструкции.

- 1) Закрепите оптический рельс на оптическом столе или другом жёстком основании с помощью винтов М6 или специальных прижимов.
- 2) Установите юстировочный лазер на край оптического рельса.
- 3) Установите первую диафрагму с мишенью на расстоянии около 1 см от юстировочного лазера. Вторую диафрагму с мишенью установите на противоположном конце оптического рельса (рис. 12).



Рис. 12: Настройка оптической оси твердотельного лазера YAG:Nd с помощью юстировочного лазера видимого спектрального диапазона.

- 4) Включите юстировочный лазер. Вращая регулируемые винты кинематического держателя юстировочного лазера, добейтесь попадания красного луча в центры обеих мишеней.
- 5) Переместите дальнюю от юстировочного лазера диафрагму в центр оптического рельса и проверьте попадание красного лазерного пучка в центр мишени.

- 6) Установите на край оптического рельса диодный лазер накачки в держателе. Далее установите вторую диафрагму на расстоянии около 6 см от диодного лазера накачки (рис. 13).



Рис. 13: Установка оптической оси твердотельного лазера YAG:Nd с помощью юстировочного лазера видимого спектрального диапазона.

- 7) Включите в сеть терминал управления диодного лазера, настройте непрерывный режим работы лазера, установив значения частоты 0 Гц и заполнения 100%. Для безопасной работы с лазерным излучением воспользуйтесь защитными лазерными очками.
- 8) Установите ток инъекции диодного лазера накачки равный 270 мА и включите лазер. Вращая регулировочные винты держателя лазера накачки, убедитесь, что излучение примерно попадает в центр обеих диафрагм. Контроль положения и формы луча осуществляйте с помощью визуализатора лазерного излучения. Уберите с рельса вторую диафрагму. Обратите внимание на особенность диодных лазеров, обусловленную большой расходимостью лазерного излучения.
- 9) Установите коллиматор на расстоянии 13,86 мм от диодного лазера накачки. Изменяя расстояние между коллиматором и лазерным модулем накачки, добейтесь коллимированного лазерного пучка, т.е. плоскопараллельного пучка, который практически не изменяет своей формы на всей длине оптического рельса. Для контроля формы лазерного пучка накачки используйте визуализатор, возвратно перемещая его вдоль оптического рельса (рис. 14).



Рис. 14: Настройка положения коллиматора.

- 10) Установите вторую диафрагму с мишенью после коллиматора на расстоянии около 6 см (рис. 15). С помощью юстировочных винтов держателя полупроводникового лазерного модуля добейтесь попадания коллимированного излучения лазера в центр обеих диафрагм.



Рис. 15: Настройка траектории лазерного луча накачки твердотельного лазера YAG:Nd.

- 11) Установите фокусирующий объектив на расстоянии примерно 6 см от коллимирующей линзы. Установите вторую диафрагму в фокусе объектива. Проверьте попадание сфокусированного лазерного луча накачки в центр первой и второй диафрагмы. Используйте регулируемые винты держателя лазера накачки для направления сфокусированного излучения накачки в центр диафрагм (рис. 16). Уберите вторую диафрагму с рельса.



Рис. 16: Настройка положения фокусирующего объектива.

- 12) С помощью визуализатора излучения и шкалы рельса определите и запомните положение фокуса излучения накачки диодного лазера. Установите стержень из кристалла YAG:Nd в специальном держателе в фокусе излучения накачки диодного лазера. Включите юстировочный диодный лазер. Вращая винты кинематического держателя активного элемента, заведите отраженные лучи в центр диафрагмы (рис. 17).



Рис. 17: Настройка положения активного элемента из кристалла YAG:Nd.

- 13) За фокусирующим объективом на расстоянии около 2 мм от активного элемента установите входное плоское зеркало в держателе (рис. 18). Вращая винты кинематического держателя плоского зеркала, заведите отраженные лучи от плоского зеркала в центр диафрагмы.

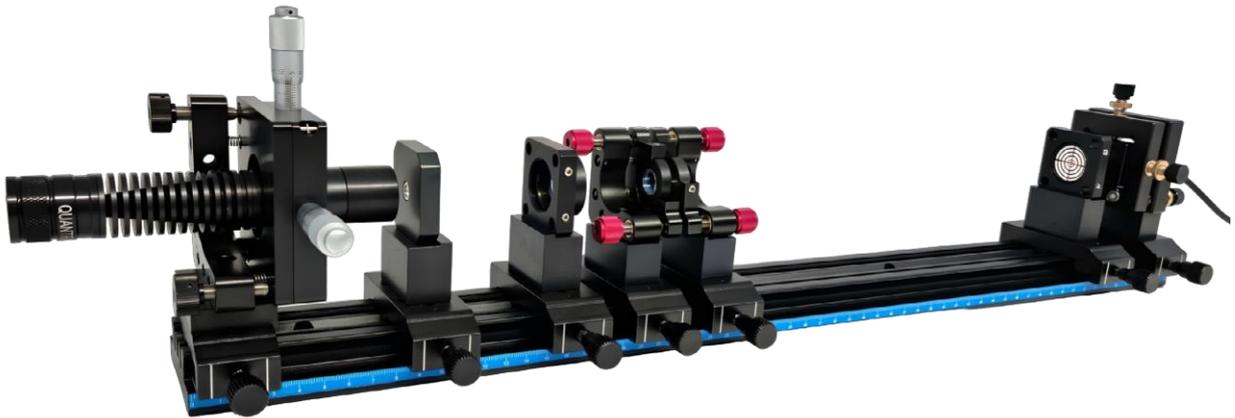


Рис. 18: Настройка положения входного зеркала резонатора.

- 14) За держателем с кристаллом YAG:Nd установите выходное сферическое зеркало резонатора лазера в держателе. Общая длина резонатора лазера должна составлять около 5 см (рис. 19). Вращая винты кинематического держателя сферического зеркала, заведите отраженные лучи юстировочного лазера в центр диафрагмы.



Рис. 19: Настройка положения выходного зеркала резонатора.

- 15) После выходного сферического зеркала резонатора установите на оптический рельс держатель с оптическим светофильтром, который поглощает излучение накачки на длине волны 808 нм и пропускает лазерную генерацию в области 1064 нм (рис. 20).

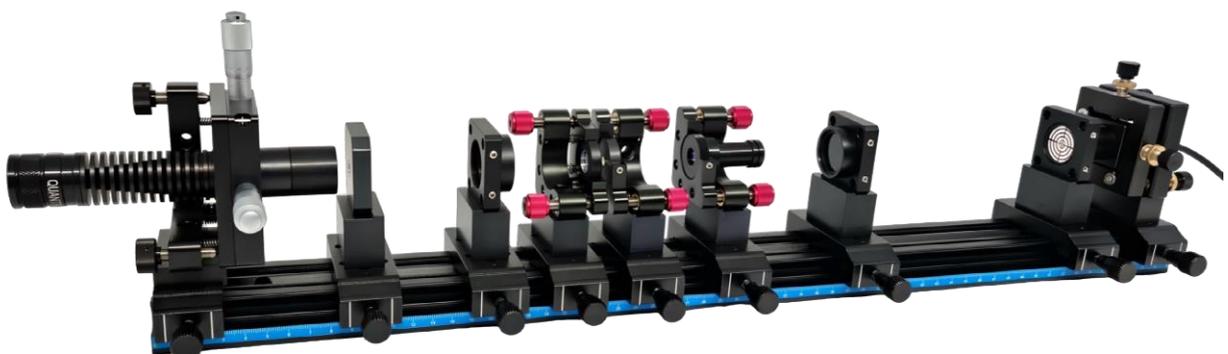


Рис. 20: Установка оптического светофильтра.

- 16) После держателя с оптическим светофильтром установите фотодетектор (рис. 21). С помощью BNC кабеля соедините его с цифровым осциллографом или мультиметром.



Рис. 21: Измерение интенсивности излучения лазера на кристалле YAG:Nd.

- 17) Установите ток инжекции диода накачки на терминале управления 400 мА. Включите лазер накачки. Вращая регулировочные винты держателя выходного сферического зеркала, добейтесь появления лазерной генерации. Используйте визуализатор для обнаружения генерации. При отсутствии лазерной генерации можно увеличить ток инжекции до 500 мА и вновь провести настройку положения сферического зеркала. Если увеличение тока инжекции не приводит к появлению генерации YAG:Nd лазера, то необходимо заново повторить настройку лазера по схеме описанной выше.
- 18) Вращение зеркал резонатора будет приводить к изменению формы лазерного пучка генерации. Добейтесь появления пучка близкого к круглой форме минимального размера.
- 19) Проверьте попадание лазерной генерации YAG:Nd лазера в активную область фотодетектора. Включите мультиметр и зафиксируйте сигнал излучения лазерной генерации. Настройте на мультиметре максимальное значение интенсивности лазерной генерации с помощью юстировки положения узлов лазера: выходного сферического зеркала резонатора, лазерного модуля накачки, входного плоского зеркала резонатора, активного элемента.

Упражнение №2. Наблюдение пикового режима лазерной генерации на кристалле YAG:Nd

- 1) Выполните упражнение №1.
- 2) Установите на терминале управления лазера накачки ток инжекции выше порогового значения на 50 мА (около 300 мА). Установите следующие настройки терминала управления лазера накачки для получения импульсного режима работы: частота 60 Гц, заполнение 40 %, температура 30 °С.
- 3) Подключите цифровой осциллограф к сети.
- 4) С помощью специального кабеля соедините разъем синхронизации диодного лазера с каналом 1 осциллографа. В настройках осциллографа выберите тип синхронизации по 1 каналу.
- 5) Соедините фотодетектор с каналом 2 осциллографа. Установите на осциллографе развёртку по времени 100 μ с на одну клетку. Включите диодный лазер накачки. Получите на осциллографе пиковый режим работы лазера (рис. 22).



Рис. 22: Осциллограмма пикового режима работы YAG:Nd лазера.

Упражнение №3. Критерий устойчивости резонатора

- 1) Выполните упражнение №1.
- 2) Установите ток инжекции диодного лазера накачки 500 мА.
- 3) Изменяя положение выходного сферического зеркала измерьте интенсивность (выходную мощность) излучения YAG:Nd лазера. Обратите внимание на изменение формы пучка YAG:Nd лазера.
- 4) Определите длину резонатора при которой пропадает лазерная генерация.
- 5) Используйте программный комплекс от различных производителей («reZonator», «Resonator Studio», «LAS-CAD», «Virtual Lab 4 Laser ResonatorToolbox», «WaveTrain» и др.) для определения границ устойчивости оптического резонатора лазера. Сравните полученные экспериментальные и теоретические значения.

Упражнение №4. Измерение зависимости выходной мощности YAG:Nd лазера от температуры (длины волны) диодного лазера накачки

- 1) Выполните упражнение №1.
- 2) Установите ток инжекции диодного лазера накачки 500 мА.
- 3) Изменяя температуру лазерного диода накачки от 18 до 50°C с шагом 2°C, измерьте выходную мощность (интенсивность) YAG:Nd лазера. Измерения повторите не менее трёх раз. Полученные значения занесите в таблицу 1. Постройте график зависимости интенсивности (выходной мощности) излучения YAG:Nd лазера от температуры диода накачки (рис. 23). Объясните полученный результат.

Таблица 1: Зависимость выходной мощности YAG:Nd лазера от температуры диода накачки.

T, °C	U_1 , мВ	U_2 , мВ	U_3 , мВ	$\langle U \rangle$, мВ
18				
20				
...				
50				

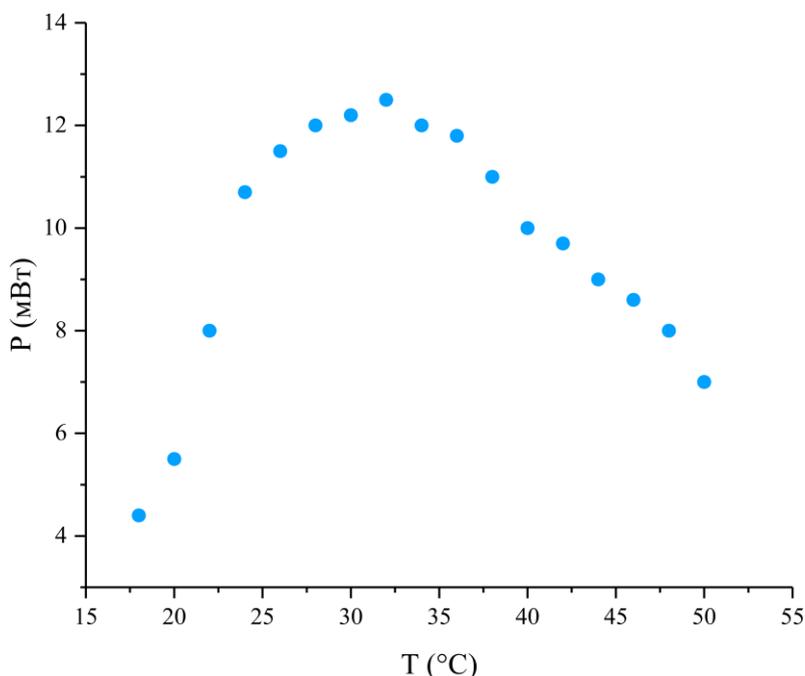


Рис. 23: Зависимость выходной мощности YAG:Nd лазера от температуры (длины волны) диода накачки.

Упражнение №5. Измерение дифференциального и полного КПД лазерной генерации

Примечание: При отсутствии в комплектации стенда измерителя мощности можно использовать фотодетектор и мультиметр для измерения интенсивности лазерного излучения и последующей оценки КПД лазера.

- 1) Выполните упражнение №1. Установите температуру лазерного диода накачки 30 °C.
- 2) После светофильтра установите на рельс измеритель оптической мощности (ИМ). С помощью визуализатора проверьте попадание излучения в активную область ИМ.

- 3) С помощью ИМ измерьте зависимость выходной мощности излучения $P_{\text{вых}}$ YAG:Nd лазера от тока инжекции диодного лазера накачки I . Ток лазера накачки изменяйте от 150 до 850 мА. В диапазоне 150 – 250 мА рекомендуется использовать шаг 10 мА, для других значений тока инжекции можно использовать шаг 50 мА. Измерения повторите не менее трёх раз. Найдите среднее значение. Полученные значения занесите в таблицу №2.

Таблица 2: Измерение выходной мощности YAG:Nd лазера.

I , мА	$P_{\text{вых1}}$, мВт	$P_{\text{вых2}}$, мВт	$P_{\text{вых3}}$, мВт	$\langle P_{\text{вых}} \rangle$, мВт
150				
160				
...				
250				
300				
...				
850				

- 4) Поменяйте выходное сферическое зеркало на сферическое зеркало с другим значением отражения на длине волны 1064 нм. Вращая винты держателя сферического зеркала, настройте максимальную мощность. Повторите п.3 для нового выходного зеркала. Данный пункт можно выполнить при наличии в комплектации стенда набора выходных сферических зеркал с различным пропусканием. Если в комплектации только одно выходное зеркало, то переходите к п.5.
- 5) Уберите с рельса держатель с выходным зеркалом резонатора лазера. Измерьте мощность прошедшего излучения $P_{\text{пр}}$ лазерного диода накачки через активный элемент. Используйте значения тока инжекции из п.3. Измерения повторите не менее трёх раз. Найдите среднее значение. Полученные значения занесите в таблицу №3.

Таблица 3: Прошедшая, падающая и поглощенная мощность излучения диодного лазера накачки.

I , мА	$P_{\text{пр1}}$, мВт	$P_{\text{пр2}}$, мВт	$P_{\text{пр3}}$, мВт	$\langle P_{\text{пр}} \rangle$, мВт	$P_{\text{пад1}}$, мВт	$P_{\text{пад2}}$, мВт	$P_{\text{пад3}}$, мВт	$\langle P_{\text{пад}} \rangle$, мВт	$P_{\text{погл}}$, мВт
150									
160									
...									
250									
300									
...									
750									

- 6) Уберите с рельса держатель активного элемента и измерьте мощность падающего излучения накачки $P_{\text{пад}}$ на кристалл. Используйте значения тока инжекции из п.3. Измерения повторите не менее трёх раз. Найдите среднее значение. Полученные значения занесите в таблицу №3.
- 7) Определите поглощённую мощность излучения накачки $P_{\text{погл}}$ активным элементом, как разницу между мощностью падающего и прошедшего излучения накачки. Полученные значения занесите в таблицу №3.
- 8) Постройте график зависимости выходной мощности излучения $P_{\text{вых}}$ YAG:Nd лазера от поглощённой мощности излучения накачки $P_{\text{погл}}$ (рис. 24).

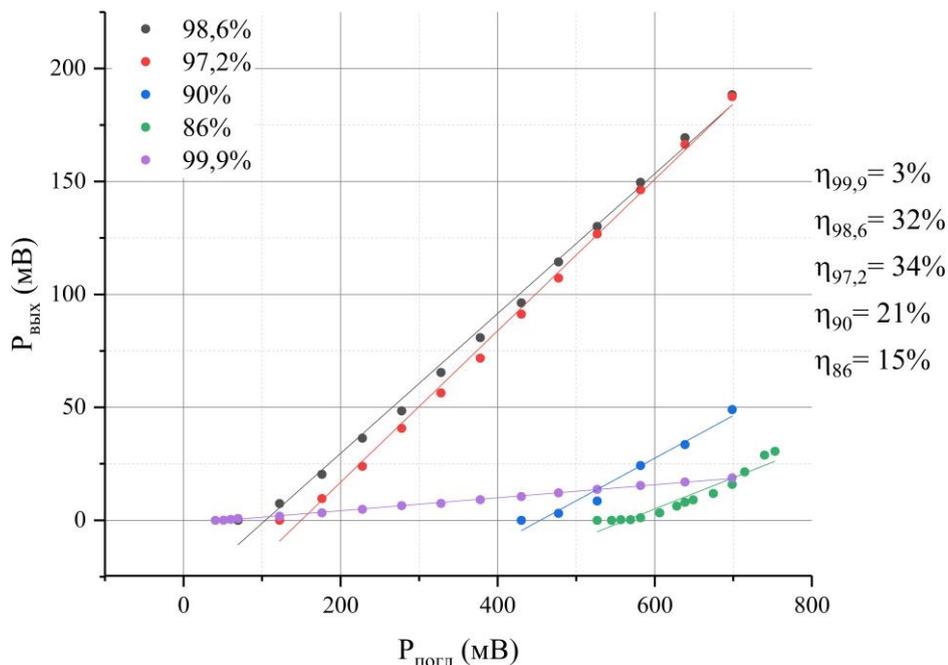


Рис. 24: Зависимость выходной мощности излучения $P_{\text{вых}}$ YAG:Nd лазера от поглощённой мощности излучения накачки $P_{\text{погл}}$.

