

И. Н. Карманов ^{1✉}

Лазерный лабораторный комплекс для направления Фотоника и оптоинформатика

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: i.n.karmanov@ssga.ru

Аннотация. В рамках совершенствования материально-технической базы кафедры физики СГУГиТ с целью обеспечения качественного освоения необходимых компетенций обучающимися по направлению подготовки 12.03.03 Фотоника и оптоинформатика, предлагается внедрение в учебный процесс ряда дисциплин (в части выполнения лабораторных работ) лазерного лабораторного комплекса на основе мультимодального твердотельного Nd:YAG лазера. Данный лазер, благодаря акустооптической модуляции добротности резонатора, способен работать как в непрерывном режиме, так и в трех импульсных режимах – активная модуляция добротности, синхронизация мод и модуляция добротности с синхронизацией мод.

Ключевые слова: Nd:YAG лазер, лабораторный комплекс, режимы лазерной генерации, модуляция добротности, синхронизация мод, лабораторные работы

I. N. Karmanov ^{1✉}

Laser Laboratory Complex for the Field of Photonics and Optoinformatics

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: i.n.karmanov@ssga.ru

Abstract. As a part of the improvement of material and technical base of the Department of Physics of SSUGT in order to ensure the qualitative development of the students, necessary competencies in the field of training 12.03.03 Photonics and Optoinformatics, it is proposed to introduce a laser laboratory complex based on a multimodal solid-state Nd:YAG laser into the educational process of a number of disciplines (in terms of laboratory work). Due to the acousto-optical modulation of the resonator Q-factor, this laser is capable of operating both in continuous mode and in three pulse modes – active Q-factor modulation, mode synchronization and Q-factor modulation with mode synchronization.

Keywords: Nd:YAG laser, laboratory complex, laser generation modes, Q-factor modulation, mode synchronization, laboratory work

Введение

В связи с началом подготовки бакалавров по направлению 12.03.03 Фотоника и оптоинформатика, профиль «Приборы квантовой электроники» на кафедре физики СГУГиТ в 2021 г. [1], возникла необходимость в совершенствовании материально-технической базы кафедры, прежде всего, в плане обеспечения лабораторных и практических занятий по профильным дисциплинам. Для решения этой задачи было решено создать учебно-научную лабораторию фотонных технологий [2]. В состав лаборатории предполагалось включить лазерный

лабораторный комплекс, позволяющий обучающимся на практике ознакомиться с режимами работы лазера, основными свойствами и характеристиками лазерного излучения, нелинейно-оптическими эффектами.

Методы и материалы

Предлагаемый к внедрению лабораторный комплекс (рис. 1) создан на основе мультимодального твердотельного Nd:YAG лазера (длина волны 1064 нм) с диодной накачкой, в состав которого входит акустооптический модулятор (АОМ) [3–5].

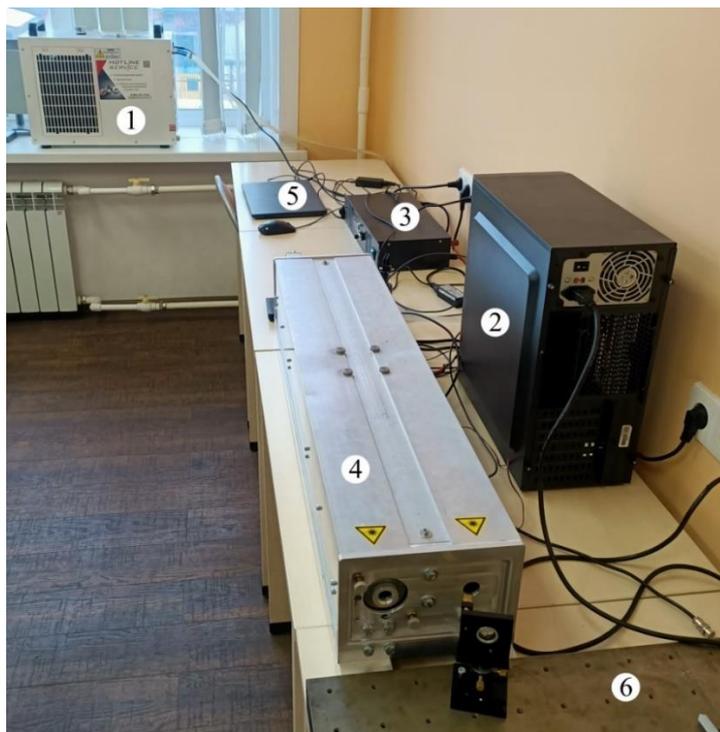


Рис. 1. Лазерный лабораторный комплекс. 1 – блок охлаждения, 2 – драйвер АОМ, 3 – драйвер лазера, 4 – лазерный излучатель, 5 – компьютер, управляющий АОМ, 6 – монтажная плата для установки модулей различных лабораторных работ.

