

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Коромыслов Алексей Леонидович

**Двухволновая генерация при синхронизации поперечных мод в
твердотельных лазерах с продольной диодной накачкой и получение
когерентного терагерцового излучения**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Чешев Евгений Анатольевич
(ФИАН, г. Москва)

Научный консультант: кандидат физико-математических наук
Горбунков Михаил Валериевич
(ФИАН, г. Москва)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Смирнов Константин Владимирович
(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет» (МПГУ), г. Москва);
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Сироткин Анатолий Андреевич
(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН), г. Москва).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова». (МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва)

Защита диссертации состоится «19» декабря 2016 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 на базе ФИАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на сайте www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.03,
доктор физико-математических наук,

А.С. Золотько

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Интерес к исследованиям режимов двухволновой генерации в твердотельных лазерах с диодной накачкой обусловлен тем, что такие лазеры позволяют, например, значительно увеличить точность дальнометрии, чувствительность лидарных систем и систем анализа газового состава. Наконец, интересной представляется возможность получать терагерцовое излучение путем генерации разностной частоты двухволнового лазера в нелинейном кристалле. Эффекты синхронизации поперечных мод в твердотельных лазерах с продольной диодной накачкой дают возможность генерировать двухволновое излучение, не прибегая к селективным относительно сложным схемам. Настоящая работа посвящена исследованию режима двухволновой генерации в твердотельном лазере с продольной диодной накачкой в условиях синхронизации поперечных мод, созданию двухволнового лазера и на его основе компактного генератора терагерцового излучения. Исследования эффектов синхронизации поперечных мод в твердотельных лазерах с продольной диодной накачкой начались сравнительно недавно, с конца девяностых. Интерес к эффектам синхронизации поперечных мод связан с тем, что только с их учетом может быть достигнуто высокое пространственное качество излучения, с их помощью, как показано в ряде работ отечественных и зарубежных авторов, могут быть исследованы термооптические свойства активных сред. Очевидна чувствительность эффектов синхронизации поперечных мод к лазерному качеству активной среды, что в принципе позволяет надеяться получить методики оценки качества. Исследование зависимостей порогов генерации от длины резонатора в областях синхронизации поперечных мод выявило сильную зависимость усиления от длины резонатора в этих областях, что позволяет регулировать усиление в активной среде в значительных пределах выбором длины резонатора и привлекает своей простотой реализации режима двухволновой генерации.

В настоящей работе в лазере на Nd:YLF с использованием синхронизации поперечных мод реализован режим двухволновой генерации, продемонстрирована перспективность такого режима для создания компактного генератора когерентного ТГц излучения. В работе также изучен метод реализации режима двухволновой генерации при ВКР самопреобразовании основной частоты лазера

на Nd:YVO_4 с пассивным $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ затвором, исследованы особенности такого режима при синхронизации поперечных волн.

Целями диссертационной работы являлись:

1. Исследование механизмов двухволновой генерации, наблюдающейся в твердотельных лазерах с продольной диодной накачкой в областях синхронизации поперечных мод резонатора.
2. Исследование ВКР в условиях синхронизации поперечных мод, сопровождающейся значительным возрастанием плотности мощности основной волны в приосевой области резонатора.
3. Создание компактного генератора когерентного ТГц излучения путем генерации в нелинейном кристалле разностной частоты двухволнового лазера.

При этом решались следующие задачи:

1. Создание экспериментальной установки для исследования эффектов синхронизации поперечных мод твердотельных лазеров при продольной диодной накачке.
2. Расчет и проектирование оптических схем экспериментальных образцов двухволновых лазеров, разработка конструкторской документации для изготовления экспериментальных образцов.
3. Исследование механизма двухволновой генерации в лазерах на кристалле Nd:YLF с акустооптическим и пассивным $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ затворами.
4. Создание экспериментального образца двухволнового лазера на кристалле Nd:YLF с продольной диодной накачкой и модуляцией добротности резонатора акустооптическим затвором.
5. Экспериментальные исследования ВКР самопреобразования в лазере на Nd:YVO_4 с пассивным $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ затвором в областях частотного вырождения мод.
6. Создание стенда для исследования генерации разностной частоты 1.64 ТГц двухволнового лазера в нелинейном кристалле, измерение основных характеристик ТГц излучения.