- 9) Определите дифференциальный КПД генерации как тангенс угла наклона зависимости $P_{\text{вых}}$ от $P_{\text{погл}}$.
- 10) Постройте график зависимости выходной мощности излучения $P_{\text{вых}}$ YAG:Nd лазера от падающей мощности излучения накачки $P_{\text{пад}}$ (рис. 25). Определите полный КПД генерации как тангенс угла наклона зависимости $P_{\text{вых}}$ от $P_{\text{пад}}$.

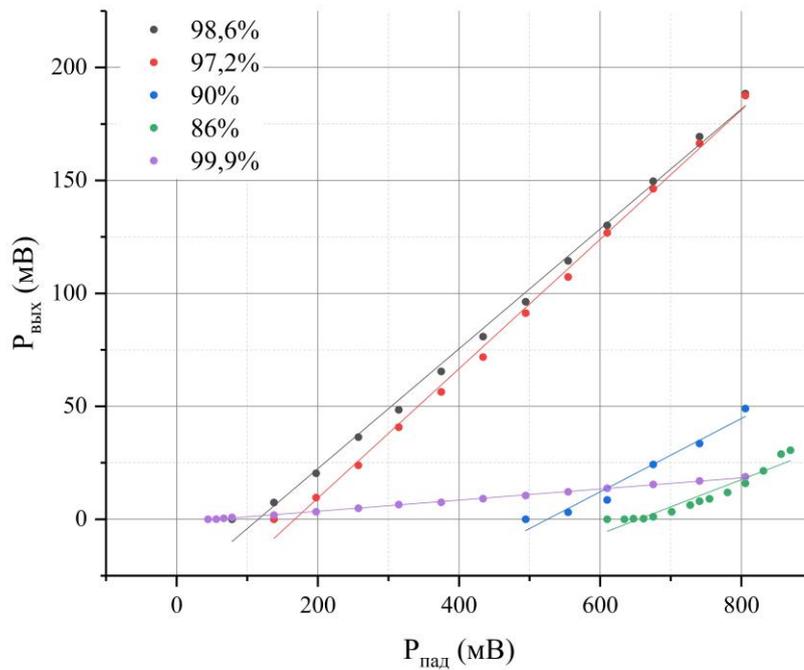


Рис. 25: Зависимость выходной мощности излучения $P_{\text{вых}}$ YAG:Nd лазера от падающей мощности излучения накачки $P_{\text{пад}}$.

Упражнение №6. Сборка YAG:Nd лазера на основе плоскопараллельного резонатора (резонатора Фабри-Перо)

- 1) Выполните упражнение №1.
- 2) Вместо выходного сферического зеркала установите плоское зеркало. С помощью юстировочного лазера скорректируйте положение выходного плоского зеркала на оптической оси.
- 3) Установите ток инжекции диодного лазера накачки 550 мА. Получите лазерную генерацию.
- 4) Визуально сравните качество лазерного пучка для различных типов резонаторов.
- 5) Повторите упражнения 2—5 для YAG:Nd лазера на основе резонатора Фабри-Перо.

Упражнение №7. Сборка YAG:Nd лазера на основе сферического и конфокального резонатора

- 1) Выполните упражнение №1. Измените положение коллимирующей линзы, так чтобы фокус излучения накачки находился на расстоянии не менее 9 см от фокусирующей линзы.
- 2) Вместо входного плоского зеркала установите сферическое зеркало. С помощью юстировочного лазера скорректируйте положение этого зеркала на оптической оси.
- 3) Установите ток инжекции диодного лазера накачки 700 мА. Получите лазерную генерацию.

- 4) Перемещая входное и выходное зеркало резонатора вдоль оптического рельса, получите генерацию YAG:Nd лазера на основе конфокального резонатора (длина резонатор $L = R = 100$ мм).
- 5) Перемещая входное и выходное зеркало резонатора вдоль оптического рельса, получите генерацию YAG:Nd лазера на основе сферического резонатора (длина резонатор $L = 2R = 200$ мм).
- 6) Визуально сравните качество лазерного пучка для различных типов резонаторов.

Библиографический список

- 1) Лабораторный практикум по физике лазеров / П.А. Рябочкина, А.А. Ляпин – Изд. 2-е доп. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2020. – 96 с.
- 2) Звелто О. Принципы лазеров: Пер. с англ.- 3-е перераб. и доп. 3 изд. -Москва: Мир, 1990. -560 с., ил.
- 3) Айрапетян, В.С. Физика лазеров [Текст]: учебное пособие / В.С. Айрапетян, О.К. Ушаков. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 134 с.
- 4) Ю.Айхлер, Г.-И. Айхлер. Лазеры. Исполнение, управление, применение: Пер. с англ. – Москва: Техносфера, 2008. – 440 с.
- 5) Кулешов, Н.В. Активные среды твердотельных лазеров: учебно-методическое пособие по дисциплинам «Твердотельные лазерные системы» и «Теория и расчет лазеров» / Н.В. Кулешов, А.С. Ясюкевич. – Минск: БНТУ, 2010 – 134 с.

Лабораторная работа №4. Импульсный твердотельный лазер на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ с активной модуляцией добротности

Цель работы: изучить физические принципы работы импульсного лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$, собрать макет этого лазера.

Принадлежности: полупроводниковый лазерный диод, коллиматор, набор объективов, активный элемент из кристалла $Y_3Al_5O_{12} : Nd$, входное плоское зеркало резонатора, набор выходных сферических зеркал резонатора с различным пропусканием, акустооптический модулятор, блок управления модулятором, генератор импульсов, светофильтр, фотодетектор, терминал сопротивлений, цифровой осциллограф, диафрагма, визуализатор, оптический рельс.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Для получения импульсного режима работы лазера используется техника модуляции добротности (Q-switch, заглавной буквой Q обозначается добротность резонаторов различного типа). Лазер, в котором применяется методика активной или пассивной модуляции добротности, называется лазером с модуляцией добротности.

Основная идея метода состоит в следующем. Предположим, что в резонатор лазера помещен затвор. Если затвор закрыт, то генерация возникнуть не может и инверсия населенностей может достичь значения, которое намного превышает пороговое, имеющее место в отсутствие затвора. Если теперь резко открыть затвор, то усиление в лазере существенно превысит потери и накопленная энергия выделится в виде короткого и интенсивного светового импульса. Поскольку при этом происходит переключение добротности резонатора от низкого к высокому значению, то данный метод называется модуляцией добротности.

Метод модуляции добротности позволяет получать лазерную генерацию в виде коротких импульсов (длительностью от нескольких наносекунд до нескольких десятков наносекунд) с высокой пиковой мощностью (от нескольких мегаватт до нескольких десятков мегаватт). Типичные области применения таких лазеров, обработка материалов (например, резка, сверление, лазерная маркировка), накачка нелинейных преобразователей частоты, дальномеры и дистанционное зондирование.

Существует несколько методов, разработанных для модуляции добротности резонатора лазера: 1) электрооптические затворы; 2) вращающиеся призмы (механические устройства); 3) акустооптические модуляторы добротности; 4) насыщающиеся поглотители. Данные устройства можно разделить на две группы – активные и пассивные модуляторы добротности. В активных модуляторах для осуществления модуляции необходимо выполнять некоторое «внешнее» действие по отношению к модулирующему устройству (например, изменить напряжение, приложенное к электрооптическому затвору). В пассивных модуляторах переключение добротности осуществляется автоматически вследствие оптической нелинейности используемой среды (например, насыщающийся поглотитель).

В настоящее время широкое распространение получили твердотельные лазеры с активной модуляцией добротности на основе акустооптических модуляторов (АОМ), принцип действия

которых основан на явлении дифракции света на ультразвуковых колебаниях.

Качественно это явление можно объяснить следующим образом. Ультразвуковая волна, распространяясь в твердом теле или жидкости, создает локальные сжатия и разрежения среды. Вследствие эффекта фотоупругости из-за механических напряжений возникают изменения диэлектрической проницаемости, а, следовательно, изменения показателя преломления среды.

Таким образом, в среде образуются периодические слои с отличающимся показателем преломления. Эти слои движутся со скоростью звука и следуют друг за другом на расстоянии половины длины звуковой волны. Периодическое изменение показателя преломления можно рассматривать как фазовую дифракционную решетку, период которой равен длине акустической волны, а амплитуда пропорциональна амплитуде звука, и которая передвигается в среде со скоростью звука (фазовая решетка бегущей волны). При прохождении света через такую слоистую структуру возникает дифракция (рис. 2 а, б).

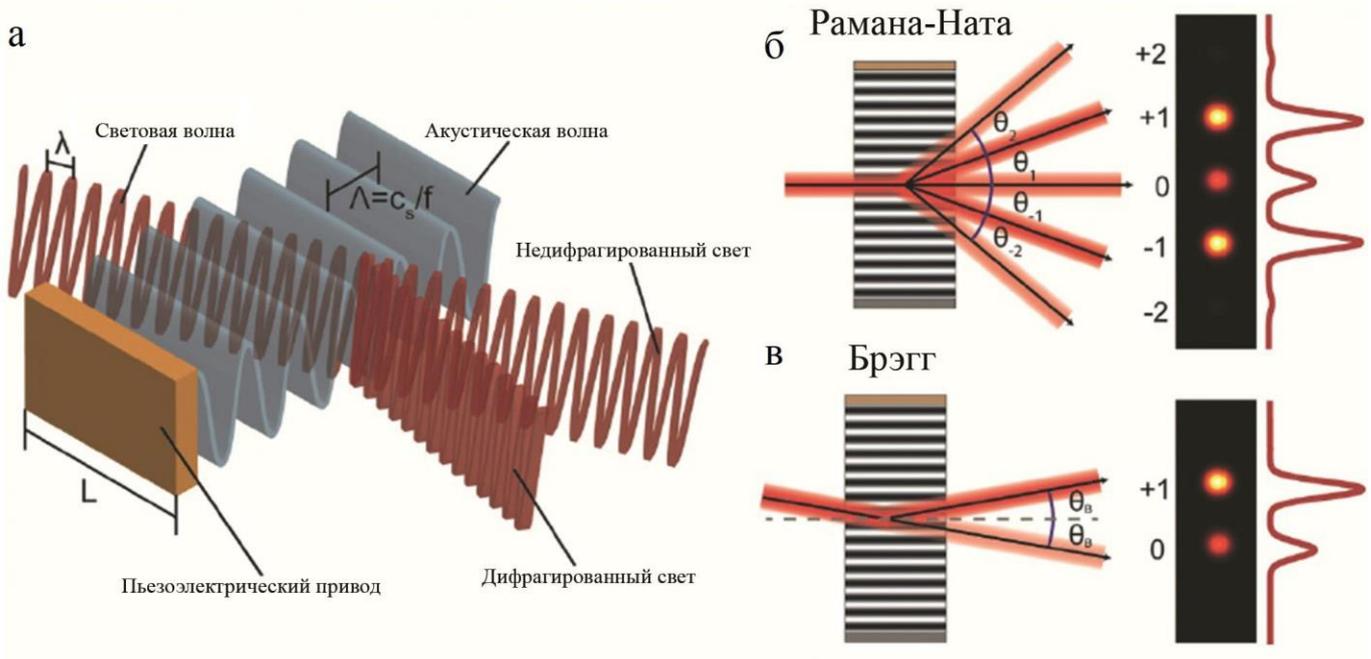


Рис. 2: Акустооптический эффект. (а) взаимодействие падающего электромагнитного излучения с акустической волной создаваемой пьезоэлектрическим элементом; (б) дифракция Рамана-Ната; (в) дифракция Брэгга.

Дифракция Рамана-Ната и Дифракция Брэгга

Различают два вида (режима) дифракции: Рамана-Ната и Брэгга. Дифракция Рамана-Ната наблюдается на низких звуковых частотах и при небольшой длине взаимодействия. При падении света параллельно волновому фронту звуковой волны дифракционный спектр Рамана-Ната представляет собой расположенные симметрично по обе стороны от прошедшего пучка равноотстоящие друг от друга дифракционные максимумы. Угловое направление дифракционных максимумов (рис. 2а) относительно нулевого (соответствующего прямо прошедшему свету) определяется формулой $\sin \theta_m = \frac{m\lambda}{\Lambda}$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, где θ_m – угловое направление на дифракционный максимум m -го порядка; λ – длина световой волны в веществе; Λ – длина звуковой волны. В этом случае при малой длине взаимодействия направление распространения падающего света внутри области взаимодействия остаётся прямолинейным и оптическая неоднородность среды, связанная с изменением показателя преломления, влияет только на фазу света, прошедшего через акустический столб. Для света роль акустической волны в этом случае сводится к созданию движущейся со скоростью звука фазовой решётки с периодом, равным периоду звуковой волны. Такая дифракция света происходит по законам дифракции на обычной фазовой решётке.

При увеличении длины взаимодействия (что эквивалентно увеличению акустической частоты) возникшую периодическую структуру нельзя считать только фазовой решёткой, и происходит постепенный переход от дифракции на фазовой решётке (дифракции Рамана-Ната) к рассеянию на объемной периодической структуре (дифракции Брэгга). В переходной области между режимами Рамана-Ната и Брэгга при падении света под углом Брэгга помимо первого максимума наблюдаются дифракционные максимумы высших порядков. Угловые направления этих максимумов относительно падающего света сохраняются такими же, как и при дифракции Рамана-Ната, но распределение интенсивностей становится асимметричным. Наибольшую интенсивность имеет брэгговский (первый) максимум.

О дифракции Брэгга говорят в том случае, когда дифракционный спектр состоит из двух максимумов, соответствующих значениям $m = 0$ и $m = 1$ (рис. 2 в). Дифракционные максимумы других порядков отсутствуют. Интенсивность первого максимума будет наибольшей, если свет падает под углом к волновому фронту акустической волны, удовлетворяющим условию Брэгга:

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2\Lambda} \quad (1)$$

Угол θ_B , определяемый выражением (1), называется углом Брэгга.

Дифракция света в режиме Брэгга аналогична явлению дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке в твердом теле.

Принято, что вид дифракции зависит от величины безразмерного параметра $Q = \frac{2\pi L\lambda}{\Lambda^2}$, где L – длина звукового столба. При $Q \ll 1$ имеет место дифракция Рамана-Ната, при $Q \gg 1$ – дифракция Брэгга; значения $Q \sim 1$ соответствуют переходной области. Надо отметить, что эти условия являются достаточно сильными, практически дифракция Брэгга наблюдается при $Q \geq 4\lambda$. Это означает, что падающий под углом Брэгга световой пучок, пересекает не менее двух соседних плоскостей с максимальной (минимальной) плотностью.

Акустооптический модулятор представляет собой участок оптически прозрачной среды (например, плавленого кварца для видимой области или германия для среднего и дальнего ИК-диапазона), в котором с помощью прикрепленного с одной стороны пьезоэлектрического преобразователя, подключенного к ВЧ-генератору, возбуждается ультразвуковая волна (рис. 2). Если противоположная преобразователю сторона участка прозрачной среды срезана под некоторым углом и на нее нанесен поглотитель для акустической волны, то отражения назад не будет и в среде возникает бегущая акустическая волна.

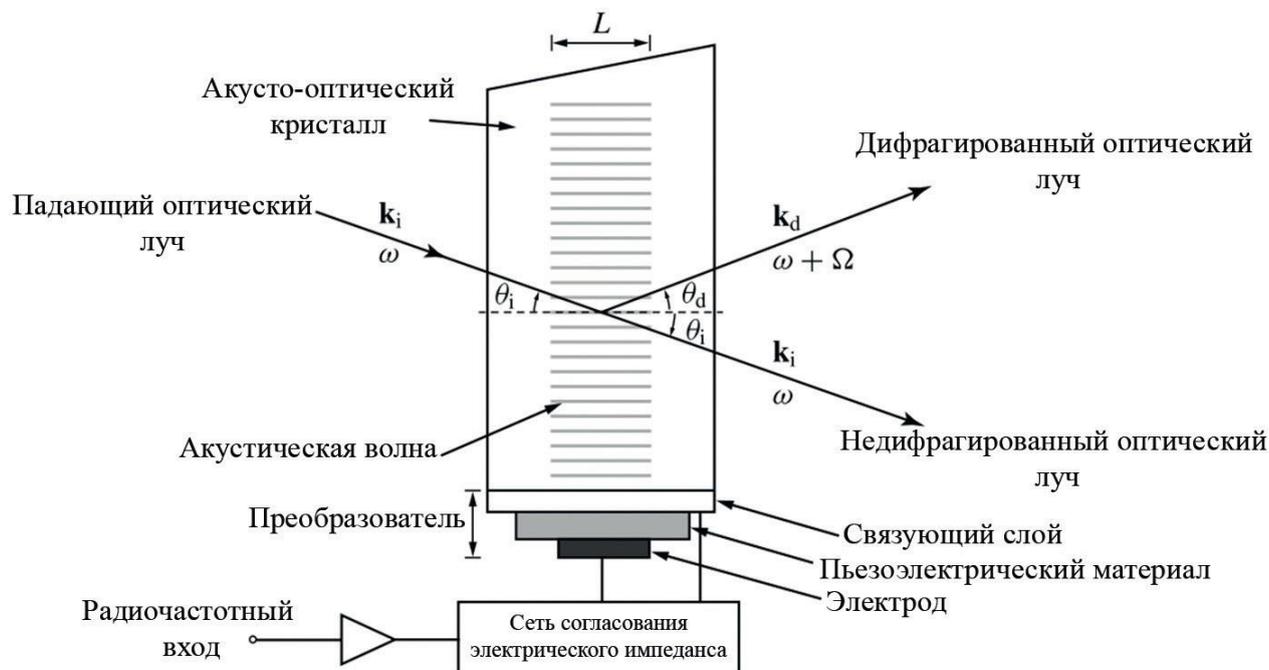


Рис. 3: Устройство акустооптического модулятора.

Если акустооптическую ячейку поместить в резонатор лазера, то до тех пор, пока к преобразователю приложено электрическое напряжение, в резонаторе существуют дополнительные потери. Действительно, часть лазерного пучка выводится из резонатора вследствие дифракции излучения на наведённой решётке. Если приложенное напряжение достаточно велико, то дополнительные потери приведут к прекращению лазерной генерации. Возвращение лазера в состояние с высокой добротностью происходит при выключении электрического напряжения на преобразователе.

В зависимости от задач в качестве модуляторов или дефлекторов могут быть использованы как толстые и тонкие, так и бегущие и стоячие дифракционные решетки. В коммерческих модуляторах часто используется кварцевое стекло, так как оно обладает низким коэффициентом поглощения в видимой и ближней инфракрасной области спектра, а также высокой нагрузочной способностью. Также на практике используется TeO_2 , который требует меньшую электрическую мощность возбуждения акустических волн, но является более дорогим материалом.

В качестве пьезоэлектрического передатчика для генерации ультразвуковой волны используется в основном LiNbO_3 .

Активная среда (кристалл, керамика, стекло, легированные редкоземельными ионами) твердотельного лазера, имеет хорошие возможности запасания энергии. Для длин волн в спектральной области 1 мкм, наиболее распространены импульсные лазеры на основе материалов, легированных ионами Nd^{3+} (Nd:YAG , Nd:YVO_4 , Nd:YLF и др.).

