

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники

А.Д. Безпалый, А.Е. Мандель

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ
ТВЕРДОТЕЛЬНОГО YAG:Nd-ЛАЗЕРА**

Методические указания к лабораторной работе
для студентов технических направлений подготовки и специальностей

Томск
2025

УДК 535:530.145
ББК 22.343
Б–39

Рецензент:

Хатьков Н.Д., доцент кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
ТУСУР, канд. техн. наук

Авторы:

А. Д. Безпалый, А. Е. Мандель

Безпалый, Александр Дмитриевич

Б-39 Исследование режима модуляции добротности твердотельного YAG:Nd-лазера: методические указания к лабораторной работе для студентов технических направлений подготовки и специальностей / А.Д. Безпалый, А.Е. Мандель. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025. – 14 с.

В работе изложены устройство и принципы работы твердотельного YAG:Nd-лазера, методы получения гигантских импульсов в твердотельных лазерах. Описана экспериментальная установка и методика проведения лабораторной работы. В ходе выполнения работы студенты закрепляют теоретические знания об устройстве и принципах работы твердотельных лазеров с модуляцией добротности.

Методические указания предназначены для студентов технических направлений подготовки и специальностей.

Одобрено на заседании каф. СВЧиКР протокол № 6 от 14.02.2025 г.

УДК 535:530.145
ББК 22.343

© Безпалый А. Д., Мандель А. Е., 2025
© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	5
1.1 Устройство и принцип действия твердотельного лазера на YAG:Nd ³⁺	5
1.2 Модуляция добротности твердотельного лазера на кристалле YAG:Nd.....	6
2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	9
3 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ	10
4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	11
5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	12
6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	13
Список литературы	14

Введение

Активная среда твердотельного лазера содержит активные ионы примеси в твердотельной матрице. Именно в ионах примесей и создается инверсная заселенность. В качестве примесных ионов обычно используют ионы переходных металлов (марганец (Mn), хром (Cr), никель (Ni) и кобальт (Co)) или редкоземельных элементов. В настоящее время инверсная заселенность получена на большом числе ионов (например, на Cr, Nd, Sm, Ni, Er и др.). В качестве матриц твердотельных активных сред используются такие кристаллические или аморфные диэлектрические материалы как корунд (Al_2O_3), иттрий-алюминиевый гранат ($Y_3Al_5O_{12}$), стекло. Концентрация примесных ионов в матрице, как правило, невелика и составляет доли процента. Рабочий активный элемент лазера должен удовлетворять большому числу требований. Он должен обеспечивать большой коэффициент усиления, быть оптически однородным, механически прочным; термостойким, технологичным, прозрачным для излучения накачки, а также допускать механическую и оптическую обработку, допускать изготовление образцов больших размеров и иметь высокую теплопроводность.

Основной способ создания инверсии населенностей в твердотельных лазерах – оптическая накачка. Для реализации оптической накачки необходимы мощные источники света, у которых основная доля энергии должна попадать в полосы поглощения активного вещества. Наиболее подходящими до недавнего времени являлись газоразрядные лампы (например, ксеноновые или криптоновые). Они обладают достаточно высоким КПД (до 50%). В последнее время для оптической накачки наряду с газоразрядными лампами все шире используются мощные светодиодные линейки или матрицы.

Излучением лазера можно управлять путем изменения добротности резонатора таким образом, что вместо режима непрерывного генерирования лазерного излучения будет излучаться единичный импульс большой мощности (гигантский импульс) или периодическая последовательность гигантских импульсов.

Целью данной работы является ознакомление с конструкцией твердотельного лазера на кристалле $YAG:Nd^{3+}$ и исследование режима модуляции добротности – режима получения гигантских импульсов в таком лазере.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Устройство и принцип действия твердотельного лазера на YAG:Nd³⁺

Неодимовые лазеры являются самыми популярными из твердотельных лазеров. В этих лазерах активной средой обычно является кристалл $Y_3Al_5O_{12}$ (иттрий-алюминиевый гранат), в котором часть ионов Y^{3+} замещена ионами Nd^{3+} . Типичная атомарная концентрация неодима составляет 0,05-1,3 %.

Упрощенная схема энергетических уровней кристалла YAG:Nd³⁺ приведена на рисунке 1.1.