Научная новизна работы

1. Определены условия и механизм двухволновой генерации в лазерах на Nd:YLF кристалле с продольной диодной накачкой при модуляции добротности резонатора как акустооптическим, так и пассивным Cr⁴⁺:YAG затворами.
2. Показано, что в лазерах с модуляцией добротности пассивным Cr⁴⁺:YAG затвором в областях синхронизации поперечных мод падение порога генерации и одновременно резкое увеличение длительности импульса излучения, уменьшение импульсной мощности и периода следования импульсов генерации связаны с ростом усиления за проход при синхронизации поперечных мод.
3. Обнаружено, что термооптические искажения активной среды Nd:YLF, вызванные продольной накачкой, приводят к асимметрии пороговой зависимостей в областях синхронизации поперечных мод, проявляющейся в скачках порога в областях длин резонатора справа от положений частотного вырождения мод.
4. Обнаружено, что в лазере на кристалле Nd:YVO₄ с продольной диодной накачкой и модуляцией добротности резонатора пассивным Cr⁴⁺:YAG затвором в условиях частотного вырождения мод наблюдается синхронизация одновременно продольных и поперечных мод основной и стоксовой компонент излучения.
5. Впервые, в твердотельном лазере на кристалле Nd:YVO₄ с продольной накачкой и модуляцией добротности резонатора пассивным Cr⁴⁺:YAG затвором с ВКР самопреобразованием частоты в условиях вырождения мод резонатора наблюдалась синхронизация поперечных мод стоксовой компоненты излучения.

Практическая значимость работы

- предложен новый метод регулировки усиления в активной среде путем изменения длины резонатора в областях синхронизации поперечных мод;

- реализованы двухволновые Nd:YLF лазеры с длинами волн 1047 нм и 1053 нм с модуляцией добротности резонатора как акустооптическим, так и пассивным Cr⁴⁺:YAG затворами, генерирующие импульсно-периодическое излучение.

ние с частотой следования импульсов 5 — 7 кГц, с длительностью импульсов 13 нс с акустооптическим затвором и около 100 нс с пассивным затвором.

- на основе двухволнового Nd:YLF лазера создан экспериментальный образец источника излучения 1.64 ТГц с импульсной мощностью до 0.8 мВт с длительностью импульсов 10 нс с частотой повторений 7 кГц, изучены его основные характеристики.

Защищаемые положения

1. Механизм двухволновой генерации в лазерах на Nd:YLF при продольной диодной накачкой в условии модуляции добротности как акустооптическим, так и пассивным Cr⁴⁺:YAG затворами, обусловлен выравниванием усилений на длинах волны 1047 нм и 1053 нм путем выбора длины резонатора в области, где фазовые искажения активной среды, вызванные термооптикой, приводят к падению усиления на длине волны 1047 нм.
2. В твердотельных лазерах с продольной диодной накачкой с модуляцией добротности резонатора пассивным Cr⁴⁺:YAG затвором в областях синхронизации поперечных мод наблюдается падение порога генерации и одновременно резкое увеличение длительности импульса излучения, уменьшение импульсной мощности и периода следования импульсов генерации, обусловленные увеличением усиления за проход при синхронизации поперечных мод.
3. Создан экспериментальный образец источника когерентного излучения на 1.64 ТГц с импульсной мощностью 0.8 мВт с длительностью импульсов 10 нс при частоте повторений 7 кГц.
4. Фазовые искажения в активной среде, вызванные термооптикой при продольной диодной накачке, приводят к асимметрии зависимости порога генерации в областях синхронизации поперечных мод, обусловленной знаком фазовых искажений активной среды.
5. В лазере на кристалле Nd:YVO₄ с продольной диодной накачкой и модуляцией добротности резонатора пассивным Cr⁴⁺:YAG затвором в областях частотного вырождения мод реализуется синхронизация одновременно продольных и поперечных мод основной и стоксовой компонент излучения.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих научных журналах, входящих в международную систему цитирования Web of

Science: «Laser Physics Letters» (2 статьи), «Краткие сообщения по физике» (1 статья), а также в трудах конференций.