Небольшой твердотельный лазер с активной модуляцией добротности может излучать 100 мВт средней мощности в импульсах длительностью 10 нс с частотой повторения 1 кГц и 100 мкДж энергии импульса. Достигаемая пиковая мощность ≈ 9 кВт.

Самые большие энергии импульсов и короткие длительности импульсов достигаются при низких частотах повторения импульсов (интервал между импульсами менее времени жизни верхнего уровня). При этом несколько уменьшается средняя выходная мощность. Для Nd:YAG лазера с диодной накачкой около 10 Вт энергия импульса может достигать нескольких мДж.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Внимание!

- 1) Перед началом сборки экспериментальных установок внимательно изучите устройство и порядок включения всех компонент лазера в разделе «Комплектация».
- 2) При работе с лазерным излучением обязательно используйте лазерные защитные очки.
- 3) После установки положения каждого элемента лазера на рельсе, зафиксируйте их с помощью прижимных винтов на оптической каретке.

Экспериментальная установка

Внешний вид макета лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ работающего в режиме активной модуляции добротности показан на рис. 3. Основными компонентами установки являются диодный лазерный модуль накачки (1), терминал управления диодным лазерным модулем (2), оптический рельс (3), коллимирующая линза в держателе (4), фокусирующая линза в держателе (5), входное плоское зеркало резонатора в держателе (6), активный элемент из кристалла $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ (7), акустооптический модулятор в держателе (8), блок управления акустооптического модулятора (9), выходное сферическое зеркало резонатора в держателе (10), нейтральный и инфракрасный светофильтры (11), фотодетектор (12), юстировочный лазер в держателе (13), цифровой осциллограф (14), диафрагма (15), визуализатор лазерного излучения (16).

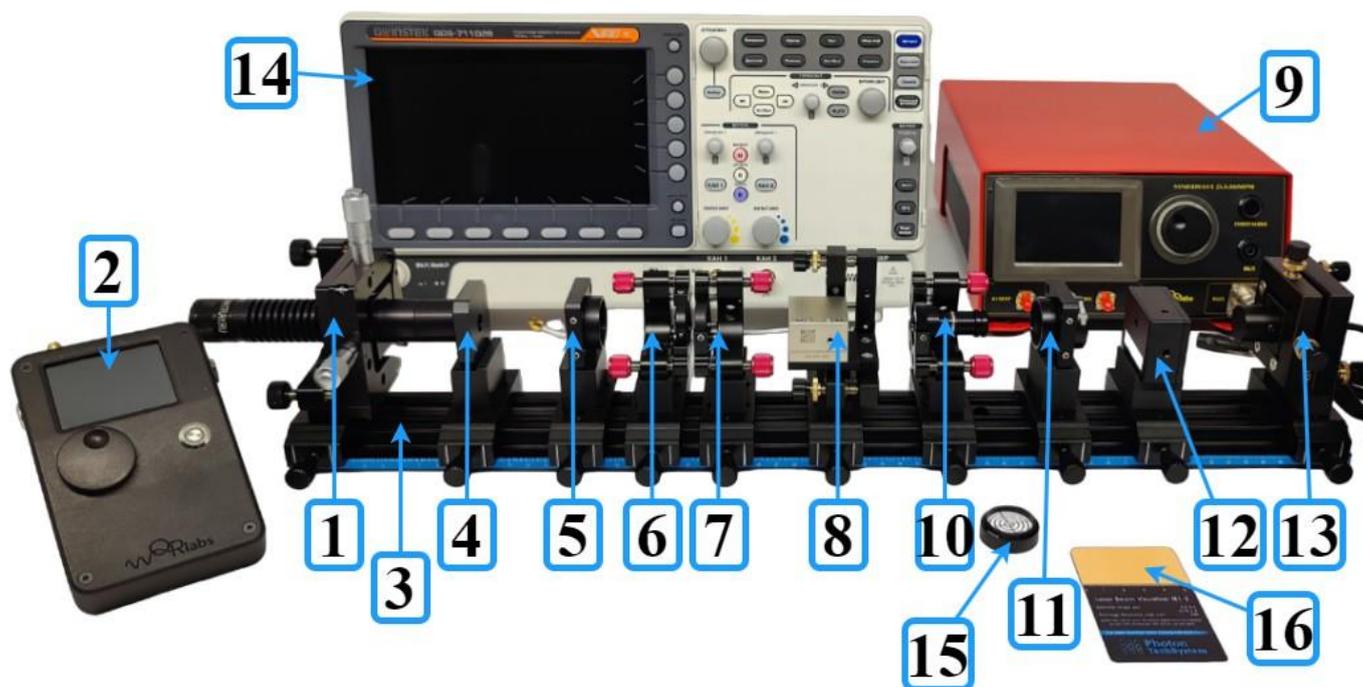


Рис. 4: Внешний вид экспериментальной установки на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ работающего в режиме активной модуляции добротности.

Упражнение №1. Изучение принципа работы и сборка лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$, работающего на длине волны 1064 нм

Соберите макет твердотельного лазера согласно приведённой ниже инструкции.

- 1) Закрепите оптический рельс на оптическом столе или другом жёстком основании с помощью винтов М6 или специальных прижимов.
- 2) Установите юстировочный лазер на край оптического рельса.
- 3) Установите первую диафрагму с мишенью на расстоянии около 1 см от юстировочного лазера. Вторую диафрагму с мишенью установите на противоположном конце оптического рельса (рис. 5)



Рис. 5: Настройка оптической оси твердотельного лазера YAG:Nd с помощью юстировочного лазера видимого спектрального диапазона.

- 4) Включите юстировочный лазер. Вращая регулируемые винты кинематического держателя юстировочного лазера, добейтесь попадания красного луча в центры обеих мишеней.
- 5) Переместите дальнюю от юстировочного лазера диафрагму в центр оптического рельса и проверьте попадание красного лазерного пучка в центр мишени. Далее верните ее на край рельса.

Установите на рельс акустооптический модулятор на расстоянии 6 см от первой мишени как показано на рисунке 6.



Рис. 6: Настройка положения акустооптического модулятора.

- 6) Подключите модулятор к блоку управления. Установите ВЧ мощность 5 Вт, частоту 300 Гц.
- 7) Включите юстировочный лазер. Включите блок управления модулятором. Отраженные лучи от первой поверхности модулятора заведите в центр первой диафрагмы. На второй диафрагме наблюдайте дифракционную картинку из нескольких максимумов красного лазера.

- 8) Вращая винты держателя модулятора добейтесь равномерного распределения интенсивности излучения между нулевым и первым максимумом.
- 9) Уберите акустооптический модулятор с оптического рельса.
- 10) Установите на край оптического рельса диодный лазер накачки в держателе. Далее установите вторую диафрагму на расстоянии около 6 см от диодного лазера накачки (рис.7).



Рис. 7: Установка оптической оси твердотельного лазера YAG:Nd с помощью юстировочного лазера видимого спектрального диапазона.

- 11) Включите в сеть терминал управления диодного лазера, настройте непрерывный режим работы лазера установив значения частоты 0 Гц и заполнения 100%. Для безопасной работы с лазерным излучением воспользуйтесь защитными лазерными очками.
- 12) Установите ток инжекции диодного лазера накачки равный 270 мА и включите лазер. Вращая регулировочные винты держателя лазера накачки, убедитесь, что излучение примерно попадает в центр обеих диафрагм. Контроль положения и формы луча осуществляйте с помощью визуализатора лазерного излучения. Уберите с рельса вторую диафрагму. Обратите внимание на особенность диодных лазеров, обусловленную большой расходимостью лазерного излучения.
- 13) Установите коллиматор на расстоянии 13,86 мм от диодного лазера накачки. Изменяя расстояние между коллиматором и лазерным модулем накачки, добейтесь коллимированного лазерного пучка, т.е. плоскопараллельного пучка, который практически не изменяет своей формы на всей длине оптического рельса. Для контроля формы лазерного пучка накачки используйте визуализатор, возвратно перемещая его вдоль оптического рельса (рис. 8).



Рис. 8: Настройка положения коллиматора.

- 14) Установите вторую диафрагму с мишенью после коллиматора на расстоянии около 6 см (рис. 9). С помощью юстировочных винтов держателя полупроводникового лазерного модуля добейтесь попадания коллимированного излучения лазера в центр обеих диафрагм.



Рис. 9: Настройка траектории лазерного луча накачки твердотельного лазера YAG:Nd.

- 15) Установите фокусирующий объектив на расстоянии примерно 6 см от коллимирующей линзы. Установите вторую диафрагму в фокусе объектива. Проверьте попадание сфокусированного лазерного луча накачки в центр первой и второй диафрагмы. Используйте регулируемые винты держателя лазера накачки для направления сфокусированного излучения накачки в центр диафрагм (рис. 10). Уберите вторую диафрагму с рельса.



Рис. 10: Настройка положения фокусирующего объектива.

- 16) С помощью визуализатора излучения и шкалы рельса определите и запомните положение фокуса излучения накачки диодного лазера. Установите стержень из кристалла YAG:Nd в специальном держателе в фокусе излучения накачки диодного лазера. Включите юстировочный диодный лазер. Вращая винты кинематического держателя активного элемента, заведите отраженные лучи в центр диафрагмы (рис. 11).



Рис. 11: Настройка положения активного элемента из кристалла YAG:Nd.

- 17) За фокусирующим объективом на расстоянии около 2 мм от активного элемента установите входное плоское зеркало в держателе (рис. 12). Вращая винты кинематического держателя плоского зеркала, заведите отраженные лучи от плоского зеркала в центр диафрагмы.



Рис. 12: Настройка положения входного зеркала резонатора.

- 18) За держателем с кристаллом YAG:Nd установите выходное плоское зеркало резонатора лазера в держателе. Общая длина резонатора лазера должна составлять около 5 см (рис.13). Вращая винты кинематического держателя сферического зеркала, заведите отраженные лучи юстировочного лазера в центр диафрагмы.

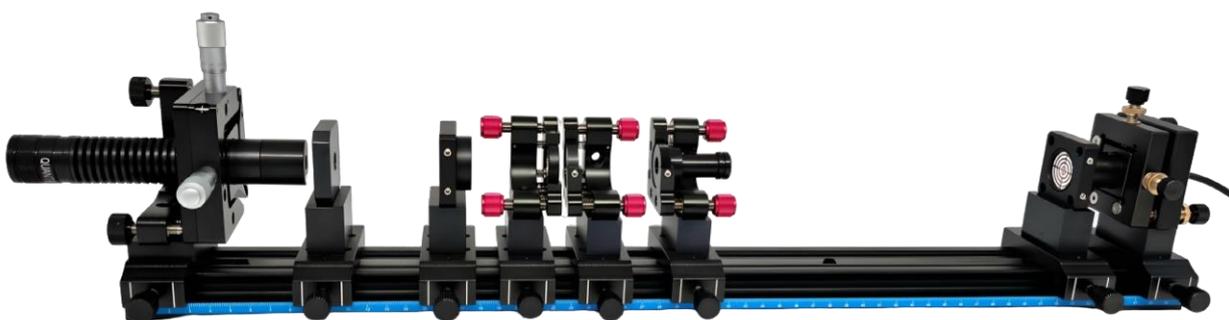


Рис. 13: Настройка положения выходного зеркала резонатора.

- 19) После выходного плоского зеркала резонатора установите на оптический рельс держатель с оптическим светофильтром, который поглощает излучение накачки на длине волны 808 нм и пропускает лазерную генерацию в области 1064 нм (рис. 14).

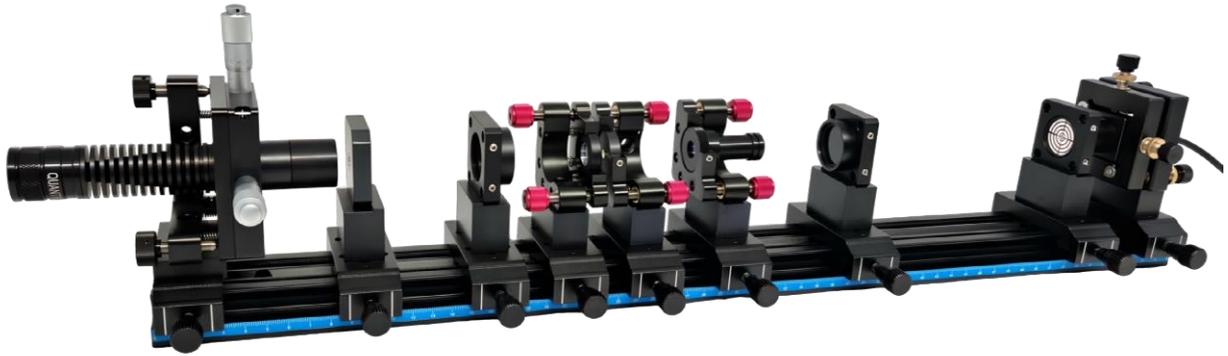


Рис. 14: Установка оптического светофильтра.

- 20) После держателя с оптическим светофильтром установите фотодетектор (рис. 15). С помощью BNC кабеля соедините его с цифровым осциллографом или мультиметром.

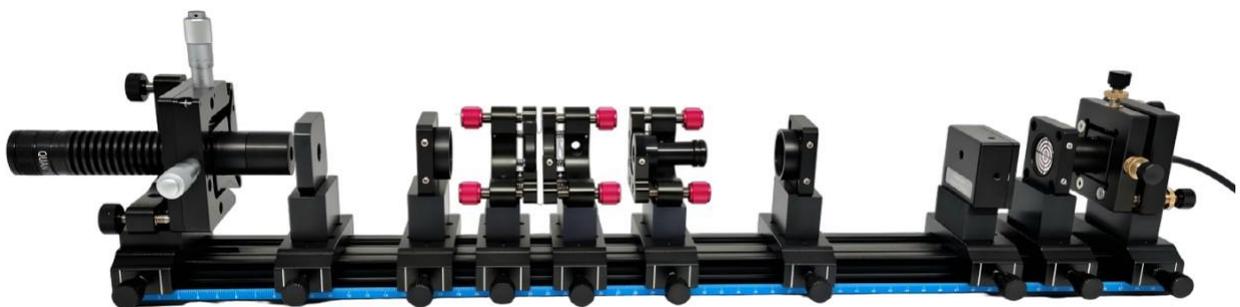


Рис. 15: Измерение интенсивности излучения лазера на кристалле YAG:Nd.

- 21) Установите ток инжекции диода накачки на терминале управления 400 мА. Включите лазер накачки. Вращая регулировочные винты держателя выходного сферического зеркала, добейтесь появления лазерной генерации. Используйте визуализатор для обнаружения генерации. При отсутствии лазерной генерации можно увеличить ток инжекции до 500 мА и вновь провести настройку положения сферического зеркала. Если увеличение тока инжекции не приводит к появлению генерации YAG:Nd лазера, то необходимо заново повторить настройку лазера по схеме описанной выше.
- 22) Вращение зеркал резонатора будет приводить к изменению формы лазерного пучка генерации. Добейтесь появления пучка близкого к круглой форме минимального размера.
- 23) Проверьте попадание лазерной генерации YAG:Nd лазера в активную область фотодетектора. Включите мультиметр и зафиксируйте сигнал излучения лазерной генерации. Настройте на мультиметре максимальное значение интенсивности лазерной генерации с помощью юстировки положения узлов лазера: выходного плоского зеркала резонатора, лазерного модуля накачки, входного плоского зеркала резонатора, активного элемента.

Упражнение №2. Сборка YAG:Nd лазера в режиме активной модуляции добротности

- 1) Выполните упражнение №1.
- 2) Перемещая выходное зеркало резонатора, увеличьте длину оптического резонатора до 10 см (рис.16).

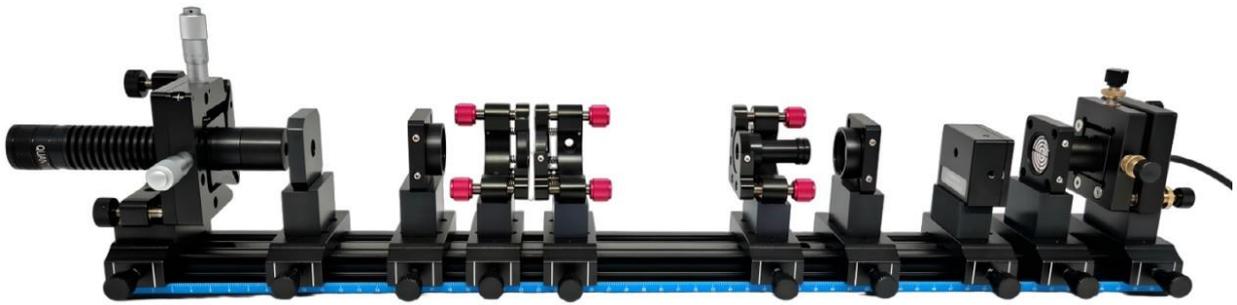


Рис. 16: Увеличение длины оптического резонатора.

- 3) Установите ток инжекции 600 мА. Включите лазерный модуль накачки. Вращая винты держателя выходного зеркала, получите генерацию лазерного излучения. Контроль получения генерации осуществляйте с помощью визуализатора лазерного излучения. Настройте максимальную интенсивность выходного излучения YAG:Nd лазера с помощью фотодетектора и мультиметра.
- 4) Акустооптический модулятор установите на оптический рельс между активным элементом и выходным зеркалом резонатора. Включите диодный лазер накачки с током инжекции 700 мА и добейтесь появления лазерной генерации на длине волны 1064 нм.

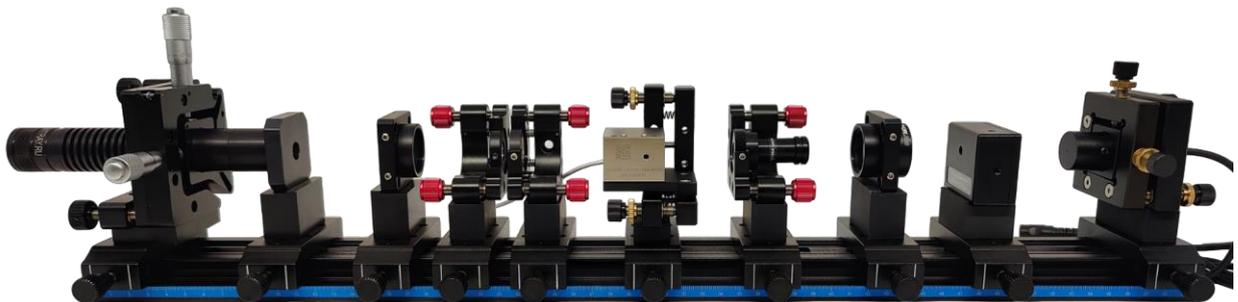


Рис. 17: Установка акустооптического модулятора в оптический резонатор.