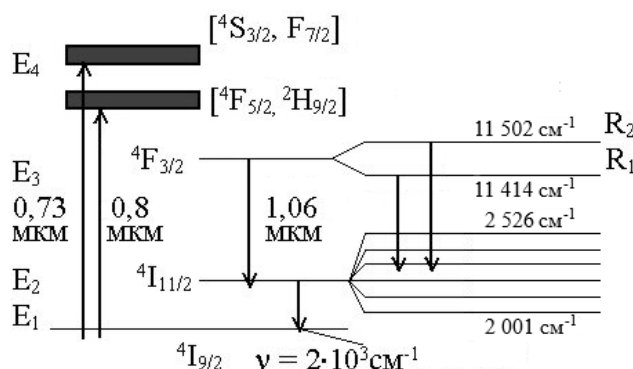


Рисунок 1.1 – Схема энергетических уровней кристалла YAG:Nd³⁺

Две основные полосы накачки расположены на длинах волн 0,73 и 0,8 мкм, соответственно. В кристалле YAG:Nd³⁺ переход $4F_{3/2} - 4I_{11/2}$ хорошо подходит для получения лазерной генерации в четырехуровневой схеме. Этот переход имеет длину волны $\lambda = 1,064$ мкм (ближний ИК диапазон).

YAG:Nd-лазеры могут работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Активные элементы выполняются в виде стержней диаметром до 0,5-1 см и длиной до 10 см. Они отличаются высоким оптическим качеством и хорошо поддаются полировке. Обычно лазеры на иттрий-алюминиевом гранате (ИАГ) используются в режиме импульсно-периодического или непрерывного возбуждения. При этом в режиме импульсно-периодического возбуждения создают достаточно длинные (0,5-10 мс) импульсы с частотой повторения до 100 Гц. Мощность непрерывной генерации современных лазеров на ИАГ достигает 400 Вт.

Оптическая накачка YAG:Nd-лазеров осуществляется либо с помощью излучения газоразрядных ламп, либо с помощью светодиодов или лазерных диодов.

Обычно в конструкции твердотельного лазера (рисунок 1.2) используются зеркала 1 и 5, активный (лазерный) стержень 3 и лампа накачки 2 одинаковой формы. Для эффективного применения энергии оптической накачки стержень 3 и лампа 2 помещены в замкнутый рефлектор 4 эллиптической формы. При этом элементы 3 и 2 размещаются в фокусах эллиптического сечения рефлектора, что позволяет сконцентрировать энергию оптической накачки в объеме активной среды. Рефлектор 4 заполнен охлаждающей жидкостью, которая периодически прокачивается через лазер.

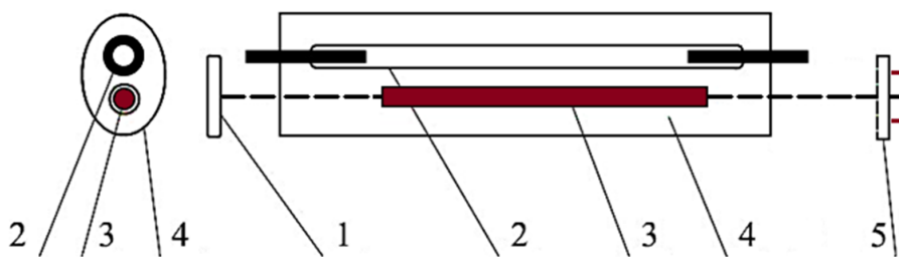


Рисунок 1.2 – Схема YAG:Nd³⁺-лазера с ламповой накачкой: 1 — заднее зеркало; 2 — лампа накачки; 3 — кристалл YAG:Nd³⁺; 4 — отражатель; 5 — выходное зеркало;

YAG:Nd-лазеры могут работать в непрерывном и импульсном режиме. В первом случае используются криптоновые лампы накачки, во втором — ксеноновые. И основная проблема в обоих случаях — низкая эффективность поглощения излучения накачки. Это приводит к высокому энергопотреблению и большому тепловыделению. Поэтому для подобных систем требуется водяное охлаждение.

Вторым существенным недостатком твердотельных лазеров с ламповой накачкой является непродолжительный срок службы ламп — несколько сотен часов. А их регулярная замена ведет к существенно увеличению эксплуатационных расходов.

Тем не менее, твердотельные лазеры с ламповой накачкой имеют и ряд преимуществ: большая энергия импульса; высокое качество излучения; возможность получения пятна обработки меньшего размера; лучшее поглощение металлами; более простая эксплуатация; надежность.

Другой способ оптической накачки YAG:Nd-лазера — накачка лазерными диодами или линейками лазерных диодов с длиной волны излучения 808 нм, идеально попадающей в полосу поглощения активной среды YAG:Nd-лазера. Схема YAG:Nd-лазера с диодной накачкой приведена на рисунке 1.3.