Результаты работы докладывались автором и обсуждались на научных семинарах Отделения квантовой радиофизики ФИАН и следующих конференциях: 8-я международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2013», Санкт-Петербург, 14-16 октября 2014; 4-й Симпозиум по когерентному и оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур, Звенигород, 27–29 ноября 2013; Конференция «Радиолокационные системы малой и сверхмалой дальности», Москва, 28 января 2013 г.; 15-я Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики», Москва, 17 ноября 2014.; Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015, Москва, 16-20 февраля 2015 года; Всероссийская конференция "Импульсная сильноточная и полупроводниковая электроника", Москва, 27-28 мая 2015 года; Всероссийская конференция "Плазменные, лазерные исследования и технологии", Москва, 25-27 января 2016 года; Международная конференция ICONO/LAT-2016, Минск 26-30 сентября 2016 г.

Результаты работ были отмечены дипломами и премиями: 1-я премия им. Н.Г. Басова на конкурсе молодых ученых ОКРФ ФИАН, 2013 г., диплом за лучший доклад на секции «Оптическое приборостроение» VIII Международной конференции для молодых ученых и специалистов «Оптика-2013», 2013 г., диплом за высокий научный уровень проводимых исследований УНК ФИАН, 2014 г.

Достоверность полученных результатов подтверждена публикациями в ведущих рецензируемых научных журналах и созданным экспериментальным образцом источника когерентного терагерцового излучения, с которым выполнен комплекс исследований его характеристик и который используется в практических исследованиях.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из Введения, пяти Глав, Заключение и Списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 106 страниц, включая 44 рисунка, 4 таблицы, 118 наименований в списке литературы.

Все результаты исследовательской работы, представленной в диссертации, получены при поддержке грантов и программ: РФФИ № 16-32-00834 мол_а, 12-02-31796 мол_а, 14-02-31718 мол_а, 16-52-00138 Бел_а; Фонд содействия разви-

тию малых форм предприятий в научно-технической сфере, программа «Умник»; Учебно-научный комплекс ФИАН; Программа фундаментальных исследований Президиума РАН №42 «Фундаментальные и прикладные проблемы фотоники и физика новых оптических материалов»; ФЦП Минобрнауки РФ, соглашение № 14.575.21.0047. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57514X0047, 30.06.2014 - 31.12.2016. Во всех перечисленных грантах и программах автор был руководителем или соисполнителем.

Личный вклад автора

Автором усовершенствована экспериментальная установка для проведения исследований эффектов синхронизации поперечных мод в твердотельных лазерах с продольной диодной накачкой. В частности им разработано программное обеспечение в среде Labview, позволяющее автоматизировать управление экспериментами и съем экспериментальных данных. Автором выполнено конструкторское проектирование узлов экспериментальной установки и экспериментальных образцов двухволновых лазеров. Им проведены экспериментальные исследования эффектов синхронизации поперечных мод резонатора в различных схемах, исследованы режимы и механизм двухволновой генерации в твердотельных лазерах с продольной диодной накачкой. Он принимал непосредственное участие в подготовке экспериментов по генерации разностной частоты двухволнового лазера на Nd:YLF с модуляцией добротности резонатора акустооптическим затвором, проведении экспериментов по генерации разностной частоты 1.64 ТГц в кристалле GaSe, измерении характеристик терагерцового излучения, планировании и осуществлении экспериментов по ВКР в условиях синхронизации поперечных мод в лазере на Nd:YVO₄. Им самостоятельно спланированы и осуществлены исследования с Nd:YLF лазером с пассивным затвором, изучен режим двухволновой генерации.