- 5) Установите перед фотодетектором нейтральный светофильтр для ослабления интенсивности лазерной генерации. Проверьте попадание лазерной генерации в активную область фотодетектора. Соедините фотодетектор с каналом 1 осциллографа. Используйте нагрузку с номиналом 50 Ом. В настройках осциллографа выберите тип синхронизации по 1 каналу, режим «пик. детектор». Установите на осциллографе развертку по времени 500 мкс. Получите на осциллографе импульсы лазерной генерации (рис. 18). Добейтесь появления стабильных импульсов с максимальной амплитудой с помощью юстировки положения узлов лазера: кристалла YAG:Cr, выходного плоского зеркала резонатора, лазерного модуля накачки, входного плоского зеркала резонатора, активного элемента.



Рис. 18: Осциллограмма импульсного режима работы YAG:Nd лазера.

- 6) Установите развертку осциллографа по времени 200 нс/дел. Получите на осциллографе одиночный лазерный импульс (рис.18). Измерьте длительность лазерного импульса установив курсоры осциллографа на половине интенсивности.

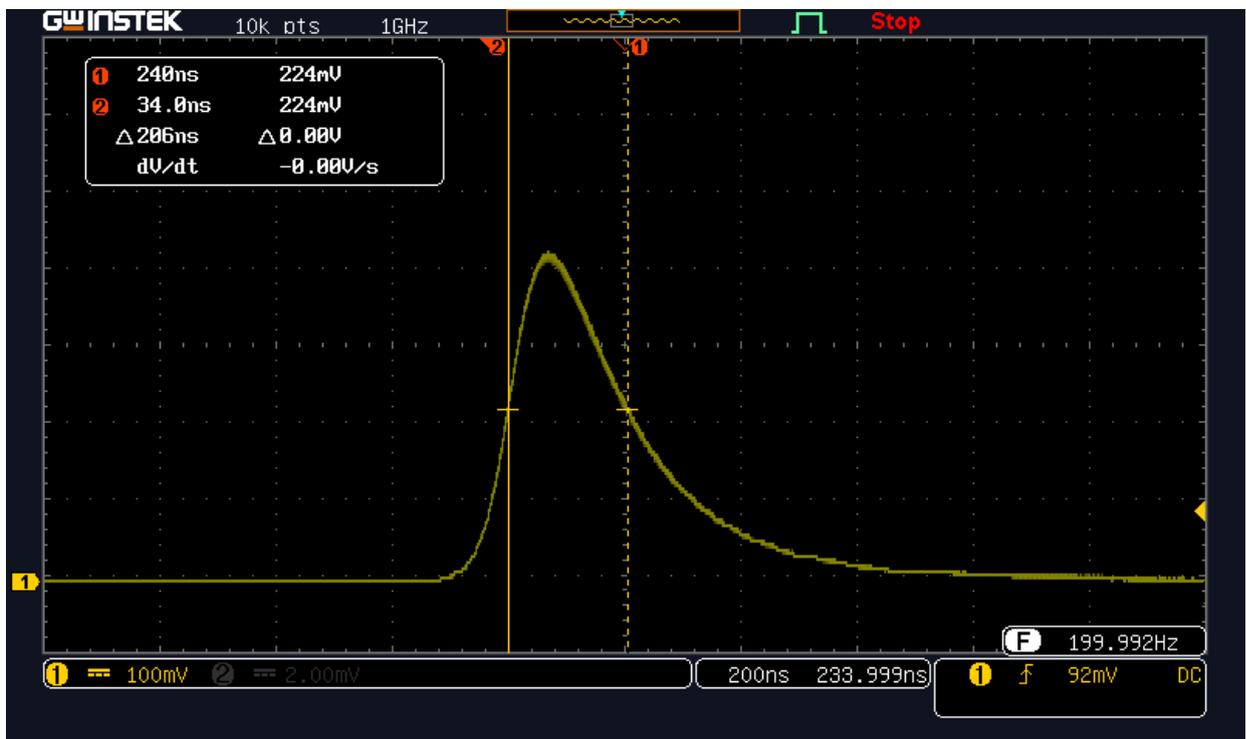


Рис. 19: Осциллограмма одиночного лазерного импульса.

Библиографический список

- 1) Звелто О. Принципы лазеров, 4-ое изд. - Санкт-Петербург: Лань, 2008. - 720 с.
- 2) Айхлер Ю., Айхлер Г.-И. Лазеры. Исполнение, управление, применение. – М.: Техносфера, 2008. - 440 с.
- 3) Пржеvusкий А.К., Никоноров Н.В. Конденсированные лазерные среды: Учебное пособие. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. - 147 с.
- 4) Спектрометр ближнего ИК диапазона на акустооптическом перестраиваемом фильтре (АОПФ): Лабораторная работа /Сост.: А.В. Киселев. – М.: МФТИ, 2007.

Лабораторная работа №5. Импульсный твердотельный лазер на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ с пассивной модуляцией добротности

Цель работы: изучить физические принципы работы лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ работающего в режиме пассивной модуляции добротности, собрать макет этого лазера.

Принадлежности: полупроводниковый лазерный диод, коллиматор, объектив, входное плоское зеркало резонатора, активный элемент из кристалла $Y_3Al_5O_{12} : Nd$, насыщающийся поглотитель из кристалла $Y_3Al_5O_{12} : Cr^{4+}$, выходное сферическое зеркало резонатора ($R@1064$ нм $> 99,9\%$), светофильтр, фотодетектор, осциллограф, диафрагма, визуализатор, оптический рельс, юстировочный лазер.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Метод модуляции добротности позволяет получать лазерную генерацию в виде коротких импульсов (длительностью от нескольких наносекунд) с высокой пиковой мощностью.

Предположим, что в резонатор лазера помещен затвор. Если затвор закрыт, то генерация возникнуть не может и инверсия населенностей может достичь значения, которое намного превышает пороговое, имеющее место в отсутствие затвора. Если теперь резко открыть затвор, то усиление в лазере существенно превысит потери и накопленная энергия выделится в виде короткого и интенсивного светового импульса. Поскольку при этом происходит переключение добротности резонатора от низкого к высокому значению, то данный метод называется модуляцией добротности.

Исследуем временную последовательность событий с помощью рисунка 1, на котором мы предполагаем, что накачка происходит с постоянной скоростью в течение интервала времени $-t_\omega \leq t \leq 0$ (рис. 1а.) и что потери в лазере $\gamma(t)$ переключаются в момент времени $t = 0$ от очень большого значения, соответствующего закрытому затвору, до значения γ , отвечающего нормальной работе лазера при открытом затворе. Таким образом, при $t < 0$ генерация прекращается, и инверсия населенностей возрастает до очень большой величины N_i .

Длительность импульса накачки t_ω должна быть меньше времени релаксации верхнего состояния или, возможно, сравнима с ним по величине. В противном случае, если $t_\omega \gg T$, то большая часть энергии накачки будет теряться вследствие спонтанной релаксации, а не накапливаться в виде энергии инверсии населенностей. Когда затвор открывается (при $t > 0$), усиление лазера значительно превосходит потери резонатора и число фотонов $q(t)$ резко увеличивается от начального значения q_i , устанавливаемого спонтанным излучением ($q_i \approx 1$). В результате увеличения $q(t)$ инверсия населенности будет уменьшаться от её начального значения N_i . Когда $N(t)$ упадет до величины пороговой инверсии населенностей N_p , то будем иметь $q = 0$ и световой импульс будет иметь максимальную мощность. Это произойдет в момент времени $t = t_p$ на рис. 1б. При $t > t_p$ в лазере вместо усиления мы будем иметь потери, и, как следствие, мощность импульса уменьшится до нуля. В это же время инверсия населенностей достигнет окончательной величины N_f . Заметим, что передний фронт импульса оказывается короче его заднего фронта. На рис. 1б. временной масштаб при $t > 0$ сильно отличается от масштаба при $t < 0$.

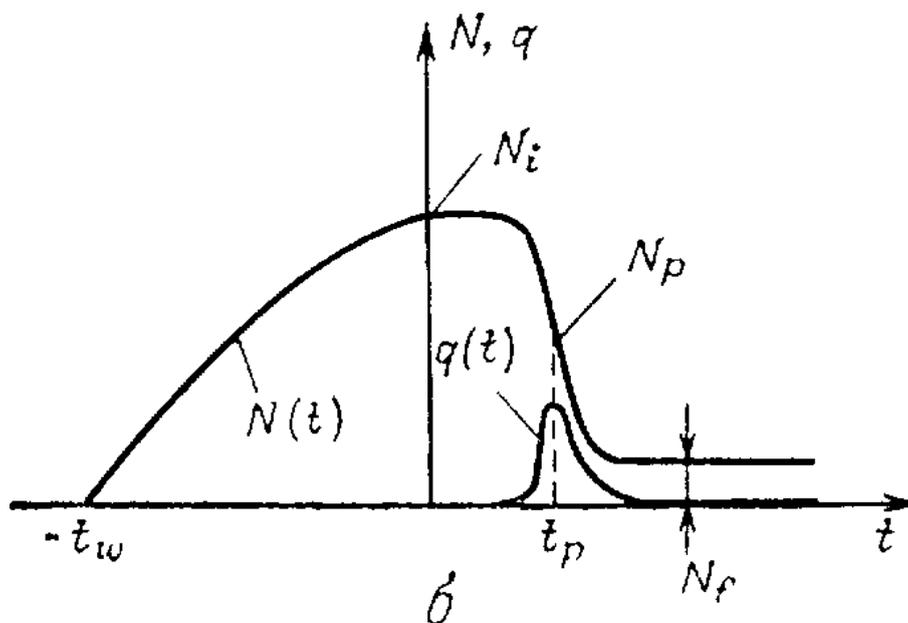
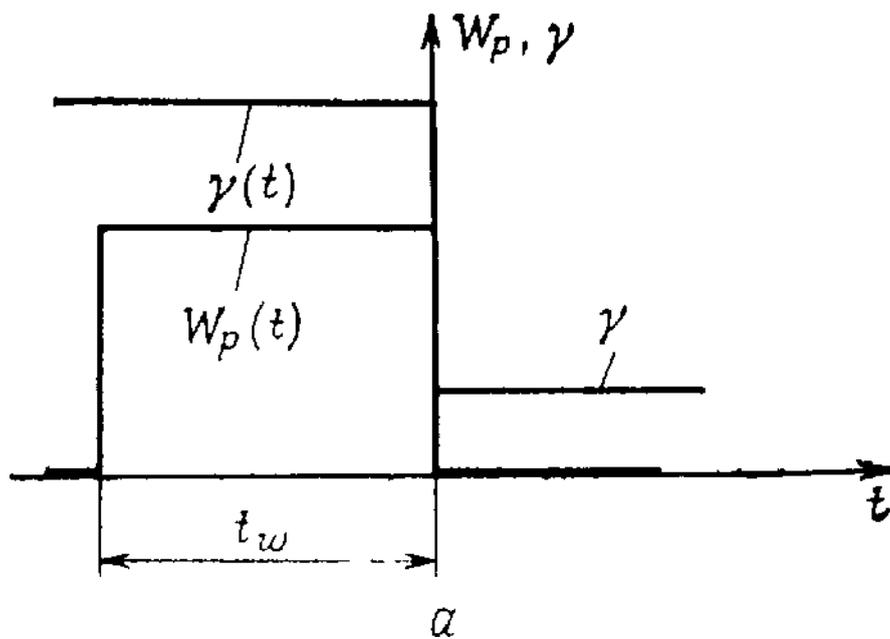


Рис. 1. Последовательность событий в лазере с модулированной добротностью (быстрое включение), а – временные зависимости скорости накачки W_p , потерь в резонаторе $\gamma(t)$; б – временные зависимости инверсии населенности $N(t)$ и числа фотонов $q(t)$.

- Из вышеприведенного ясно, что для осуществления модуляции добротности необходимо иметь достаточно большое время жизни верхнего лазерного состояния, чтобы инверсия населённости могла достичь больших значений.
- Представленная на рис. 2 временная зависимость модуляции добротности предполагает, что затвор открывается мгновенно, или по крайней мере очень быстро по сравнению с временем развития импульса t_p (быстрое переключение). В случае медленного переключения могут возникать многократные импульсы. Каждый импульс образуется в тот момент времени, когда мгновенное значение усиления $g(t)$ равно мгновенному значению потерь $\gamma(t)$.

После каждого импульса усиление сбрасывается до значения, которое по величине меньше потерь, и дальнейшая генерация невозможна до тех пор, пока затвор не откроется еще больше и потери не станут меньше усиления.

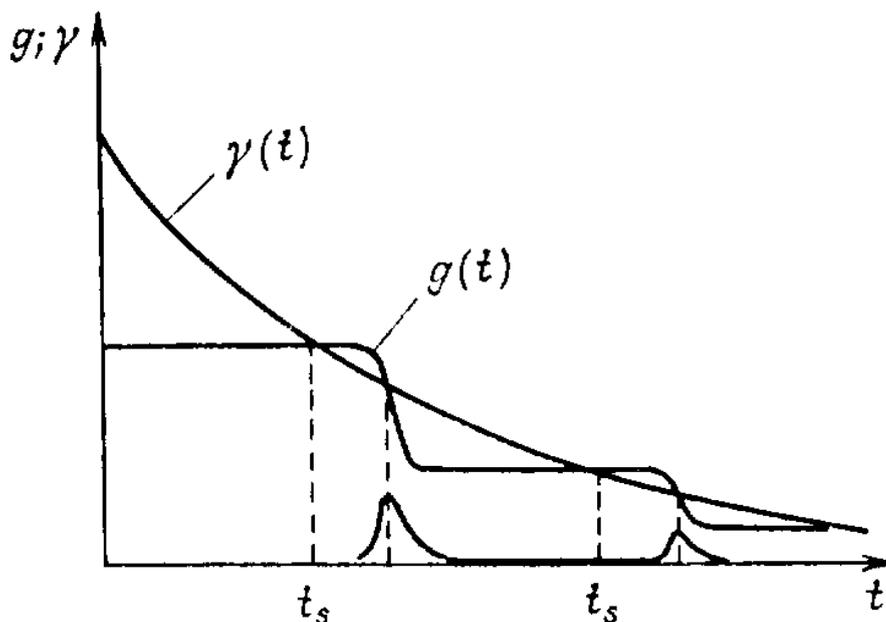


Рис. 2. Временная зависимость модуляции добротности.

Последовательность многократных импульсов в случае медленного включения. На рисунке представлено усиление лазера $g(t) = \delta N(t)l$, где l — длина активной среды.

Лазеры с модулированной добротностью могут работать либо в импульсном режиме, либо в импульсно-периодическом режиме. При этом для обеспечения импульсно-периодического режима необходима непрерывная накачка. В зависимости от режима работы лазера применяют активный или пассивный методы модуляции. Модуляторы добротности, в которых используются управляющие устройства, являются активными. Однако модуляцию добротности можно осуществить и автоматически, без внешних управляющих устройств, такие модуляторы называются пассивными.

ПАССИВНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ДОБРОТНОСТИ НА ОСНОВЕ НАСЫЩЕННОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ

Насыщающиеся поглотители используются как пассивные затворы, автоматически срабатывающие при превышении определённой входной интенсивности для модуляции добротности либо синхронизации мод лазеров — в целях генерации коротких лазерных импульсов.

В насыщающихся поглотителях пропускание есть функция интенсивности поглощённого света. Коэффициент поглощения α понижается согласно:

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{I}{I_s}}$$

в зависимости от поглощённой интенсивности I , причём α_0 есть максимальный показатель поглощения при $I = 0$, а I_s — зависящая от вещества интенсивность насыщения, при которой α падает до уровня $\frac{\alpha_0}{2}$. Пропускание $T = \exp(-\alpha x)$ слоя толщиной x возрастает в зависимости от поглощённой интенсивности.

Насыщающееся поглощение проявляет себя опустошением основного состояния поглощающих атомов или молекул. При больших поглощённых интенсивностях величины населённости основного состояния и возбуждённого состояния будут равными, поэтому число поглощённых

фотонов равно числу фотонов индуцированного излучения, так что теоретически получается: $\alpha \rightarrow 0$ и $T = 1$.

С точки зрения лазерной техники особый интерес представляют насыщающиеся поглотители высокого быстродействия, благодаря чему после уменьшения интенсивности излучения вновь быстро устанавливается начальное пропускание T_0 . Для неодимовых лазеров, главным образом, используют в качестве насыщающихся поглотителей кристаллы иттрий-алюминиевого граната, легированные ионами Cr^{4+} ($I_s \approx 6 \frac{\text{кВт}}{\text{см}^2}$ — вычисление на основе плотности пороговой энергии $27 \frac{\text{мДж}}{\text{см}^2}$ и времени 4 мкс). Варьируя концентрацию ионов Cr^{4+} и толщину кристалла можно получить заданное начальное пропускание T_0 . На рисунке 3 представлена схема энергетических уровней насыщающегося поглотителя на основе кристалла $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Cr}^{4+}$ и его спектр поглощения.

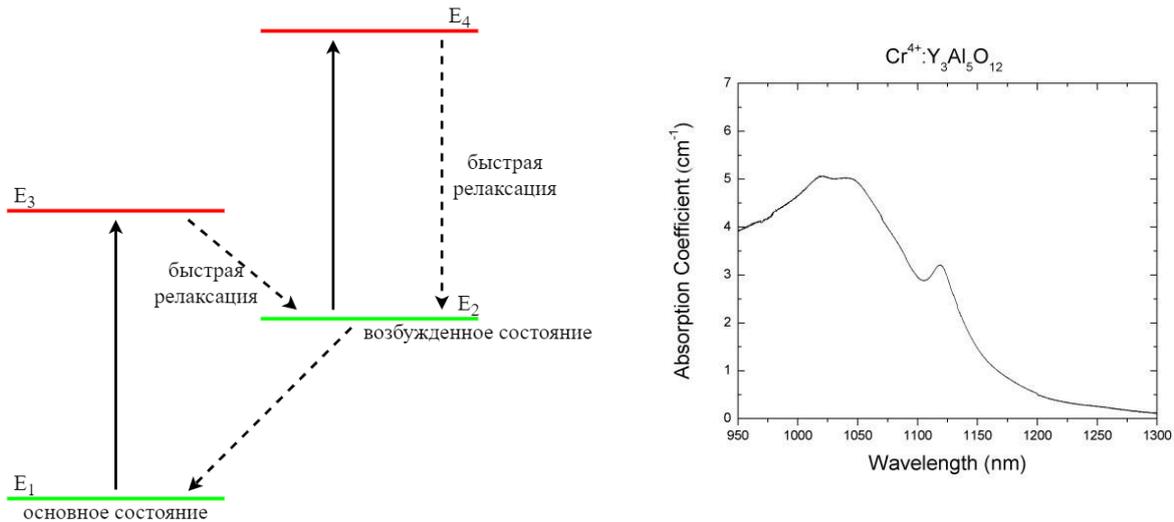


Рис. 3. (а) Схема энергетических уровней ионов Cr^{4+} в кристалле YAG. (б) Спектр поглощения кристалла YAG:Cr

Энергетическое расстояние между уровнями 1 – 3 и 2 – 4 соответствует энергии кванта генерируемого излучения ν_l , поэтому поглощение здесь возможно как с основного (1) уровня, так и с уровня 2, об этом часто говорят как о поглощении из основного (gs) и возбужденного (es) состояний. Переходы с поглощением $1 \rightarrow 3$ и $2 \rightarrow 4$ характеризуется своими сечениями σ_{gs} и σ_{es} . Время релаксации с уровня 2 $\tau_{sa} = 3,4 \times 10^{-6}$ с, релаксация с уровней 3 и 4 является быстрой, так что $\tau_{32}, \tau_{42} \ll \tau_{sa}$. Насыщение поглощения здесь наблюдается в присутствии мощного излучения на частоте ν_l при существенном обеднении основного уровня, так что уменьшается поглощение при переходах $1 \rightarrow 3$, при этом происходит накопление ионов хрома на уровне

(2). Поглощение из возбужденного состояния (переходы $2 \rightarrow 4$) несколько ухудшают контраст просветления модулятора. Пассивные модуляторы на основе $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ относят к «медленным» модуляторам, так как время релаксации τ_{sa} много больше длительности генерируемого моноимпульса, и на этапе генерации моноимпульса можно пренебречь скоростью релаксационных переходов.