Для выполнения ряда лабораторных работ также используется осциллограф (на рисунке не показан).

Модуляция добротности резонатора – это метод генерации интенсивных коротких импульсов света (иногда называемых «гигантскими импульсами») с помощью лазера. Под добротностью резонатора понимают отношение запасенной энергии к энергии, теряемой за один цикл колебания. Добротность резонатора является мерой затухания его колебаний или относительной ширины линии.

Основной принцип модуляции добротности заключается в следующем (рис. 2).



Рис. 2. Временная эволюция усиления и потерь в лазере с активной модуляцией добротности

1. На первом этапе усиливающая среда накачивается, в то время как извлечение энергии в виде лазерного излучения предотвращается за счет поддержания высоких потерь в резонаторе (то есть, добротность поддерживается на низком уровне).

2. После этого резко уменьшаются потери в резонаторе. Поскольку усиление в этом случае существенно превышает потери в резонаторе, мощность внутри резонатора растет экспоненциально (обычно начиная со слабого флуоресцентного света усиливающей среды), пока усиление не насыщается, и мощность снова не падает. Пик импульса достигается, когда коэффициент усиления становится равным потерям в резонаторе.

Сгенерированный световой импульс может извлекать большой процент энергии, запасенной в усиливающей среде. Для высокой энергии импульса активная среда должна иметь высокую способность накопления энергии, то есть длительное время жизни верхнего лазерного уровня, высокую плотность лазерно-активных ионов или атомов и не слишком высокую эффективность усиления. Последнее важно, потому что в противном случае усиленное спонтанное излучение могло бы ограничить накопленную энергию, а начальные потери, необходимые для предотвращения преждевременной генерации, были бы очень высокими. Наиболее часто используемыми лазерными усиливающими средами для лазеров с модуляцией добротности являются кристаллы и стекла, легированные редкоземельными элементами.

Модуляция добротности может достигаться активными или пассивными средствами. Активная модуляция добротности, используемая в рассматриваемом лазере, основана на модуляции потерь с помощью АОМ, управляемого внешним электрическим сигналом (рис. 3).

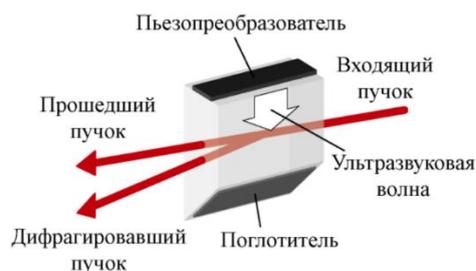


Рис. 3. Принцип работы АОМ

Лазерный пучок пропускается через кусочек прозрачного вещества, в котором с помощью приклеенного к одной из сторон пьезопреобразователя создается упругая волна ультразвуковой частоты. На противоположной стороне кусочка ультразвуковая волна поглощается, поэтому волна в кусочке получается бегущей. В результате фотоупругого эффекта в кусочке возникает фазовая дифракционная решетка, перемещающаяся со скоростью звука. Это приводит к возрастанию потерь в резонаторе, так как лазерный пучок дифрагирует на этой решетке и частично выводится из резонатора.

На рис. 4 приведена схема устройства лазерного излучателя. В качестве активного элемента использован кристалл Nd:YAG. Накачка производится при помощи лазерных диодов.

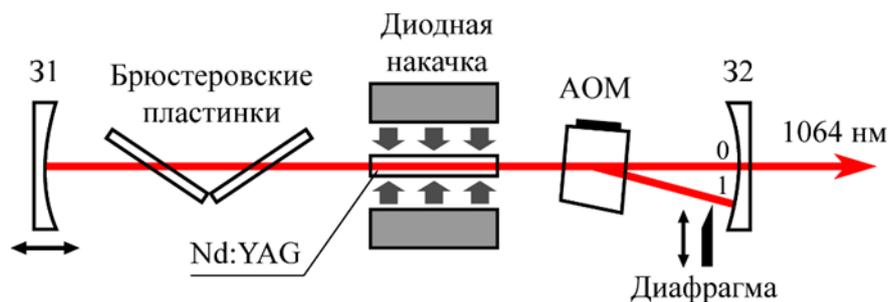


Рис. 4. Резонатор лазерного излучателя

Резонатор лазерного излучателя образуют два сферических зеркала: 31 (плотное) и 32 (выходное), одно из которых (31) при помощи транслятора с микрометрическим винтом можно перемещать в продольном направлении, меняя длину резонатора. Кварцевые брестеровские пластинки придают излучению линейную поляризацию. АОМ бегущей звуковой волны с торцами, просветленными для длины волны 1064 нм, установлен под углом Брэгга к оси резонатора рядом с выходным зеркалом 32. Частота сигнала, подаваемого на АОМ, составляет $f = 80$ МГц, что соответствует половине ширины частотного интервала между модами лазера:

$$c/2L = 2f, \quad (1)$$

где c – скорость света; L – длина резонатора, при этом лазерный луч дифрагирует на бегущей ультразвуковой волне, и на зеркало падает два пучка: прошедший 0 и дифрагировавший 1. Конструкция позволяет возвращать дифрагировавший в АОМ луч в резонатор лазера. После двойного прохождения через АОМ частота излучения частично оказывается сдвинута на величину $2f$, что соответствует межмодовому интервалу лазера, благодаря этому возникает синхронизация мод. Рядом с выходным зеркалом 32 установлена диафрагма, которая может перекрывать дифрагированный пучок.

Данный лазер может работать в следующих четырех режимах.

1. Режим непрерывной (стационарной) генерации, который реализуется при выключенном АОМ.

2. Импульсный режим с непрерывной синхронизацией мод (CWML). Подавая на АОМ непрерывный сигнал, частота которого с высокой точностью удовлетворяет условию (1), можно настроить режим CWML. Выполнения равенства $c/2L = 2f$ можно добиться подстройкой длины резонатора вращением микрометрического винта транслятора, на котором установлено зеркало 31.

3. Импульсный режим с модуляцией добротности резонатора и синхронизацией мод (QML). Реализация данного режима осуществляется путем модуляции ультразвуковой волны, генерируемой в АОМ сигналом с частотой $f_Q \sim 1 \div 5$ кГц и увеличения мощности подаваемого на модулятор РЧ-сигнала по сравнению с режимом CWML.

4. Импульсный режим с модуляцией добротности резонатора (Q-switch). Q-switch режим реализуется аналогично QML, но дифрагированный луч 1 (см. рис. 4.) должен быть перекрыт с помощью диафрагмы.

Для выполнения той или иной лабораторной работы используются различные модули, устанавливаемые на монтажной плате (рис. 5).

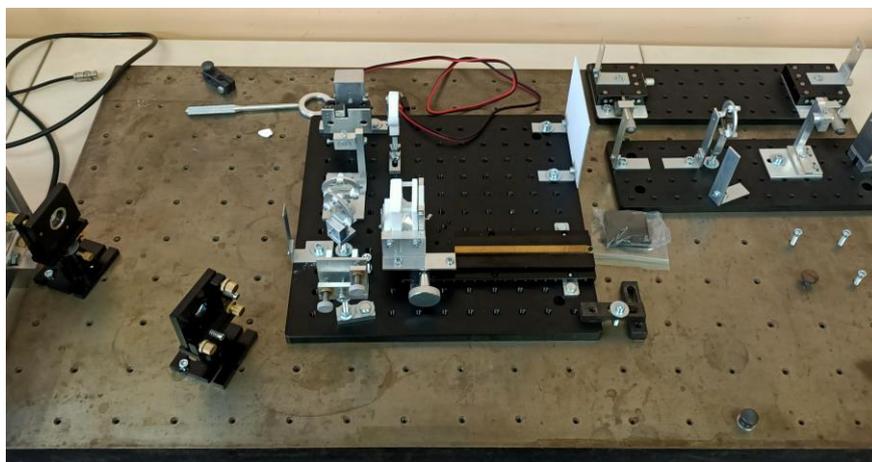


Рис. 5. Монтажная плата со съемными модулями

Результаты

В результате внедрения рассматриваемого комплекса в учебный процесс студенты смогут выполнять, как минимум, семь лабораторных работ.

1. *Измерение расходимости лазерного излучения.* Целью работы является изучение понятия расходимости лазерного пучка и измерение угла расходимости лазерного излучения.

2. *Активная модуляция добротности (Q-switch) в неодимовом лазере.* Целью работы является ознакомление с основными принципами работы импульсного Nd:YAG лазера в режиме Q-switch и измерение основных характеристик излучения данного лазера.

3. *Синхронизация мод (CWML) в неодимовом лазере.* Целью работы является ознакомление с основными принципами синхронизации мод твердотельного лазера, и измерение характеристик выходного излучения Nd:YAG лазера, работающего в данном режиме.