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, научная новизна и практическая ценность, определены защищаемые положения, перечислены публикации автора, описана структура и краткое содержание работы, указан личный вклад автора в представленных исследованиях.

В **Главе 1** «Состояние исследований синхронизации поперечных мод, двухволновой генерации и генерации терагерцового излучения» представлен краткий обзор состояния исследования синхронизации поперечных мод в условиях частотного вырождения мод при продольной диодной накачке. Рассмотрены экспериментальные исследования эффектов синхронизации поперечных мод и теоретические модели, объясняющие механизмы синхронизации поперечных мод. Рассмотрены схемы двухволновой генерации в твердотельных лазерах при продольной лазерной диодной накачкой и механизмы, приводящие к двухволновой генерации. Рассмотрены особенности генерации ВКР излучения, как одного из вариантов получения двухволнового лазерного излучения. Рассмотрены перспективы создания компактных генераторов ТГц излучения при использовании метода генерации разностной частоты двухволнового лазера в нелинейном кристалле.

В § 1.1. представлен обзор работ посвященных синхронизации поперечных мод резонатора. В [5] определено, что в конфигурациях резонатора, удовлетворяющих выражению:

$$\arccos\sqrt{g_1 g_2} = \pi \frac{r}{s} \quad (1)$$

где r и s – натуральные числа, а r/s – несократимая дробь, реализуется вырождение мод по частоте. При этом согласно [4] в конфигурациях резонатора, определяемых выражением (1) в условиях неоднородной продольной накачки (диаметр пучка накачки существенно меньше диаметра нулевой моды резонатора) наблюдаются генерация большого числа поперечных мод с ненулевыми пространственными индексами. С другой стороны, в случае изменения конфигурации резонатора, например отстройки длины резонатора от конфигурации, определяемой выражением (1), пространственная структура излучения становится близкой к гауссовой. Происходит перераспределение мощности между нулевой модой резонатора и высшими модами [8]. В работах [4, 7] показано, что в области с частотным вырождением пороговая мощность накачки падает, а усиление,

очевидно, растет. Такое поведение связано с уменьшением профиля основной моды лазера, что обеспечивает лучшее пространственное согласование накачки и основной моды в конфигурации резонатора с частотным вырождением.

В § 1.2. представлен обзор работ посвященных методам и схемам двухволновой генерации. Существует несколько основных способов генерации двух длин волн в лазере: введение в резонатор дисперсионных элементов, обеспечивающих выравнивание коэффициентов усиления для различных длин волн генерации, реализация 2-х независимых резонаторов с одним общим зеркалом, использование температурной зависимости длины резонатора для настройки на две длины волны генерации, внутрирезонаторная генерация частот в нелинейных средах. В [6] для реализации двухволновой генерации в твердотельном лазере с линзоподобным активным элементом и продольной диодной накачкой использовался оригинальный метод выравнивания усилений для разных длин волн путем подбора длины резонатора в областях частотного вырождения мод.

В § 1.3. представлен обзор работ, посвященных генерации терагерцового излучения. Наряду с множеством методов генерации ТГц излучения [2], оптические методы генерации являются одними из перспективных для создания компактных источников. Путем смешения излучения двух длин волн двухволнового лазера в нелинейном кристалле генерируется разностная частота, лежащая зачастую в области ТГц. В § 1.4. приведены выводы о состоянии исследований и пути дальнейших исследований. Интерес к компактным ТГц источникам обусловлен их практической потребностью в медицине, военных лидарных системах, в физике твердого тела, наконец, для обнаружения радикалов взрывчатых веществ в системах безопасности.

В Главе 2 «Исследование генерационных характеристик в Nd:YLF лазере с пассивным затвором $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ в условиях синхронизации поперечных мод» ставиться вопрос: повлияет ли пассивный затвор в условии частотного вырождения мод на генерационные характеристики лазера. Схема эксперимента приведена на рисунке 1.