В качественном отношении работа лазера в режиме пассивной модуляции добротности при непрерывной накачке может быть представлена следующим образом. После включения накачки происходит увеличение населённости на верхнем лазерном уровне, что приводит к росту коэффициента усиления в некоторой полосе частот. В начале этого этапа поглощение в пассивном модуляторе максимально, в полосе частот усиления имеется только шумовое спонтанное излучение, коэффициент усиления меньше коэффициента потерь, и генерация не развивается. При определённой населённости верхнего лазерного уровня коэффициент усиления на некоторой частоте сравнивается с коэффициентом потерь, вносимых как НП, так и резонатором, то есть для излучения на этой частоте достигнут порог генерации. Об этом пороге часто говорят как о «втором пороге» генерации, понимая под «первым порогом» генерации порог в отсутствие НП.

Итак, при достижении второго порога генерации начинается быстрый рост интенсивности излучения на частоте генерации, что приводит к началу насыщения поглощения (просветления) пассивного модулятора, что в свою очередь приводит к ещё большему увеличению интенсивности генерируемого излучения. В результате возникает лавинообразный процесс, в результате которого сначала насыщается поглощение НП, а затем и усиление активной среды, что приводит к генерации моноимпульса. После окончания моноимпульса пассивный модулятор начинает восстанавливать своё высокое пропускание со временем релаксации возбуждённого уровня, а в активной среде начинается рост населённости на верхнем лазерном уровне. Существенно важным моментом здесь является то, что параметры НП и активной среды должны быть такими, чтобы сначала произошло насыщение поглощения в пассивном модуляторе, а затем насыщение усиления в активной среде.

Система балансных уравнений для населённостей энергетических уровней $YAG:Cr^{4+}$: в присутствии излучения на частоте ν_l , интенсивность которого – I_l , запишется в виде

$$\begin{cases} \square \frac{dN_{gs}}{dt} = -\frac{I_l}{h\nu_l} \sigma_{gs} N_{gs} + \frac{N_{es}}{\tau_{sa}}, \\ \square \frac{dN_{es}}{dt} = \frac{N_3}{\tau_{32}} + \frac{N_4}{\tau_{42}} - \frac{N_{es}}{\tau_{sa}} - \frac{I_l}{h\nu_l} \sigma_{es} N_{es}, \\ \square \frac{dN_3}{dt} = \frac{I_l}{h\nu_l} \sigma_{es} N_{es} - \frac{N_3}{\tau_{32}}, \\ \square \frac{dN_4}{dt} = \frac{I_l}{h\nu_l} \sigma_{es} N_{es} - \frac{N_4}{\tau_{42}}. \end{cases} \quad (1)$$

Так как сброс ионов Cr^{4+} с уровней 3 и 4 быстрый, то на них нет накопления частиц и $\frac{dN_3}{dt} \approx 0$, $\frac{dN_4}{dt} \approx 0$, что позволяет записать уравнения 3 и 4 системы (1) в виде

$$N_3 \approx \tau_{32} \sigma_{gs} N_{gs} \frac{I_l}{h\nu_l},$$

$$N_4 \approx \tau_{42} \sigma_{es} N_{es} \frac{I_l}{h\nu_l}.$$

С учётом сделанных предположений система уравнений (1) сведётся к

$$\frac{dN_{gs}}{dt} = -\frac{I_l}{h\nu_l} \sigma_{gs} N_{gs} - \frac{N_{sa} - N_{gs}}{\tau_{sa}}, \quad (2)$$

$$N_{gs} + N_{es} = N_{sa}. \quad (3)$$

Коэффициент поглощения пассивного модулятора на частоте ν_l

$$k_{abs}^{sa} = \sigma_{gs} N_{gs} + \sigma_{es} N_{es}. \quad (4)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Внимание!

- 1) Перед началом сборки экспериментальных установок внимательно изучите устройство и порядок включения всех компонент лазера в разделе «Комплектация».
- 2) При работе с лазерным излучением обязательно используйте лазерные защитные очки.
- 3) После установки положения каждого элемента лазера на рельсе, зафиксируйте их с помощью прижимных винтов на оптической каретке.

Экспериментальная установка

Внешний вид макета лазера на кристалле YAG:Nd, работающего в режиме пассивной модуляции добротности, показан на рис. 4. Он состоит из диодного лазерного модуля накачки (1), терминала управления диодным лазерным модулем (2), оптического рельса (3), коллимирующей линзы (4), фокусирующей линзы (5), входного плоского зеркала (6), активного элемента из кристалла $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ (7), насыщающегося поглотителя из кристалла $Y_3Al_5O_{12} : Cr^{4+}$ (8), выходного сферического зеркала (9), оптического светофильтра (10), диафрагмы (11), фотодетектора (12), цифрового осциллографа (13), цифрового мультиметра (14), визуализатора лазерного излучения (15).

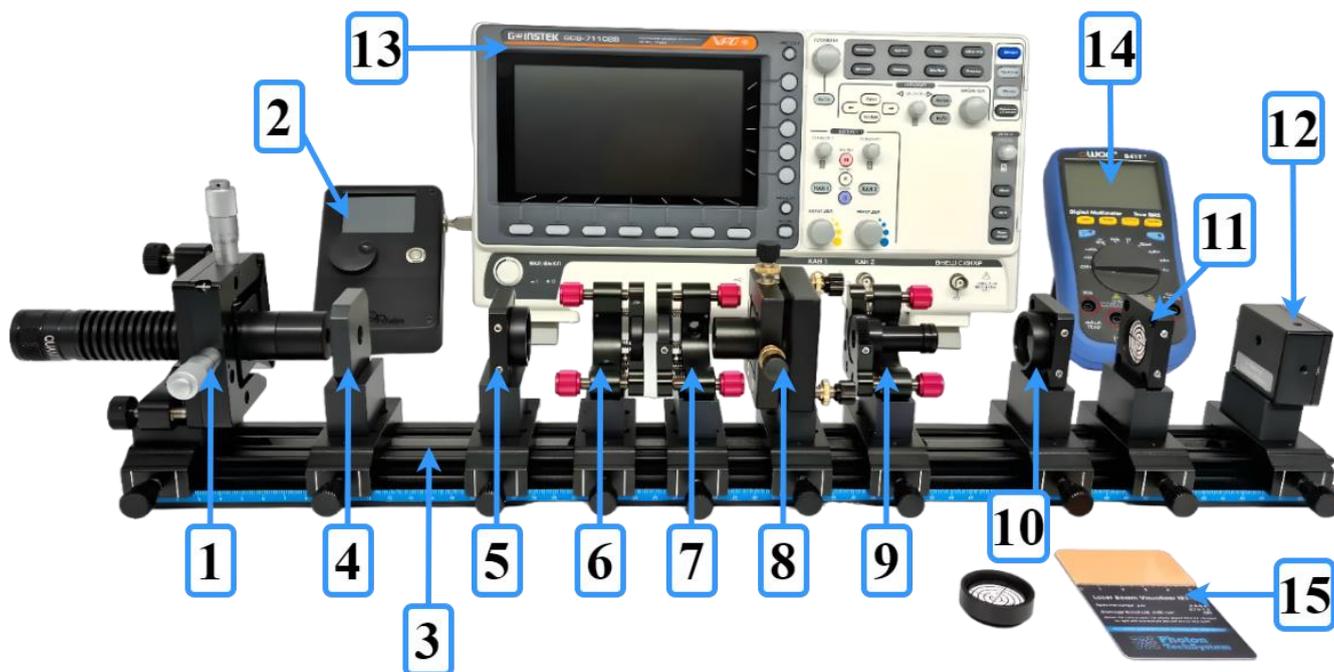


Рис. 4: Внешний вид экспериментальной установки макета лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$

Упражнение №1. Изучение принципа работы и сборка лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ работающего на длине волны 1064 нм

Сборка лазера YAG:Nd работающего в режиме генерации второй гармоники начинается со стороны макета YAG:Nd лазера работающего на длине волны 1064 нм. Соберите макет твердотельного лазера согласно приведённой ниже инструкции.

- 1) Закрепите оптический рельс на оптическом столе или другом жёстком основании с помощью винтов М6 или специальных прижимов.
- 2) Установите юстировочный лазер на край оптического рельса.
- 3) Установите первую диафрагму с мишенью на расстоянии около 1 см от юстировочного лазера. Вторую диафрагму с мишенью установите на противоположном конце оптического рельса (рис. 5).



Рис. 5: Настройка оптической оси твердотельного лазера YAG:Nd с помощью юстировочного лазера видимого спектрального диапазона.

- 4) Включите юстировочный лазер. Вращая регулируемые винты кинематического держателя юстировочного лазера, добейтесь попадания красного луча в центры обеих мишеней.
- 5) Переместите дальнюю от юстировочного лазера диафрагму в центр оптического рельса и проверьте попадание красного лазерного пучка в центр мишени.
- 6) Установите на край оптического рельса диодный лазер накачки в держателе. Далее установите вторую диафрагму на расстоянии около 6 см от диодного лазера накачки (рис.6).



Рис. 6: Установка оптической оси твердотельного лазера YAG:Nd с помощью юстировочного лазера видимого спектрального диапазона.

- 7) Включите в сеть терминал управления диодного лазера, настройте непрерывный режим работы лазера, установив значения частоты 0 Гц и заполнения 100%. Для безопасной работы с лазерным излучением воспользуйтесь защитными лазерными очками.
- 8) Установите ток инжекции диодного лазера накачки равный 270 мА и включите лазер. Вращая регулировочные винты держателя лазера накачки, убедитесь, что излучение примерно попадает в центр обеих диафрагм. Контроль положения и формы луча осуществляйте с помощью визуализатора лазерного излучения. Уберите с рельса вторую диафрагму. Обратите внимание на особенность диодных лазеров, обусловленную большой расходимостью лазерного излучения.
- 9) Установите коллиматор на расстоянии 13,86 мм от диодного лазера накачки. Изменяя расстояние между коллиматором и лазерным модулем накачки, добейтесь коллимированного лазерного пучка, т.е. плоскопараллельного пучка, который практически не изменяет своей формы на всей длине оптического рельса. Для контроля формы лазерного пучка накачки используйте визуализатор, возвратно перемещая его вдоль оптического рельса (рис. 7).



Рис. 7: Настройка положения коллиматора.

- 10) Установите вторую диафрагму с мишенью после коллиматора на расстоянии около 6 см (рис.8). С помощью юстировочных винтов держателя полупроводникового лазерного модуля добейтесь попадания коллимированного излучения лазера в центр обеих диафрагм.



Рис. 8: Настройка траектории лазерного луча накачки твердотельного лазера YAG:Nd.

- 11) Установите фокусирующий объектив на расстоянии примерно 6 см от коллимирующей линзы. Установите вторую диафрагму в фокусе объектива. Проверьте попадание сфокусированного лазерного луча накачки в центр первой и второй диафрагмы. Используйте регулируемые винты держателя лазера накачки для направления сфокусированного излучения накачки в центр диафрагм (рис. 9). Уберите вторую диафрагму с рельса.



Рис. 9: Настройка положения фокусирующего объектива.

- 12) С помощью визуализатора излучения и шкалы рельса определите и запомните положение фокуса излучения накачки диодного лазера. Установите стержень из кристалла YAG:Nd в специальном держателе в фокусе излучения накачки диодного лазера. Включите юстировочный диодный лазер. Вращая винты кинематического держателя активного элемента, заведите отраженные лучи в центр диафрагмы (рис. 10).



Рис. 10: Настройка положения активного элемента из кристалла YAG:Nd.

- 13) За фокусирующим объективом на расстоянии около 2 мм от активного элемента установите входное плоское зеркало в держателе (рис. 11). Вращая винты кинематического держателя плоского зеркала, заведите отраженные лучи от плоского зеркала в центр диафрагмы.



Рис. 11: Настройка положения входного зеркала резонатора.

- 14) За держателем с кристаллом YAG:Nd установите выходное сферическое зеркало резонатора лазера в держателе. Общая длина резонатора лазера должна составлять около 5 см (рис.12). Вращая винты кинематического держателя сферического зеркала, заведите отраженные лучи юстировочного лазера в центр диафрагмы.



Рис. 12: Настройка положения выходного зеркала резонатора.

- 15) После выходного сферического зеркала резонатора установите на оптический рельс держатель с оптическим светофильтром, который поглощает излучение накачки на длине волны 808 нм и пропускает лазерную генерацию в области 1064 нм (рис. 13).

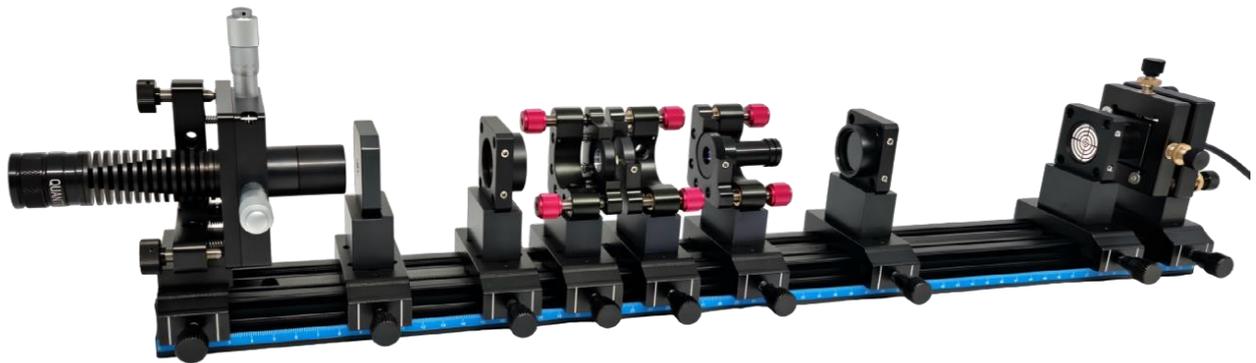


Рис. 13: Установка оптического светофильтра.

- 16) После держателя с фильтром на край рельса установите фотодетектор (рис. 14). С помощью BNC кабеля соедините его с цифровым осциллографом или мультиметром.

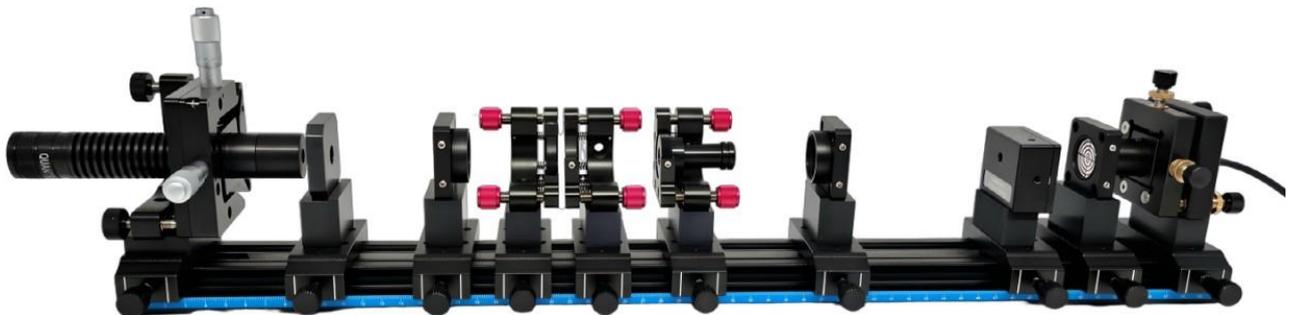


Рис. 14: Измерение интенсивности излучения лазера на кристалле YAG:Nd.

- 17) Установите ток инжекции на терминале управления 400 мА. Включите лазер накачки. Вращая регулировочные винты держателя выходного сферического зеркала, добейтесь появления лазерной генерации. Используйте визуализатор для обнаружения генерации. При отсутствии лазерной генерации можно увеличить ток инжекции до 500 мА и вновь провести настройку положения сферического зеркала. Если увеличение тока инжекции не приводит к появлению генерации YAG:Nd лазера, то необходимо заново повторить настройку лазера по схеме описанной выше.
- 18) Вращение зеркал резонатора будет приводить к изменению формы лазерного пучка генерации. Добейтесь появления пучка близкого к круглой форме минимального размера.
- 19) Проверьте попадание лазерной генерации YAG:Nd лазера в активную область фотодетектора. Включите мультиметр и зафиксируйте сигнал излучения лазерной генерации. Настройте на мультиметре максимальное значение интенсивности лазерной генерации с помощью юстировки положения узлов лазера: выходного сферического зеркала резонатора, лазерного модуля накачки, входного плоского зеркала резонатора, активного элемента.

Упражнение №2. Изучение принципа работы и сборка лазера на кристалле YAG:Nd работающего в режиме пассивной модуляции добротности.

- 1) Выполните упражнение № 1.

- 2) Перемещая выходное зеркало резонатора, увеличьте длину оптического резонатора примерно до 10 см (рис.15).

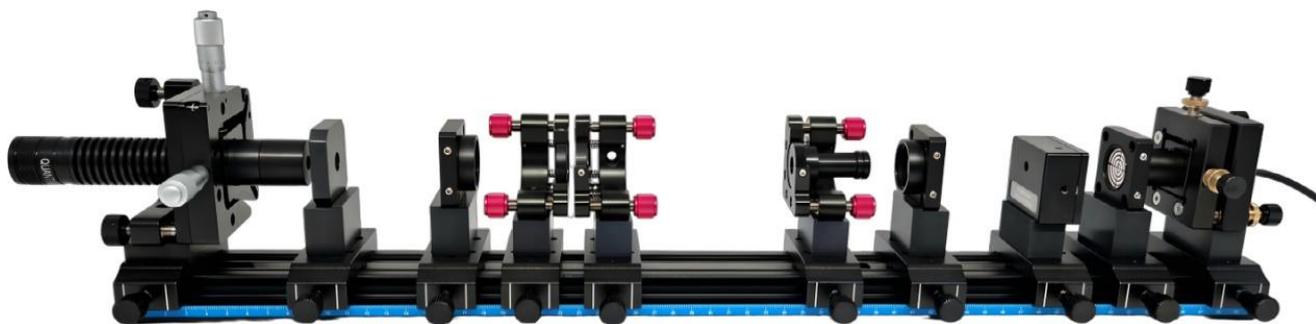


Рис. 15: Увеличение длины оптического резонатора.