4. *Режим модуляции добротности с синхронизацией мод (QML) в неодимовом лазере.* Целью работы является ознакомление с принципом одновременной работы твердотельного лазера в режимах синхронизации мод и модуляции добротности резонатора, а также измерение основных характеристик выходного излучения Nd:YAG лазера, работающего в таком режиме, таких как средняя выходная мощность, количество импульсов синхронизации мод внутри огибающей цуга генерации, энергия и пиковая мощность цуга импульсов, энергия импульса синхронизации мод лазера.

5. *Изучение интерферометра Майкельсона.* Целью работы является изучение устройства и принципа работы интерферометра Майкельсона и определение с его помощью ширины линии генерации Nd:YAG лазера, длины и времени когерентности его излучения.

6. *Измерение длительности ультракороткого импульса неодимового лазера корреляционным методом.* Целью работы является изучение принципов работы автокоррелятора интенсивности и измерение с его помощью длительности импульса лазера.

7. *Генерация второй гармоники в нелинейном кристалле.* Целью работы является наблюдение нелинейного оптического эффекта генерации второй гармоники (длина волны 532 нм) в нелинейном кристалле LBO и исследование зависимости интенсивности второй гармоники от частоты повторения импульсов лазера в различных режимах его работы.

Для методической поддержки лабораторного комплекса на кафедре физики в 2024 г. будет подготовлен к изданию практикум «Твердотельные лазеры и нелинейная оптика».

В перспективе на базе комплекса возможна разработка новых лабораторных работ по дисциплинам, преподаваемым на кафедре.

Заключение

Внедряемый лабораторный комплекс позволит усилить практическую составляющую таких курсов учебного плана по направлению подготовки Фотоника и оптоинформатика, как «Оптическая физика», «Основы фотоники», «Нелинейная оптика», «Проектирование квантовых приборов». Кроме того, он, несомненно, может быть задействован при выполнении задач, связанных с научно-исследовательской деятельностью преподавателей и студентов, с проектной деятельностью обучающихся [6–8]. Интерферометр Майкельсона и нелинейно-оптический эффект генерации второй гармоники можно использовать для демонстраций школьникам – потенциальным абитуриентам в ходе проведения профпроб, открытых уроков и других профориентационных мероприятий [9, 10].

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность коллективу «ООО Академлазермаш» и лично директору М.Д. Яковину за изготовление описанного лазерного лабораторного комплекса, а также руководству СГУГиТ в лице ректора А.П. Карпика за обеспечение финансирования проекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карманов И.Н., Михайлова Д.С., Сырнева А.С. Открытие подготовки по направлению "Фотоника и оптоинформатика" – ответ на вызовы цифровизации оптических технологий // Актуальные вопросы образования. – 2020. – Т. 3. – С. 50–55.
2. Карманов И.Н. Проект лаборатории фотонных технологий // Актуальные вопросы образования. – 2023. – № 1. – С. 207–213.
3. В.И. Донин, Д.В. Яковин, А.В. Грибанов. Структура пикосекундных импульсов генерации в диодно-накачиваемом Nd:YAG-лазере с модуляцией добротности и синхронизацией мод // Квантовая электроника. – Т.45. – № 12. – 2015. – С. 1117–1120.
4. Донин В.И., Яковин Д.В., Грибанов А.В., Яковин М.Д. Новый метод модуляции добротности резонатора с синхронизацией мод в твердотельных лазерах // Оптический журнал. 2018. – Т. 85. – № 4. – С. 8–11.
5. V. I. Donin et al. Superluminescent high-efficient parametric generation in PPLN crystal with pumping by a Q-switched mode locked Nd:YAG laser. – 2018 Laser Phys. Lett. 15 035005. – DOI 10.1088/1612-202X/aaa397.
6. Карманов И.Н. Перспективы реализации проектного обучения на кафедре физики СГУГиТ // Актуальные вопросы образования. – 2021. – № 1. – С. 59–62.
7. Шергин С. Л. Натурные лабораторные работы по физике как этап проектного обучения // Актуальные вопросы образования. – 2021. – № 2. – С. 189–191.
8. Шабурова А.В., Самойлюк Т.А., Кочетова Е.А. Инновационный потенциал студентов как фактор развития цифровой экономики региона / Актуальные вопросы образования. – 2023. – № 1. – С. 316–320.
9. Парко И.В., Кутенкова Е.Ю., Ларина Т.В. Методы взаимодействия кафедры ФиП (Фотоники и приборостроения) ИОиТИБ СГУГиТ в формате: школа – колледж – вуз – предприятие / Актуальные вопросы образования. – 2023. – № 2. – С. 196–202.
10. Шергин С. Л. Применение лабораторных установок и моделей компьютерных лабораторных работ для демонстрации физических явлений // Актуальные вопросы образования. – 2022. – № 3. – С. 91–98.

© И. Н. Карманов, 2024