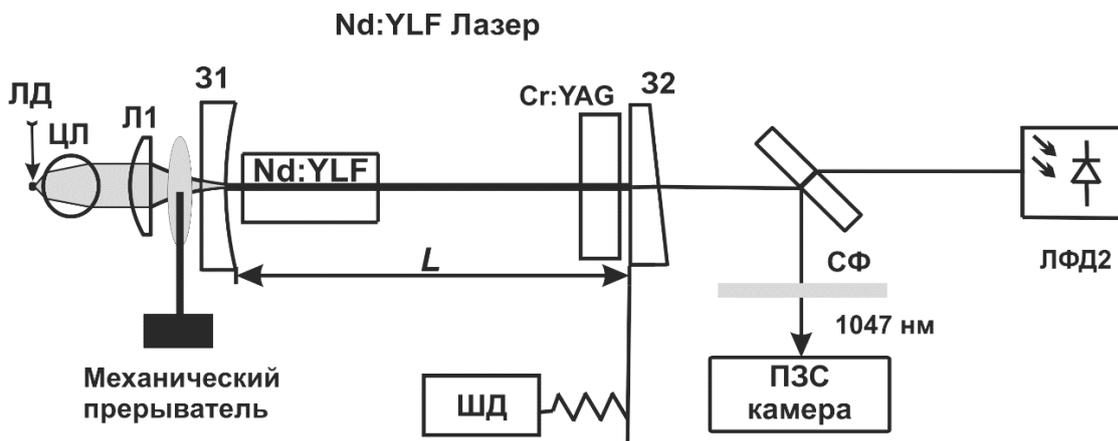


Рисунок 1 - Схема эксперимента, где слева направо лазерный диод (ЛД), цилиндрическая линза (ЦЛ), сферическая линза (Л1), зеркала резонатора (31, 32), активный элемент (Nd:YLF), пассивный затвор (Cr⁴⁺:YAG), длина резонатора (L), шаговый двигатель (ШД), светофильтр (СФ), лавинный фотодиод (ЛФД2).

Зеркало 31 с радиусом кривизны 150 мм имело дихроичное покрытие, просветлено на длине волны накачки – 806 нм и глухое на длине волны генерации - 1047 нм. Зеркало 32 - плоское с небольшим клином. Одна грань просветлена на длине волны генерации 1047 нм, а другая имела отражающее покрытие с коэффициентом отражения 96%. Для изменения параметра g_1g_2 выходное зеркало 32 и пассивный затвор Cr⁴⁺:YAG были закреплены на трансляционный столик с шаговым двигателем производства Standa, что позволяло регулировать длину резонатора L в пределах от 50 мм до 140 мм с точностью 1 мкм. В § 2.1 подробно описана схема и условия эксперимента.

В § 2.2 приведены результаты исследований генерационных характеристик Nd:YLF лазера с пассивным Cr⁴⁺:YAG затвором. Измеренные зависимости пороговой мощности накачки и длительностей импульса в зависимости от длины резонатора приведены на рисунке 2.