- 3) Установите ток инжекции 600 мА. Включите лазерный модуль накачки. Вращая винты держателя выходного зеркала, получите генерацию лазерного излучения. Контроль получения генерации осуществляйте с помощью визуализатора лазерного излучения. Настройте максимальную интенсивность выходного излучения YAG:Nd лазера с помощью фотодетектора и мультиметра.
- 4) Держатель с кристаллом YAG:Cr установите на оптический рельс между активным элементом и выходным зеркалом резонатора. Снимите с оптического рельса светофильтр и фотодетектор. Вращая винты кинематического держателя кристалла YAG:Cr, заведите отраженные лучи юстировочного лазера в центр диафрагмы. Установите на рельс светофильтр и фотодетектор в прежнее положение (рис.16).



Рис. 16: Установка кристалла YAG:Cr.

- 5) Установите ток инжекции диодного лазера накачки 800 мА. Включите диодный лазерный модуль накачки. Вращая винты держателя кристалла YAG:Cr и выходного зеркала резонатора, добейтесь появления лазерной генерации. Контроль генерации осуществляйте с помощью визуализатора излучения. При отсутствии лазерной генерации увеличьте ток инжекции до 870 мА и повторите юстировку.
- 6) Проверьте попадание лазерной генерации в активную область фотодетектора. Соедините фотодетектор с каналом 1 осциллографа. Используйте нагрузку с номиналом 50 Ом. В настройках осциллографа выберите тип синхронизации по 1 каналу, режим «пик. детектор». Установите на осциллографе развертку по времени 500 мкс. Получите на осциллографе импульсы лазерной генерации (рис. 17). Добейтесь появления стабильных импульсов с максимальной амплитудой с помощью юстировки положения узлов лазера: кристалла YAG:Cr, выходного сферического зеркала резонатора, лазерного модуля накачки, входного плоского зеркала резонатора, активного элемента. При необходимости установите

перед фотодетектором нейтральный светофильтр для ослабления интенсивности лазерной генерации.



Рис. 17: Осциллограмма импульсного режима работы YAG:Nd лазера.

- 7) Установите развертку осциллографа по времени 200 нс/дел. Получите на осциллографе одиночный лазерный импульс (рис.18). Измерьте длительность лазерного импульса уставки осциллографа на половине интенсивности.

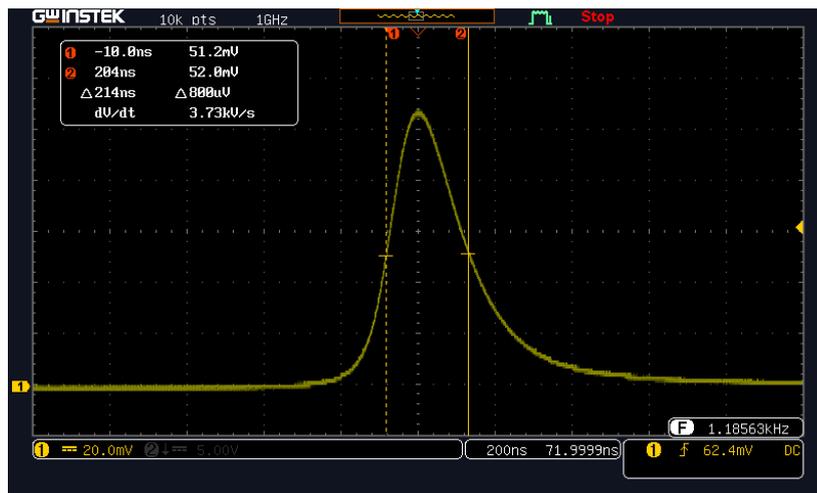


Рис. 18: Осциллограмма одиночного лазерного импульса.

- 8) Плавно уменьшая ток инжекции диодного лазера, определите порог генерации YAG:Nd лазера. Контроль наличия лазерной генерации осуществляйте с помощью визуализатора. При уменьшении тока инжекции осуществляйте подстройку положения узлов лазера.
- 9) Определите зависимость частоты импульсов от мощности накачки. Для этого изменяя ток инжекции I от 490 до 610 мА с шагом 20 мА измерьте интервал времени Δt между двумя соседними импульсами (рис.18). Измерение времени проводите с помощью курсоров осциллографа. зависимость частоты следования импульсов YAG:Nd лазера от тока инжекции диодного лазера накачки.
- 10) Постройте график этой зависимости (рис.19).

Таблица 1: Зависимость частоты импульсов от мощности накачки.

I, мА	P, мВт	$\Delta t_1, \mu\text{с}$	$\Delta t_2, \mu\text{с}$	$\Delta t_3, \mu\text{с}$	$\langle \Delta t \rangle, \mu\text{с}$	$\nu, \text{Гц}$
490						
510						
...						
610						

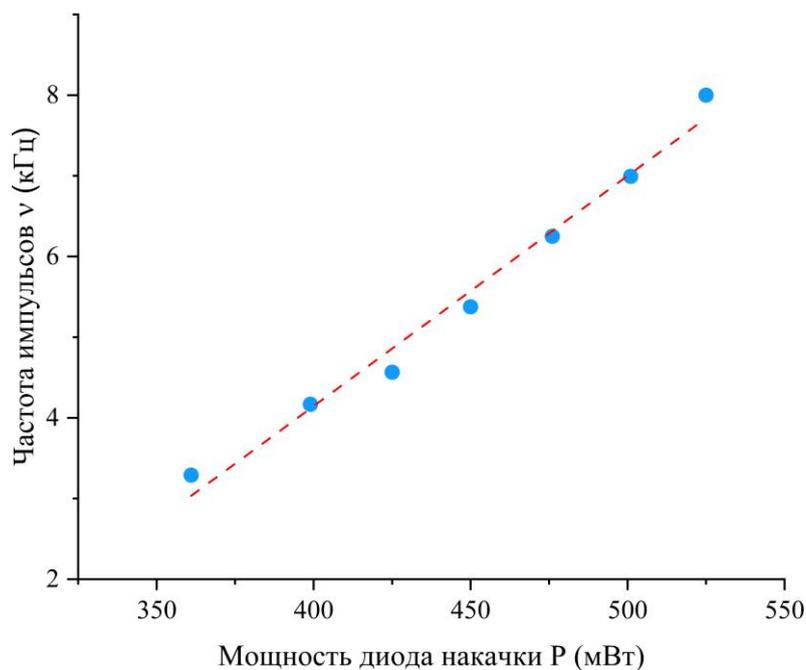


Рис. 19: График зависимости частоты импульсов ν от мощности диода накачки P .

Упражнение №3. «Активное» управление импульсным режимом работы YAG:Nd лазера с насыщающимся поглотителем.

- 1) Выполните пп. 1 – 6 из упражнения 2.
- 2) С помощью специального кабеля соедините разъем синхронизации диодного лазера с каналом 2 осциллографа. В настройках осциллографа выберите тип синхронизации по 2 каналу. Соедините фотодетектор с каналом 1 осциллографа. Установите на терминале

следующие настройки диодного лазера накачки: ток инжекции 750 мА, частота импульсов 1400 Гц, заполнение 50%, температура 30°C. Получите на осциллографе импульсы лазерной генерации (рис.20). Добейтесь появления стабильных импульсов с максимальной амплитудой с помощью юстировки положения узлов лазера: кристалла YAG:Cr, выходного сферического зеркала резонатора, лазерного модуля накачки, входного плоского зеркала резонатора, активного элемента. При необходимости установите нейтральный светофильтр для ослабления интенсивности лазерной генерации.

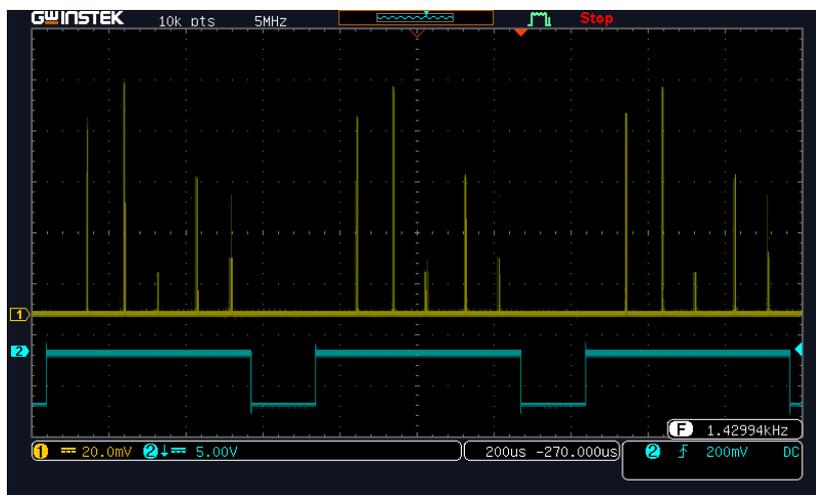


Рис. 20: Осциллограмма импульсного режима работы YAG:Nd лазера.

3) Изменяя ток инжекции, частоту импульсов и заполнение диодного лазера добейтесь появления одиночных импульсов YAG:Nd лазера только в окнах работы лазера накачки (рис.21).



Рис. 21: «Активное» управление импульсным режимом работы YAG:Nd лазера с насыщающимся поглотителем.

Библиографический список

- 1) Звелто О. Принципы лазеров: Пер. с англ.- 3-е перераб. и доп. 3 изд. -Москва: Мир, 1990. -560 с., ил.
- 2) Айрапетян, В.С. Физика лазеров [Текст]: учебное пособие / В.С. Айрапетян, О.К. Ушаков. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 134 с.
- 3) Ю.Айхлер, Г.-И. Айхлер. Лазеры. Исполнение, управление, применение: Пер. с англ. – Москва: Техносфера, 2008. – 440 с.
- 4) Кулешов, Н.В. Активные среды твердотельных лазеров: учебно-методическое пособие по дисциплинам «Твердотельные лазерные системы» и «Теория и расчет лазеров» / Н.В. Кулешов, А.С. Ясюкевич. – Минск: БНТУ, 2010 – 134 с.

Лабораторная работа №6. Генерация второй гармоники лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$

Цель работы: изучить физические принципы работы лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ работающего в режиме генерации второй гармоники, собрать макет этого лазера.

Принадлежности: полупроводниковый лазерный диод, коллиматор, объектив, входное плоское зеркало резонатора, активный элемент из кристалла $Y_3Al_5O_{12} : Nd$, нелинейный кристалл КТР, выходное сферическое зеркало резонатора ($R@1064 \text{ нм} > 99,9 \%$), светофильтр, фотодетектор, осциллограф, диафрагма, визуализатор, оптический рельс, юстировочный лазер.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Спектральный диапазон работы лазерного излучения может быть расширен на основе различных способов преобразования частоты. Особое значение имеют, в частности, нелинейные оптические эффекты: удвоение частоты и комбинационное рассеяние. В данной работе будет рассмотрен эффект, обусловленный нелинейным членом поляризации, который пропорционален квадрату электрического поля. В частности, будет описан эффект генерации второй гармоники (ГВГ), при которой лазерный пучок с частотой ω частично преобразуется нелинейной средой в когерентный пучок с частотой 2ω (данный эффект впервые продемонстрировал Франкен в 1961 году).[7]

В основе взаимодействия света со средой лежит элементарный процесс возбуждения атома или молекулы вещества световым полем и последующего переизлучения света возбужденной частицей. Характер этого взаимодействия зависит от соотношения между величиной напряженности поля световой волны E и характерной напряженностью внутриатомного поля $E_{ат.}$, определяющего силы связи оптических электронов (т.е. внешних, наиболее слабо связанных электронов) с ядром атома вещества.[1]

Поле $E_{ат.}$ связано с потенциалом ионизации атома I и атомным радиусом $r_{ат.}$ соотношением:

$$eE_{ат.}r_{ат.} = I, \quad (1)$$

где e — элементарный заряд, равный по модулю заряду электрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Для атома водорода это поле составляет $E_{ат.} = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r_H^2} = 5 \cdot 10^{11}$ В/м, для более тяжелых атомов $E_{ат.} = 10^{10} \dots 10^{11}$ В/м. Оценка поля E световой волны в случае незлазерных источников света в



+7 (964) 853-00-05



430030, Республика Мордовия,
г. Саранск, ул. Строительная,
д.8, помещение 8



www.phts.ru



info@phts.ru

величиной и уравнение (2) имеет вид:

$$P_i = \varepsilon_0 \cdot \sum_{k=1}^3 \chi_{ik}^{(1)} E_k, \quad i, k = 1, 2, 3,$$

где $\chi_{ik}^{(1)}$ — компоненты тензора линейной восприимчивости среды.

Материальное уравнение (2) является одним из соотношений, на которых базируется линейная оптика. Оно справедливо только при условии $E \ll E_{ат.}$, а при невыполнении этого условия является лишь некоторым приближением.

В мощных лазерных пучках можно получить напряженности E вплоть до значений $10^{10} \dots 10^{11}$ В/м, уже сравнимых с $E_{ат.}$. В случае когда поле E , оставаясь меньше $E_{ат.}$, приближается к нему по величине, поляризованность среды $P = P(E)$ перестает быть линейной функцией поля E , и в этом случае материальное уравнение (2) должно быть заменено на другое. [1]

Таким образом, безразмерный параметр

$$\bar{E} = \frac{E}{E_{ат.}}, \quad (3)$$

определяемый как отношение напряженности внешнего светового поля к характерной напряженности внутриатомного поля, может быть принят в качестве параметра нелинейности. В области слабых световых полей имеем: $E \ll 1$, что соответствует приближению линейной оптики. Если параметр (3) не является малой величиной, однако выполняется условие $E < 1$, как это имеет место в случае интенсивного лазерного излучения, функция $P(E)$ может быть представлена для изотропной среды в виде разложения в ряд по степеням E : [1]

$$P(E) = \varepsilon_0 [\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots + \chi^{(m)} E^m + \dots]. \quad (4)$$

Первый член материального уравнения нелинейной оптики (4) является линейной составляющей, а остальные члены – нелинейной составляющей поляризации. Отношение каждого последующего члена ряда к предыдущему быстро уменьшается. Величины $\chi^{(m)}$, $m \in N$, $m \neq 1$ называют нелинейными восприимчивостями. Следует отметить, что запись разложения (4) в достаточной степени условна, т.к. величины $\chi^{(1)}$, $\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$, ... , вообще говоря, являются тензорами соответственно 2-го, 3-го, 4-го и т.д. рангов [2]. Этот нелинейный отклик может привести к обмену энергией между электромагнитными волнами на различных частотах.

Генерация суммарных частот заключается в появлении в среде волны с частотой ω_3 при распространении в ней двух других волн с частотами ω_1 и ω_2 :

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3.$$

В случае если на среду подают одинаковые волны ($\omega_1 = \omega_2 = \omega$), можно говорить о частном случае – генерации второй гармоники:

$$\omega + \omega = 2\omega.$$

Появление второй гармоники связано с квадратичным членом $\chi^{(2)} E^2$ в разложении поляризованности \vec{P} по степеням электрического поля световой волны. Если в среду входит гармоническая световая волна вида:

$$E = A \cdot \cos(\omega t - kz),$$

то в силу соотношения (4) переизлученное поле в среде будет содержать не только частоту ω , но и её гармоники на частотах 2ω , 3ω и т.д. [1] Перепишем выражение (4) с учётом уравнения для E :

$$P(E) = \varepsilon_0 \left[\frac{\chi^{(2)} A^2}{2} + \cos(\omega t - kz) \chi^{(1)} A + \frac{3}{4} \chi^{(3)} A^3 + \frac{\chi^{(2)} A^2}{2} \cos(2(\omega t - kz)) + \frac{\chi^{(3)} A^3}{4} \cos(3(\omega t - kz)) \right] \quad (5)$$

Рассмотрим результат, полученный в уравнении (5). Первое слагаемое, обозначим его $P_0(E)$, – «оптическое выпрямление» (статический вектор \vec{P}) – генерация в среде электростатического поля под действием оптического излучения:

$$P_0(E) = \frac{\epsilon_0 \chi^{(2)} A^2}{2},$$

$$P_1(E) = \epsilon_0 \cos(\omega t - kz) \chi^{(1)} A + \frac{3}{4} \chi^{(3)} A^3 .$$

Генерация второй гармоники:

$$P_2(E) = \frac{\epsilon_0 \chi^{(2)} A^2}{2} \cos(2(\omega t - kz)). \tag{6}$$

Генерация третьей гармоники:

$$P_3(E) = \frac{\epsilon_0 \chi^{(3)} A^3}{4} \cos(3(\omega t - kz)).$$

Второй член в выражении (6) описывает переизлученное поле на частоте 2ω второй гармоники падающей волны. Величину $\chi^{(2)}$ называют *квадратичной нелинейной восприимчивостью вещества*. Необходимым условием генерации второй гармоники (ГВГ) является отличие $\chi^{(2)}$ от нуля. Действительно, если вещество изотропно или имеет центр симметрии, то при изменении направления приложенного электрического поля \vec{E} поляризованность \vec{P} должна менять знак. Чтобы удовлетворить этому требованию, члены, содержащие четные степени в разложении (4), должны отсутствовать, т.е. величина $\chi^{(2)}$ должна быть равной нулю. Таким образом, для ГВГ непригодны изотропные кристаллы, или кристаллы с кубической сингонией (кристаллической решеткой). [2]

Схематическое изображение преобразования частоты в нелинейной среде показано на рисунке 2.

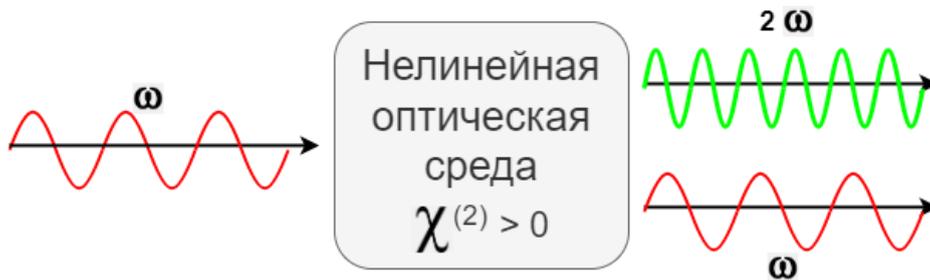


Рис. 2: Генерация второй гармоники.