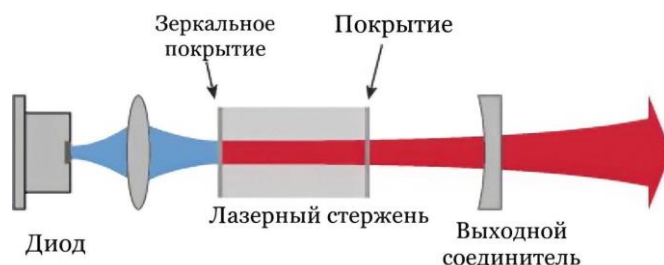


Рисунок 1.3 – Схема YAG:Nd-лазера с диодной накачкой

Основными характеристиками YAG:Nd-лазера с диодной накачкой является высокий КПД и возможность генерации импульсов с периодичностью 0,1...100 кГц. Более эффективное поглощение излучения накачки позволяет существенно снизить энергопотребление лазера. Кроме того, меньше энергии уходит в тепловые потери, поэтому лазерам с диодной накачкой достаточно воздушного охлаждения. Это упрощает эксплуатацию и позволяет уменьшить габариты. Еще одним преимуществом таких лазеров является большой срок службы лазерных диодов. Он составляет более 10000 часов. К недостаткам лазеров с диодной накачкой можно отнести чувствительность к температуре окружающей среды в жаркое время.

1.2 Модуляция добротности твердотельного лазера на кристалле YAG:Nd

Режим модуляции добротности резонатора — режим импульсного генерирования лазерного излучения, при котором накопление энергии производится в лазерной

активной среде, а ее вывод осуществляется путем быстрого изменения добротности резонатора от минимальной до максимальной.

При достижении почти максимальной инверсии населенностей путем оптической накачки резонатор открывается и развивается мощный импульс излучения. Развитие генерации приводит к резкому уменьшению инверсии населенностей. Получающиеся импульсы генерации характеризуются мощностью порядка сотен и тысяч мегаватт и длительностью от единиц до десятков наносекунд. Другое название этого режима – режим гигантских импульсов.

Технически модуляция добротности резонатора осуществляется следующими основными способами (рисунок 1.4):