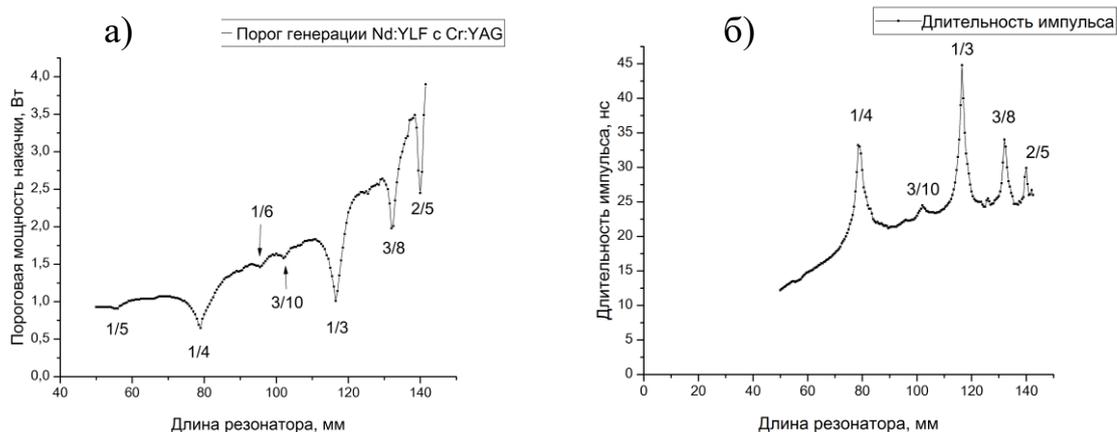


Рисунок 2 - Зависимости пороговой мощности накачки (а) и длительности импульса (б) от длины резонатора в Nd:YLF лазере с пассивным $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ затвором

Измеренные зависимости амплитуды импульса и периода следования импульсов от длины резонатора представлены на рисунке 3.

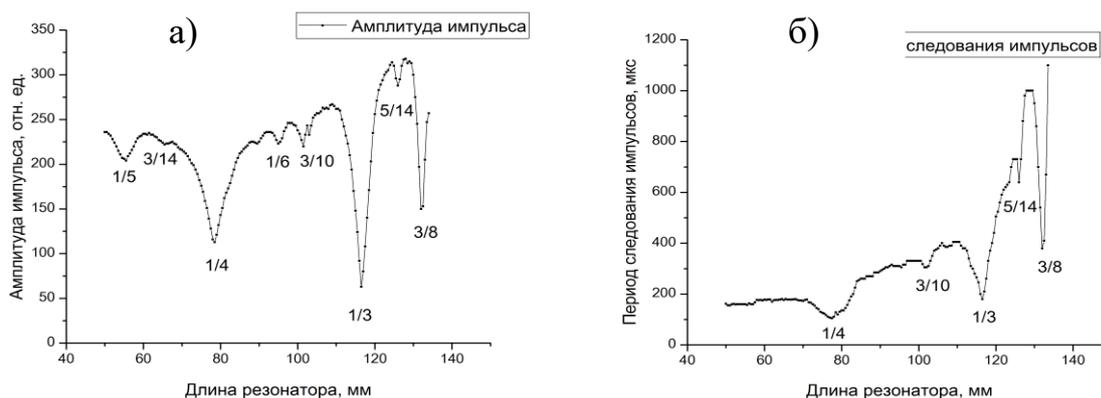


Рисунок 3 - Зависимость амплитуды импульса (а) и периода следования импульсов (б) от длины резонатора в Nd:YLF лазере с пассивным $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ затвором.

Определено, что в лазерах с модуляцией добротности пассивным $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ затвором в областях синхронизации поперечных мод падение порога генерации и одновременно резкое увеличение длительности импульса излучения, уменьшение импульсной мощности и периода следования импульсов генерации связаны с ростом усиления за проход при синхронизации поперечных мод. Эти выводы зафиксированы в § 2.3.

В Главе 3 «Двухволновая генерация вблизи частотного вырождения мод» исследован механизм двухволновой генерации в лазерах на кристалле Nd:YLF с модуляцией добротности. Основные результаты главы были опубликованы в ра-12

ботах автора [2, 4, 8, 9, 11]. В § 3.1. Схема эксперимента в основном аналогична схеме, представленной на рисунке 1. Отличия: наличие или отсутствие механического прерывателя, наличие или отсутствие затвора, тип затвора акустооптический или пассивный $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$. В § 3.2. приводятся результаты измерений зависимости порога генерации для лазеров с модуляцией добротности, как пассивным $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$, так и акустооптическим затворами.

Механизм двухволновой генерации в непрерывном режиме и в режиме модуляции добротности акустооптическим затвором представлен в работах автора [4, 8]. Измерены пороговая мощность накачки в зависимости от длины резонатора для разных поляризаций π - 1047 нм и σ - 1053 нм при установке в резонатор брюстеровского поляризатора, рисунок 4. Нужно отметить, что для длины волны 1047 нм были сняты две пороговые зависимости с механическим прерывателем и без, моделирующие наложение и снятие тепловой нагрузки.