Фазовый синхронизм

Генерация излучения на суммарной (или разностной) частоте происходит наиболее эффективно, если волна с частотой ω_3 , приходящая к данному элементу объема от предшествующих элементов, находится в нужной фазе с излучением на этой же частоте, которое порождается в этом элементе объема. Интенсивность генерации в таком случае возрастает на несколько порядков, поскольку её накопление происходит по всей длине нелинейной среды. Такое благоприятное соотношение фаз реализуется, если для волновых векторов выполняется равенство:

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3.$$

Условие коллинеарного фазового синхронизма, когда волновые вектора лежат на одной прямой, можно записать через модули волновых векторов: [2]

$$k_\omega + k_\omega = k_{2\omega}, \tag{7}$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число. Таким образом, вытекает равенство показателей преломления: $n_{\omega} + n_{\omega} = 2n_{2\omega}$, так как $\lambda_{\omega} = 2\lambda_{2\omega}$. То есть для реализации фазового синхронизма в нелинейной среде необходимо: [2]

$$n_{\omega} = n_{2\omega}.$$

В оптических средах с нормальной дисперсией выполнение такого равенства невозможно, так как показатель преломления растет с увеличением частоты $n(\omega)$. Однако в двулучепреломляющих кристаллах, которые являются анизотропными, можно выбрать такое направление распространения, для которого показатель преломления обыкновенного луча основной частоты $n_o(\omega)$ равен показателю преломления необыкновенного луча второй гармоники $n_e(2\omega)$. [3]

Далее рассмотрим с точки зрения квантовой теории фазовый синхронизм. Соотношение между частотой основной волны (ω) и волны второй гармоники (ω_{SH}):

$$\omega_{SH} = 2\omega. \quad (8)$$

Если теперь умножить обе части соотношений (7) и (8) на константу \hbar , то получим:

$$\hbar\omega_{SH} = 2\hbar\omega, \quad (9)$$

$$\hbar k_{2\omega} = 2\hbar k_{\omega}. \quad (10)$$

соответственно. Для того чтобы в процессе ГВГ энергия сохранялась, должно выполняться равенство $\frac{dI_{2\omega}}{dz} = -\frac{dI_{\omega}}{dz}$, где $I_{2\omega}$ и I_{ω} — интенсивности соответствующих волн. С помощью выражения (8) получаем $\frac{dF_{2\omega}}{dz} = -\frac{dF_{\omega}}{dz}$, где $F_{2\omega}$ и F_{ω} — потоки фотонов этих двух волн. Из этого последнего равенства можно заключить, что в процессе ГВГ, когда исчезают два фотона с частотой ω , вместо них появляется один фотон с частотой 2ω . Таким образом, соотношение (8) можно рассматривать как закон сохранения энергии фотонов. Если вспомнить, что импульс фотона равен $\hbar k$, то соотношение (9) есть не что иное, как условие того, что в процессе ГВГ должен сохраняться и импульс фотонов. [13]

Световая волна, распространяющаяся в одноосных оптических кристаллах под углом θ к оптической оси кристалла, может быть разложена на две взаимно перпендикулярные поляризации: перпендикулярную (обыкновенный луч n_o) и параллельную (необыкновенный луч n_e) оптической оси. Коэффициент преломления обыкновенного луча n_o не зависит от угла θ . Коэффициент преломления необыкновенного луча n_e зависит от угла, причем наибольшая разница в коэффициентах преломления между n_e и n_o наблюдается для направления распространения луча перпендикулярно оптической оси кристалла. Зависимость n_e от θ и ω определяется выражением

$$n_e(\theta, \omega) = \frac{\cos^2\theta}{n_o^2(\omega)} + \frac{\sin^2\theta}{n_e^2(90^\circ, \omega)}^{-1}.$$

На рис. 4 схематически показаны частотные зависимости показателей преломления обыкновенного луча и необыкновенных лучей, распространяющихся под разными углами к оптической оси в отрицательном одноосном кристалле, для которого на любой частоте $n_e(\theta, \omega) < n_o(\omega)$. Из рисунка видно, что в кристалле можно выбрать такое направление θ_c , для которого $n(\omega_1) = n(2\omega_1)$. Угол θ_c называется углом фазового синхронизма. Интенсивность генерации второй гармоники в этом направлении на несколько порядков выше, чем в других направлениях. [4]

На рис. 4 изображено сечение поверхностей показателей преломления для отрицательного одноосного кристалла. Для направлений ОА, ОВ, ОС, ОД, образующих углы $\theta_c, \pi + \theta_c, 2\pi - \theta_c$ и $\pi - \theta_c$ с оптической осью кристалла, $n_e(\theta_c, 2\omega) = n_o(\omega)$, т.е. выполняется условие фазового синхронизма для волны возбуждения и волны второй гармоники. Угол θ_c на рис. 4 — угол фазового синхронизма.

Таким образом, направив возбуждающее излучение, как обыкновенную волну под углом θ_c , в нелинейном кристалле можно реализовать эффективную генерацию второй гармоники как необыкновенной волны, распространяющейся вдоль этого же направления. [4]

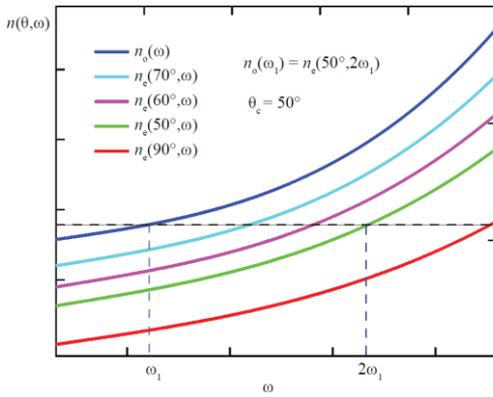


Рис. 3: Характер частотных зависимостей показателей преломления обыкновенного луча n_o и необыкновенных лучей n_e , распространяющихся под разными углами к оптической оси в отрицательном одноосном кристалле. θ_c – угол фазового синхронизма.

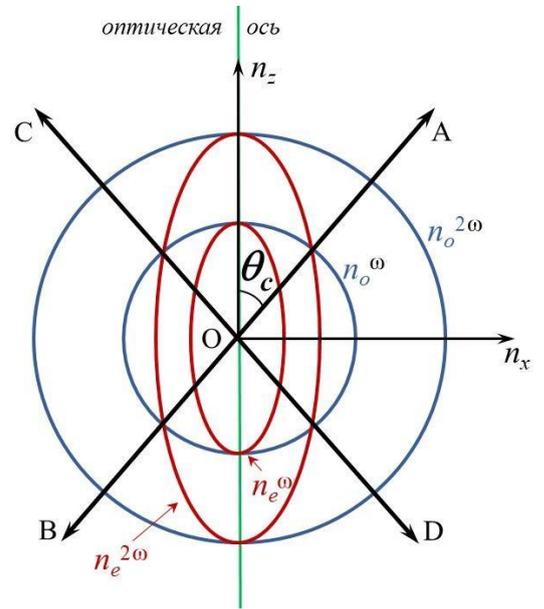


Рис. 4: Схема сечения поверхностей показателей преломления для отрицательного одноосного кристалла.

Мощность генерации второй гармоники

Рассмотрим коэффициент полезного действия получения второй гармоники ω_{SHG} (second harmonic generation – генерация второй гармоники). КПД зависит от переменной нелинейной константы C , используемой длины L кристалла и от интенсивности излучения I_v основной волны.

$$\eta_{SHG} = \frac{P_{2v}}{P_v} = C I_v L^2 F(\delta k), \quad (11)$$

где P_{2v} — мощность излучения второй гармоники,

P_v — мощность излучения основной волны,

$I_v = \frac{P_v}{A}$ — интенсивность основной волны или мощность P в зависимости от поперечного сечения A и длины L кристалла.

$$F(\delta k) = \frac{\sin^2(\delta k \cdot \frac{L}{2})}{(\delta k \cdot \frac{L}{2})^2}$$

где $F(\delta k)$ — это функция, чье значение и, следовательно, КПД становится максимальным, когда $\delta k = 0$, то есть

$$\delta k = k_{2v} - k_v = 0, \quad (12)$$

где k_{2v} — это волновое число удвоенной волны, k_v — это волновое число основной волны. Когда $\delta k = 0$ выполняется состояние согласования фаз.

Константа C рассчитывается следующим образом:

$$C = 2 \frac{\mu_0^2 \epsilon_0^3}{\omega^2 n^3} \cdot \frac{d_{ik}}{n^3}$$

где μ_0 — магнитная постоянная, ϵ_0 — электрическая постоянная, ω — угловая частота, n — показатель преломления кристалла, d_{ik} — компоненты вектора тензора восприимчивости χ .

Мощность волны с удвоенной частотой при выполнении (12), рассчитывается следующим образом

$$P_{2v} = C I_v L^2 P_v = \frac{C L^2 P_v^2}{A}, \quad (13)$$

в соответствии с уравнением (11).

Из уравнения (13) следует, что мощность $P_{2\nu}$ волны удвоенной частоты возрастает квадратично с мощностью P_ν основной волны.

Нелинейные среды Кристалл

калий-титанил-фосфата (КТiОРО₄/КТР)

КТР является наиболее часто используемым материалом для удвоения частоты лазеров на Nd:YAG и других лазеров легированных Nd, особенно когда их плотность мощности находится на низком или среднем уровне. На сегодняшний день удвоение частоты вне и внутри резонатора лазеров на Nd: с использованием КТР стало предпочтительным источником накачки для видимых лазеров на красителях и настраиваемых лазеров на Ti:Sapphire, а также их усилителей. Они также используются в качестве «зелёных» источников для многих исследовательских и промышленных приложений.

- Зелёный лазер с мощностью 700 мДж и эффективность преобразования более 80% были получены с помощью лазеров на Nd:YAG в импульсном режиме с модуляцией добротности и энергией 900 мДж с использованием внешнего резонатора с КТР.
- Зелёное лазерное излучение мощностью 8 Вт генерировалось из лазера с диодной накачкой на Nd:YVO₄ с мощностью 15 Вт с помощью внутрирезонаторного КТР.
- «Зелёное» выходное излучение мощностью 200 мВт генерировалось лазерами с диодной накачкой на Nd:YVO₄ с мощностью 1 Вт, используя кристалл КТР размером 2 × 2 × 5 мм³ и кристалл Nd:YVO₄ размером 3 × 3 × 1 мм³.
- «Зелёное» выходное излучение мощностью 2 – 5 мВт генерировалось склеенными кристаллами Nd:YVO₄ и КТР с лазерной накачкой мощностью 180 мВт.

КТР также используется для внутрирезонаторного смешивания диода с длиной волны 0,81 мкм и лазера на Nd:YAG с длиной волны 1064 нм для генерации синего света и внутрирезонаторной генерации второй гармоники лазеров на Nd:YAG или Nd:YAP с длиной волны 1,3 мкм для получения красного света.

Кристалл бета-бората бария (ВВО)

ВВО — электрооптический материал, прозрачный в диапазоне от УФ до 3500нм, идеально подходит для работы в лазерах с высокой средней мощностью. ВВО обладает высоким порогом разрушения, низкой диэлектрической константой, широко применяется в высокомоощных лазерах с диодной накачкой. Основное преимущество перед прочими электрооптическими материалами, возможность работы в очень мощных лазерах и с очень большими частотами. Из-за малой ёмкости материала время переключения очень мало. Кристаллы ВВО обеспечивают диапазон пропускания от 188 нм до 5,2 мкм, включая приемлемое пропускание в диапазоне 3–5,2 мкм для кристалла толщиной несколько десятков мкм.

Диапазон фазового синхронизма простирается практически на весь диапазон пропускания. Благодаря уникальным свойствам кристаллов ВВО, они подходят для использования в ряде нелинейных применений, в том числе для генерации гармоник неодимовых лазеров, удвоения и утроения частоты Ti:Sapphire лазеров, а также для широко перестраиваемых оптических параметрических генераторов. Стоит отметить, что кристаллы ВВО имеют самую высокую нелинейность среди нелинейных УФ-кристаллов.

Кристалл ниобата лития (LiNbO_3)

Ниобат лития (LiNbO_3) — сегнетоэлектрический кристалл тригональной сингонии. Диапазон прозрачности ниобата лития составляет 0,25 – 5,3 мкм. Это позволяет использовать его в видимом, ближнем и среднем ИК-диапазонах.

Как и в прочих сегнетоэлектриках, в ниобате лития возникают пьезоэлектрический эффект, нелинейно-оптические эффекты, эффект фотоупругости, эффект Поггеля (линейный электрооптический эффект). Исключительной особенностью LiNbO_3 является то, что величина коэффициентов данных явлений превышает величину ближайших схожих сегнетоэлектриков в несколько раз. Это делает его привлекательным материалом для различных применений.

Благодаря большим значениям электрооптических коэффициентов, ниобат лития используется для создания оптических амплитудных/фазовых модуляторов, ячеек Поггеля, модуляторов добротности для лазеров. Нелинейно-оптические свойства LiNbO_3 позволяют создавать на его основе оптические параметрические осцилляторы и параметрические усилители в широком диапазоне длин волн. Наилучшим образом ниобат лития работает в генераторах второй гармоники для Nd:YAG лазера на длине волны 1.064 мкм, а также в полупроводниковых лазерах на длинах волн 1.3 и 1.55 мкм. Следует отметить, что легированный LiNbO_3 обладает высоким фоторефрактивным эффектом. Поэтому для применений в системах с высокой лазерной нагрузкой используются кристаллы, легированные оксидом магния ($\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$), обладающие значительно большей стойкостью к лазерным повреждениям. При этом оптические свойства кристалла практически не изменяются.

Кристалл трибората лития ($\text{LBO}/\text{LiB}_3\text{O}_5$)

Кристаллы трибората лития или LBO (LiB_3O_5) являются одними из наиболее полезных нелинейных оптических материалов не только по сравнению с относительно большим коэффициентом конверсии – в 3 раза больше, чем у KDP, но и за его отличные физические свойства. Кристалл LBO имеет широкий диапазон оптической прозрачности от 160 до 2600 нм. Он превосходит мощную генерацию второй гармоники с минимальным термическим линзированием по сравнению с КТР. Его преимущества — большой угол приема в паре с небольшим углом уклонения, который уменьшает требования к качеству луча для исходных лазеров.

LBO широко используется для генерации второй гармоники (SHG) и генерации третьей гармоники (THG) Nd:YAG, Nd:YLF, Nd:YVO₄ и ультрабыстрых Ti:Sapphire лазеров, в OPO (Оптические параметрические осцилляторы) и OPAs (Оптический параметрический усилитель).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Внимание!

- 1) Перед началом сборки экспериментальных установок внимательно изучите устройство и порядок включения всех компонент лазера в разделе «Комплектация».
- 2) При работе с лазерным излучением обязательно используйте лазерные защитные очки.
- 3) После установки положения каждого элемента лазера на рельсе, зафиксируйте их с помощью прижимных винтов на оптической каретке.

Экспериментальная установка

Внешний вид макета лазера на кристалле YAG:Nd, работающего в режиме генерации второй гармоники, показан на рис. 5. Он состоит из лазерного модуля накачки (1), терминала управления лазером (2), оптического рельса (3), коллимирующей линзы (4), фокусирующей линзы (5), входного плоского зеркала (6), активного элемента из кристалла YAG:Nd (7), кристалла КТР (8), выходного сферического зеркала (9), оптического светофильтра на длину волны 1064 нм (10), оптического светофильтра на длину волны 532 нм (11), диафрагмы (12), фотодетектора (13), цифрового осциллографа (14), мультиметра (15), визуализатора лазерного излучения (16).

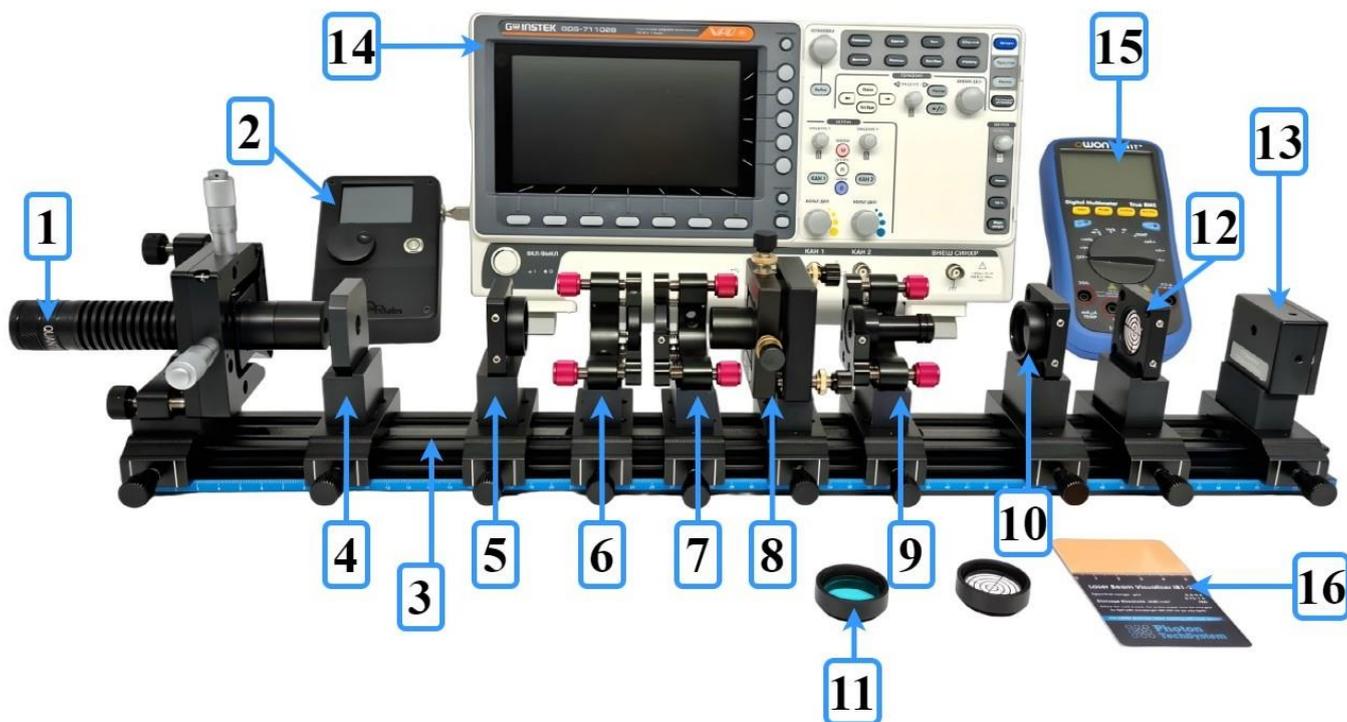


Рис. 5: Внешний вид экспериментальной установки макета лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$

Упражнение №1. Изучение принципа работы и сборка лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$ работающего на длине волны 1064 нм

Сборка лазера YAG:Nd работающего в режиме генерации второй гармоники начинается со стороны макета YAG:Nd лазера работающего на длине волны 1064 нм. Соберите макет твердотельного лазера согласно приведённой ниже инструкции.

- 1) Закрепите оптический рельс на оптическом столе или другом жёстком основании с помощью винтов М6 или специальных прижимов.
- 2) Установите юстировочный лазер на край оптического рельса.
- 3) Установите первую диафрагму с мишенью на расстоянии около 1 см от юстировочного лазера. Вторую диафрагму с мишенью установите на противоположном конце оптического рельса (рис. 6).