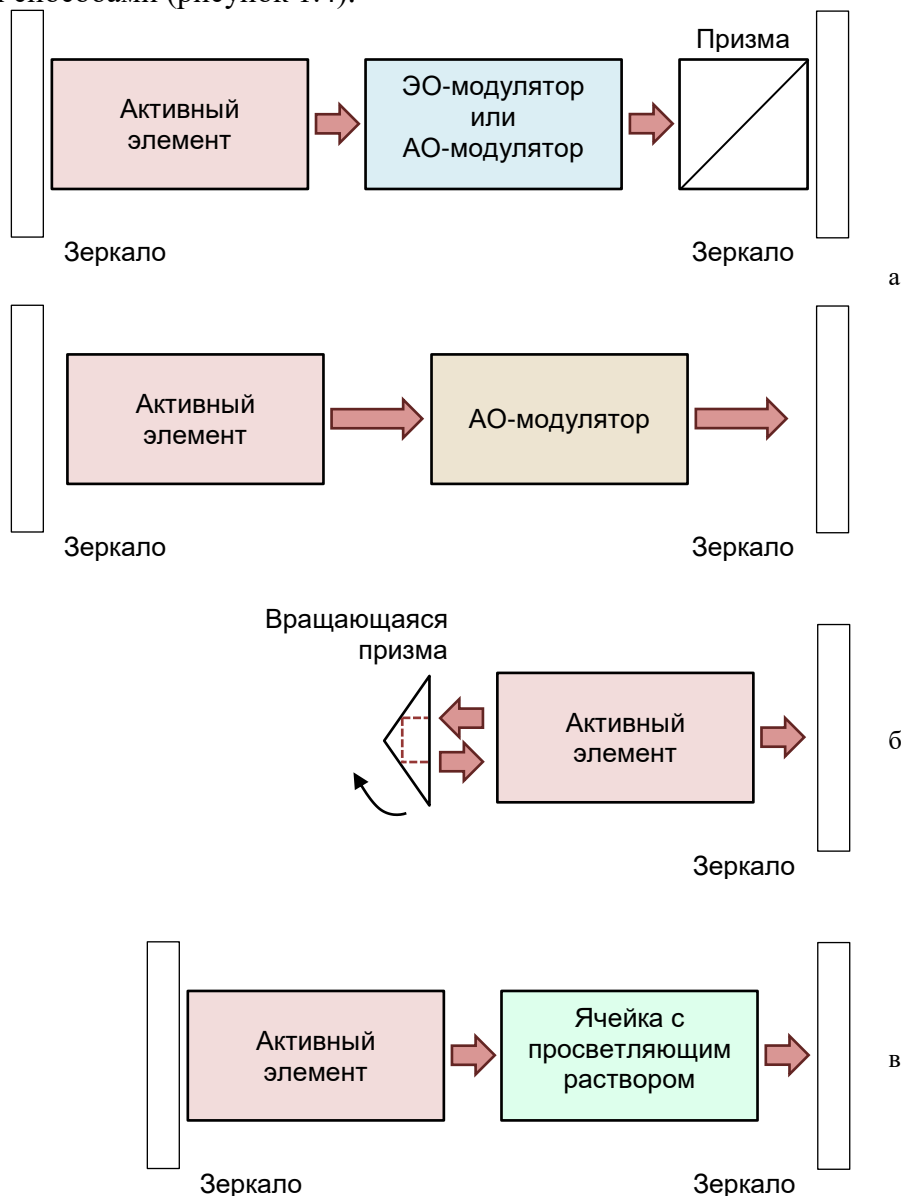


Рисунок 1.4 – Способы осуществления режима модуляции добротности резонатора с помощью:
а – ЭО- и АО-модулятора; б – вращающейся призмы; в – пассивного затвора

1. В резонатор лазера помещают электрооптический или акустооптический модулятор (АОМ). При подаче напряжения на элемент он не пропускает излучение, в заданный момент напряжение быстро снимается и происходит излучение импульса (рисунок 1.4, а).

2. Вместо одного зеркала резонатора используют вращающуюся прямоугольную призму (рисунок 1.4, б). Добротность резонатора здесь максимальна в момент, когда гипотенузная грань призмы параллельна второму зеркалу резонатора.

3. В резонатор лазера помещают ячейку с просветляющимся раствором. Просветление раствора происходит «автоматически» под действием спонтанного излучения активного элемента (рисунок 1.4, в).

Метод модуляции добротности резонатора лазера позволяет увеличивать пиковую мощность лазера приблизительно в тысячи раз. Для типичного YAG:Nd-лазера это увеличение составляет от 10^3 до 10^4 раз.

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка приведена на рисунке 2.1.

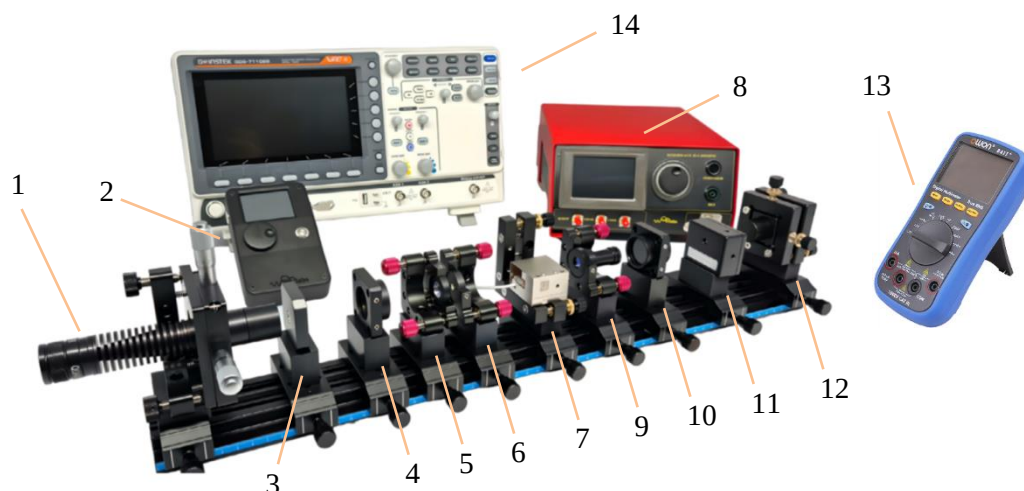


Рисунок – 2.1 – Лабораторный стенд для исследования режима модуляции добротности твердотельного лазера на кристалле YAG:Nd

В состав установки входят следующие элементы: 1 – лазерный диод ($P=1$ Вт, $\lambda=808$ нм); 2 – терминал управления диодным лазером; 3 – коллимирующая линза; 4 – фокусирующая линза; 5 – входное плоское зеркало; 6 – активный элемент из кристалла $Y_3Al_5O_{12}:Nd$; 7 – АО-модулятор; 8 – блок управления АО-модулятором; 9 – выходное сферическое зеркало; 10 – светофильтр; 11 – юстировочный диодный лазер; 12 – фотодетектор; 13 – цифровой мультиметр; 14 – цифровой осциллограф.