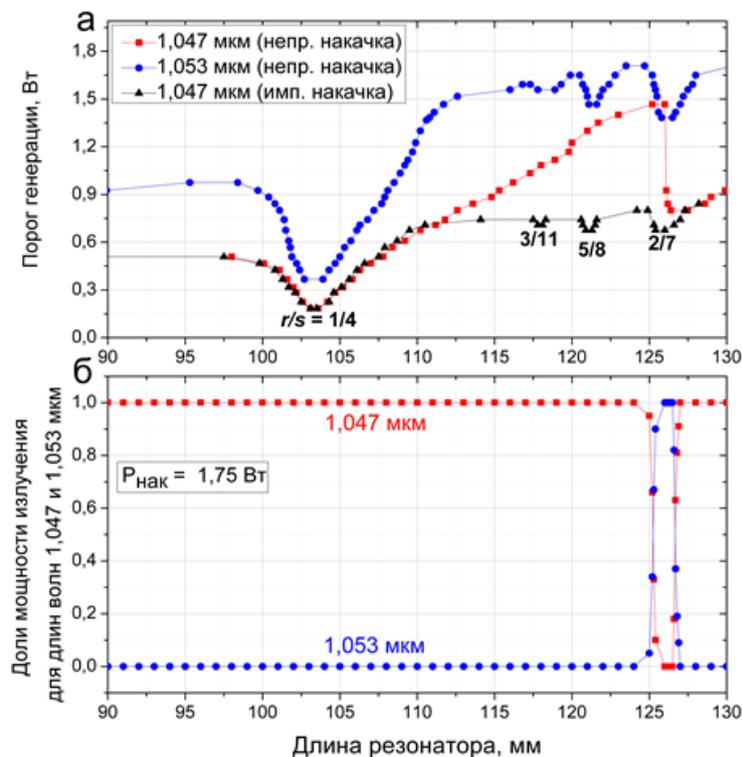


Рисунок 4 - (а) Пороговая мощность накачки для 1053 нм, 1047 нм с механически прерывателем и 1047 нм без механического прерывателя в зависимости от длины резонатора; (б) Доля мощности излучения длин волн 1047 и 1053 нм от длины резонатора. Зеркало 31 - $R=200$ мм.

При наложенной тепловой нагрузке справа от полуконфокальной конфигурации наблюдается асимметричный рост порога генерации с увеличением длины резонатора. Это свидетельствует, что положительные фазовые искаже-

ния, вызванные отрицательной термооптической линзой в кристалле Nd:YLF, приводят к такой суперпозиции поперечных мод, для которой усиление заметно падает. При снятии тепловой нагрузки асимметричный рост порога генерации справа от полуконфокальной конфигурации не наблюдается.

На рисунок 4б представлены зависимости доли мощности излучения длин волн 1047 и 1053 нм от длины резонатора. Области переключения длины волны генерации соответствуют областям пересечения порогов генерации.

Результаты численного расчета зависимости пороговой мощности накачки от длины резонатора при фазовых искажениях активной среды демонстрируют асимметрию зависимости порога от длины резонатора в области полуконфокальной конфигурации - одной из областей частотного вырождения поперечных мод. При этом, согласно расчету, фазовые искажения со знаком минус дают асимметричный рост порога слева от полуконфокальной конфигурации. Такие искажения характерны для положительной термооптики.

В Nd:YLF лазере с пассивным $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ затвором также был реализован режим двухволновой генерации. На рисунке 5 представлены зависимости пороговой мощности накачки от длины резонатора для пассивных затворов с различным начальным пропусканием. Характерные особенности пороговых зависимостей свидетельствуют о том, что и в случае использования пассивного $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ затвора в твердотельном лазере с продольной диодной накачкой в областях частотного вырождения мод резонатора наблюдается синхронизация поперечных мод. При этом справа от наиболее ярких областей частотного вырождения, характеризующихся $r/s - 1/4, 1/3$, реализуется режим двухволновой генерации. На рисунке 6 представлены измеренные экспериментально доли мощности излучения лазера на длинах волн 1047 нм и 1053 нм в зависимости от длины резонатора.