Рис. 6: Настройка оптической оси твердотельного лазера YAG:Nd с помощью юстировочного лазера видимого спектрального диапазона.

- 4) Включите юстировочный лазер. Вращая регулируемые винты кинематического держателя юстировочного лазера, добейтесь попадания красного луча в центры обеих мишеней.
- 5) Переместите дальнюю от юстировочного лазера диафрагму в центр оптического рельса и проверьте попадание красного лазерного пучка в центр мишени.
- 6) Установите на край оптического рельса диодный лазер накачки в держателе. Далее установите вторую диафрагму на расстоянии около 6 см от диодного лазера накачки (рис. 7).



Рис. 7: Установка оптической оси твердотельного лазера YAG:Nd с помощью юстировочного лазера видимого спектрального диапазона.

- 7) Включите в сеть терминал управления диодного лазера, настройте непрерывный режим работы лазера, установив значения частоты 0 Гц и заполнения 100%. Для безопасной работы с лазерным излучением воспользуйтесь защитными лазерными очками.
- 8) Установите ток инжекции диодного лазера накачки равный 270 мА и включите лазер. Вращая регулировочные винты держателя лазера накачки, убедитесь, что излучение примерно попадает в центр обеих диафрагм. Контроль положения и формы луча осуществляйте с помощью визуализатора лазерного излучения. Уберите с рельса вторую диафрагму. Обратите внимание на особенность диодных лазеров, обусловленную большой расходимостью лазерного излучения.
- 9) Установите коллиматор на расстоянии 13,86 мм от диодного лазера накачки. Изменяя расстояние между коллиматором и лазерным модулем накачки, добейтесь коллимированного лазерного пучка, т.е. плоскопараллельного пучка, который практически не изменяет своей формы на всей длине оптического рельса. Для контроля формы лазерного пучка накачки используйте визуализатор, повторно перемещая его вдоль оптического рельса (рис. 8).



Рис. 8: Настройка положения коллиматора.

- 10) Установите вторую диафрагму с мишенью после коллиматора на расстоянии около 6 см (рис. 9). С помощью юстировочных винтов держателя полупроводникового лазерного модуля добейтесь попадания коллимированного излучения лазера в центр обеих диафрагм.



Рис. 9: Настройка траектории лазерного луча накачки твердотельного лазера YAG:Nd.

- 11) Установите фокусирующий объектив на расстоянии примерно 6 см от коллимирующей линзы. Установите вторую диафрагму в фокусе объектива. Проверьте попадание сфокусированного лазерного луча накачки в центр первой и второй диафрагмы. Используйте регулируемые винты держателя лазера накачки для направления сфокусированного излучения накачки в центр диафрагм (рис. 10). Уберите вторую диафрагму с рельса.



Рис. 10: Настройка положения фокусирующего объектива.

- 12) С помощью визуализатора излучения и шкалы рельса определите и запомните положение фокуса излучения накачки диодного лазера. Установите стержень из кристалла YAG:Nd в

специальном держателе в фокусе излучения накачки диодного лазера. Включите юстировочный диодный лазер. Вращая винты кинематического держателя активного элемента, заведите отраженные лучи в центр диафрагмы (рис. 11).



Рис. 11: Настройка положения активного элемента из кристалла YAG:Nd.

- 13) За фокусирующим объективом на расстоянии около 2 мм от активного элемента установите входное плоское зеркало в держателе (рис. 12). Вращая винты кинематического держателя плоского зеркала, заведите отраженные лучи от плоского зеркала в центр диафрагмы.

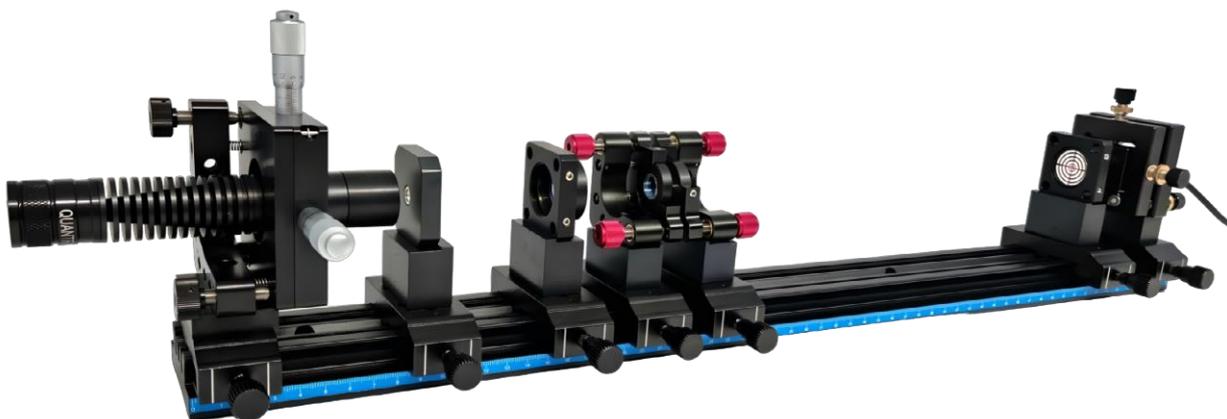


Рис. 12: Настройка положения входного зеркала резонатора.

- 14) За держателем с кристаллом YAG:Nd установите выходное сферическое зеркало резонатора лазера в держателе. Общая длина резонатора лазера должна составлять около 5 см (рис. 13). Вращая винты кинематического держателя сферического зеркала, заведите отраженные лучи юстировочного лазера в центр диафрагмы.

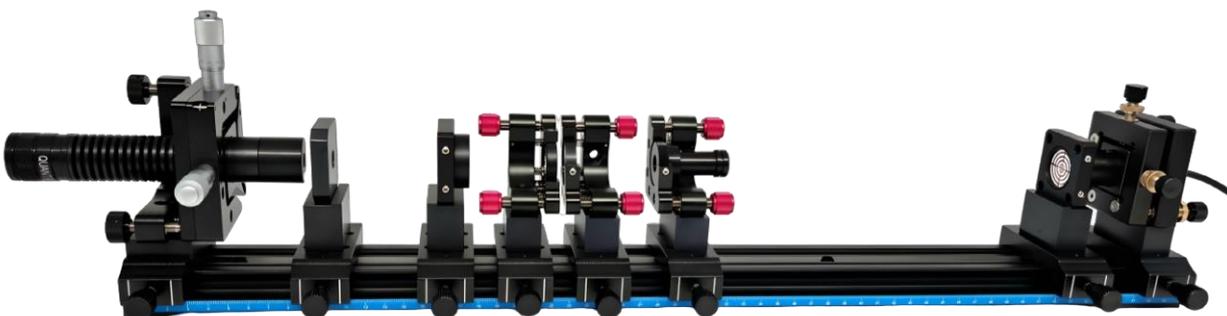


Рис. 13: Настройка положения выходного зеркала резонатора.

- 15) После выходного сферического зеркала резонатора установите на оптический рельс держатель с оптическим светофильтром, который поглощает излучение накачки на длине волны 808 нм и пропускает лазерную генерацию в области 1064 нм (рис. 14).



Рис. 14: Установка оптического светофильтра.

- 16) После держателя с оптическим светофильтром установите фотодетектор (рис. 15). С помощью BNC кабеля соедините его с цифровым осциллографом или мультиметром.



Рис. 15: Измерение интенсивности излучения лазера на кристалле YAG:Nd.

- 17) Установите ток инжекции диода накачки на терминале управления 400 мА. Включите лазер накачки. Вращая регулировочные винты держателя выходного сферического зеркала, добейтесь появления лазерной генерации. Используйте визуализатор для обнаружения генерации. При отсутствии лазерной генерации можно увеличить ток инжекции до 500 мА и вновь провести настройку положения сферического зеркала. Если увеличение тока инжекции не приводит к появлению генерации YAG:Nd лазера, то необходимо заново повторить настройку лазера по схеме описанной выше.
- 18) Вращение зеркал резонатора будет приводить к изменению формы лазерного пучка генерации. Добейтесь появления пучка близкого к круглой форме минимального размера.
- 19) Проверьте попадание лазерной генерации YAG:Nd лазера в активную область фотодетектора. Включите мультиметр и зафиксируйте сигнал излучения лазерной генерации. Настройте на мультиметре максимальное значение интенсивности лазерной генерации с помощью юстировки положения узлов лазера: выходного сферического зеркала резонатора, лазерного модуля накачки, входного плоского зеркала резонатора, активного элемента.

Упражнение №2. Генерация второй гармоники лазера на кристалле $Y_3Al_5O_{12} : Nd$.

- 1) Выполните упражнение №1.
- 2) Перемещая выходное зеркало резонатора, увеличьте длину оптического резонатора до 10 см (рис. 16).

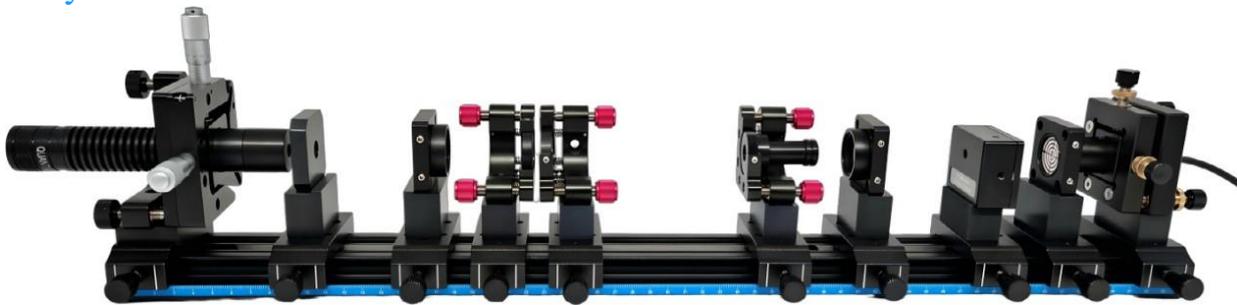


Рис. 16: Увеличение длины оптического резонатора.

- 3) Установите ток инжекции 600 мА. Включите лазерный модуль накачки. Вращая винты держателя выходного зеркала, получите генерацию лазерного излучения. Контроль получения генерации осуществляйте с помощью визуализатора лазерного излучения. Настройте максимальную интенсивность выходного излучения YAG:Nd лазера с помощью фотодетектора и мультиметра.
- 4) Держатель с нелинейным кристаллом КТР установите на оптический рельс между активным элементом и выходным зеркалом резонатора. Вращая винты кинематического держателя кристалла КТР, заведите отраженные лучи юстировочного лазера в центр диафрагмы. Включите диодный лазер накачки с током инжекции 600 мА и добейтесь появления лазерной генерации на длине волны 1064 нм.



Рис. 17: Установка нелинейного кристалла КТР в оптический резонатор.

- 5) Замените инфракрасный светофильтр на синий светофильтр, который пропускает излучение на длине волны 532 нм и поглощает излучение на длинах волн 808 нм и 1064 нм (рис. 18). Светофильтры установлены в круглой оправе с резьбой. Для замены открутите одну оправу из квадратного держателя и замените на другую.

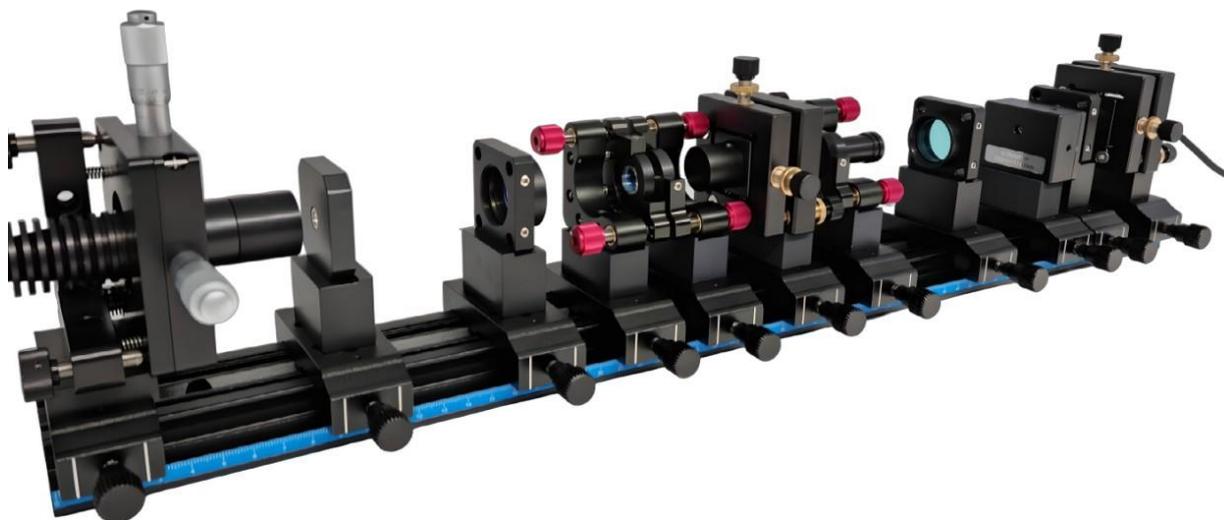


Рис. 18: Установка синего светофильтра.

- 6) Установите ток инжекции 600 мА. Включите полупроводниковый лазерный модуль накачки. Вращая винты держателя кристалла КТР и выходного зеркала резонатора, добейтесь появления лазерной генерации в зеленой спектральной области. Контроль генерации осуществляйте с помощью визуализатора излучения.
- 7) Проверьте попадание лазерной генерации в активную область фотодетектора. Включите мультиметр и зафиксируйте сигнал излучения лазерной генерации. Настройте на мультиметре максимальное значение интенсивности лазерной генерации с помощью юстировки положения узлов лазера: кристалла КТР, выходного сферического зеркала резонатора, лазерного модуля накачки, входного плоского зеркала резонатора, активного элемента.
- 8) Изменяя ток инжекции диодного лазера накачки от 200 до 750 мА с шагом 50 мА, измерьте интенсивность YAG:Nd лазера на длине волны 532 нм. Повторите измерения не менее 3 раз.
- 9) Замените синий светофильтр на инфракрасный светофильтр. Изменяя ток инжекции диодного лазера накачки от 200 до 750 мА с шагом 50 мА, измерьте интенсивность YAG:Nd лазера на длине волны 1064 нм. Повторите измерения не менее 3 раз.
- 10) Постройте зависимость интенсивности излучения лазерной генерации на длине волны 532 нм от интенсивности излучения лазерной генерации на длине волны 1064 нм (рис. 19).

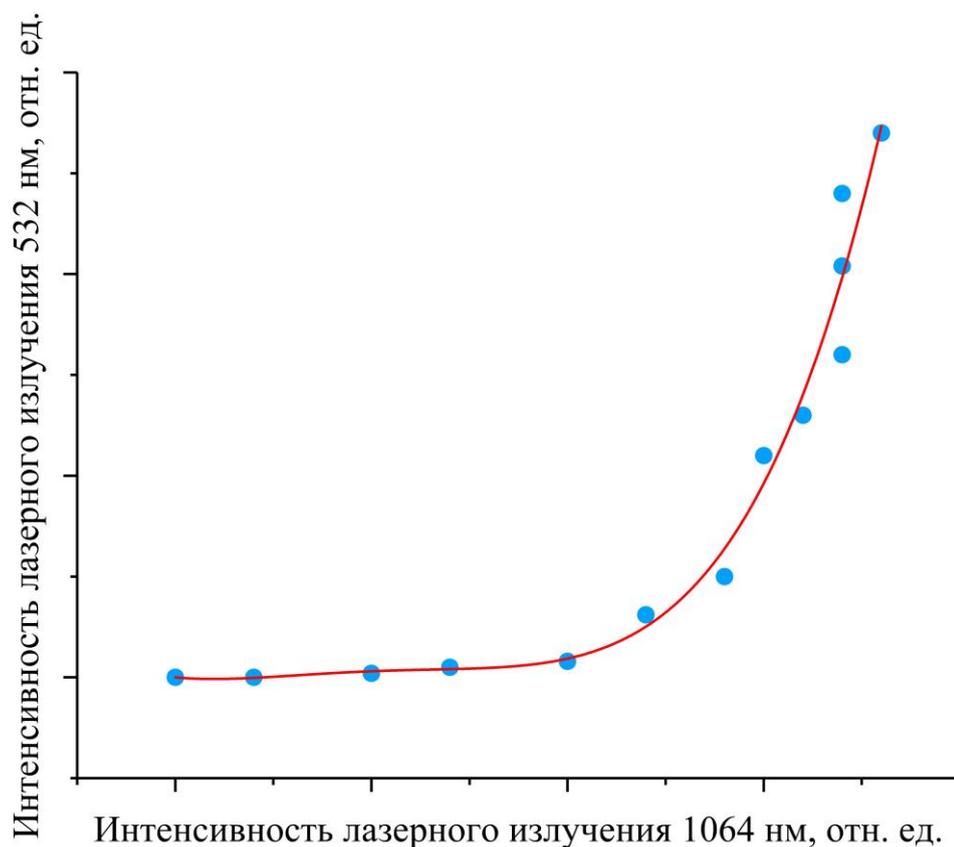


Рис. 19: График квадратичной зависимости интенсивности излучения лазерной генерации 532 нм от интенсивности излучения лазерной генерации на длине волны 1064 нм.

- 11) Аналогичную зависимость можно получить, измерив зависимость интенсивности излучения лазерной генерации на длине волны 532 нм от тока инжекции или интенсивности излучения лазера накачки.

Библиографический список

- 1) Беспрозванных, В.Г. Нелинейная оптика: учеб. Пособие [Текст] / В.Г. Беспрозванных, В.П. Первадчук. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2011. – 200 с.
- 2) Беспрозванных, В.Г. Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Нелинейная оптика» [Текст] / В.Г. Беспрозванных – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2017. – 56 с.
- 3) Старовойтов, А.А. Лабораторный практикум по основам нелинейной оптики [Текст] / А.А. Старовойтов – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2019. – 74 с.
- 4) Агекян, В.Ф. Генерация второй гармоники в нелинейном кристалле KDP импульсами фемтосекундного лазера. Описание лабораторной работы. [Текст] / В.Ф. Агекян, М.В. Бутурлимова, А.Ю. Серов. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2022. – 14 с.
- 5) Звелто О. Принципы лазеров / Пер. под науч. ред. Т. А. Шмаонова. 4-е изд. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 720 с.: ил. – (Учебные пособия для вузов. Специальная литература).
- 6) Айхлер Ю., Айхлер Г.-И. Лазеры. Исполнение, управление, применение. Москва: Издательство «Техносфера», 2008. – 440 с.
- 7) Franken, P. A., Hill, A. E., Peters, C. W., Weinreich, G. (1961). Generation of Optical Harmonics. Physical Review Letters, 7(4), 118–119.



+7 (964) 853-00-05



**430030, Республика Мордовия,
г. Саранск, ул. Строительная,
д.8, помещение 8**



www.phts.ru



info@phts.ru