Все элементы находятся в специальных держателях и размещаются на оптическом рельсе.

Лазерный диод 1 используется для оптической накачки активного элемента 6 из кристалла $Y_3Al_5O_{12}:Nd$. Линзы 3 и 4 необходимы для расширения и фокусировки излучения на активный элемент 4. Зеркала 5 и 9 образуют резонатор лазера. Акустооптический модулятор 7 реализует режим гигантских импульсов. Блок 8 помогает задавать рабочие характеристики АО-модулятора. Лазер на $Y_3Al_5O_{12}:Nd$ генерирует излучение с длиной волны 1,064 мкм. Поэтому для настройки всех элементов установки используется юстировочный диодный лазер 11 с излучением из красной области спектра. Мощность оптического излучения лазера ослабляется светофильтром 10 и регистрируется фотодетектором 12, затем измеряется с помощью цифрового мультиметра 13. Длительность импульсов генерации в режиме модуляции добротности измеряется цифровым осциллографом 14.

3 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

- 3.1 Настройка твердотельного YAG:Nd-лазера с АО-модулятором.
- 3.2 Исследование генерации лазерного излучения в импульсном и непрерывном режимах.
- 3.3 Получение режима модуляции добротности резонатора YAG:Nd-лазера.
- 3.4 Исследование зависимости амплитуды импульса от мощности накачки.
- 3.5 Измерение длительности и формы импульса в режиме модуляции добротности.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с целью работы, теоретическим материалом, описанием экспериментальной установки и пройти инструктаж по технике безопасности.

Лабораторную работу необходимо выполнять в защитных очках!

1. Включить юстировочный диодный лазер.
2. Убедиться в наличии генерации. В случае неисправной работы устройства сообщить преподавателю!
3. Используя юстировочный диодный лазер провести юстировку лазерного диода, входного и выходного зеркал, активного элемента, акустооптического модулятора и фотодетектора.
4. Снять с рельса юстировочный диодный лазер.
5. Подключить лазерный диод, используемый для оптической накачки активного элемента к терминалу управления и установить мощность питания 0,5 Вт.
6. Подключить фотодетектор к мультиметру измерить мощность генерации лазера $Y_3Al_5O_{12}:Nd$, работающего в непрерывном режиме.
7. Изменяя ток лазерного диода измерить амплитуду и длительность импульсов генерации лазера $Y_3Al_5O_{12}:Nd$ при изменении мощности накачки от 0,5 Вт до 1 Вт, через 100 мВт. Результаты занести в таблицу 4.1.
8. Подключить акустооптический модулятор к блоку управления.
9. Подключить фотодетектор к цифровому осциллографу.
10. Установить минимальную мощность генерации лазера $Y_3Al_5O_{12}:Nd$, изменяя ток диода накачки.
11. Включить и настроить осциллограф. Включить блок управления акустооптического модулятора.
12. Используя осциллограф, измерить длительность импульсов генерации в режиме модуляции добротности.
13. Изменяя мощность накачки, измерить длительность импульсов генерации в режиме модуляции добротности. Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерений

Мощности накачки P , Вт	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Амплитуда импульсов U , В						
Длительность импульсов генерации $t_{и}$, с						
Длительность импульсов в режиме модуляции добротности $t_{и}$, с						

5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать следующие пункты:

- Цель работы.
- Теоретические сведения.
- Описание установки.
- Ход работы.
- Результаты проделанной работы и выводы.

Требования к оформлению отчета приведены в образовательном стандарте вуза ОС ТУСУР 01-2021 [3].

6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что означает инверсия населенностей?
2. Опишите схему энергетических уровней кристалла $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$.
3. В чем заключается принцип работы неодимового лазера?
4. При помощи каких методов можно достичь инверсия населенностей в твердотельных лазерах?
5. В чем суть режима модуляции добротности?
6. Какими методами осуществляется модуляция добротности резонатора лазера?

Список литературы

1. Шандаров, В. М. Основы физической и квантовой оптики: Учебное пособие [Электронный ресурс] / В. М. Шандаров. – Томск: ТУСУР, 2012. – 197 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/750> (дата обращения: 10.02.2025)
2. Пихтин А. Н. Квантовая и оптическая электроника: учеб. для вузов / А. Н. Пихтин. – М.: Абрис, 2012. – 656 с.
3. Образовательный стандарт вуза ОС ТУСУР 01-2021. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления от 25.11.2021 [Электронный ресурс]. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2021. – 52 с. – Режим доступа: <https://regulations.tusur.ru/#/documents/87> (дата обращения: 10.02.2025)