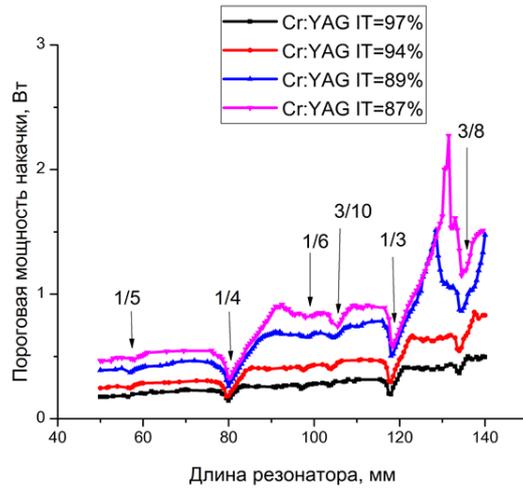


Рисунок 5 – Пороговая мощность накачки в зависимости от длины резонатора для пассивных затворов $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ с ИТ = 97%, 94%, 89% и 87% в отсутствие механического прерывателя.

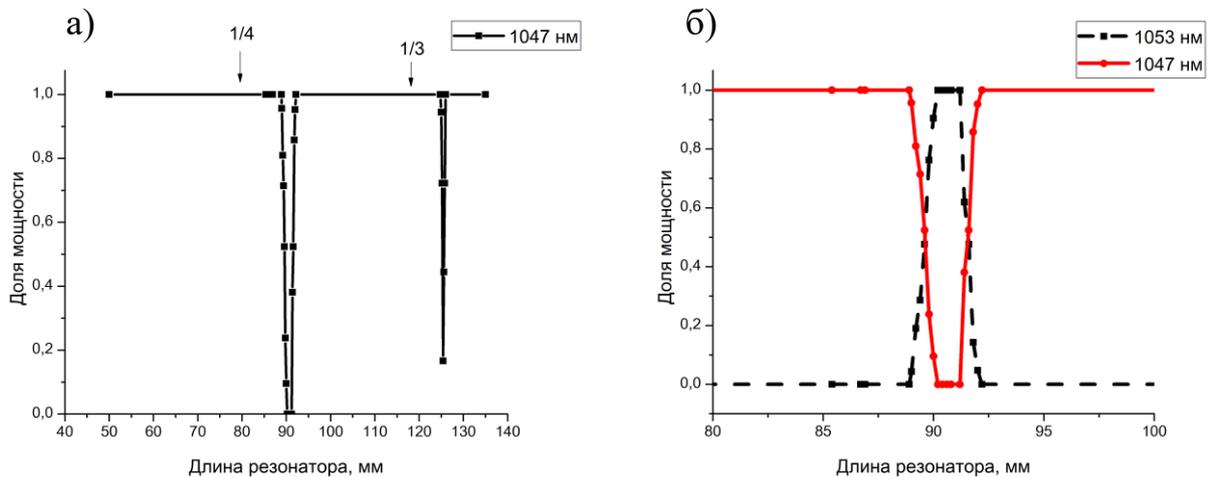


Рисунок 6 – (а) Доля мощности содержащейся в излучении лазера на длине волны 1047 нм; (б) Доля мощности содержащейся в излучении лазера на длинах волн 1047 нм и 1053 нм в зависимости от длины резонатора. $P_{\text{нак}}=2$ Вт.

Основные выводы Главы 3 представлены в § 3.3.

Был создан экспериментальный образец двухволнового лазера на кристалле $\text{Nd}:\text{YLF}$ с диодной накачкой с модуляцией добротности резонатора акустооптическим затвором. Лазер работал на длинах волн 1047 нм и 1053 нм с взаимно ортогональными поляризациями в импульсно-периодическом режиме. Длительность импульсов составила 13 нс, импульсная мощность - 8 кВт на каждой из длин волн, частота повторений - 7 кГц. Вид экспериментального образца двухволнового лазера представлен на рисунке 7.

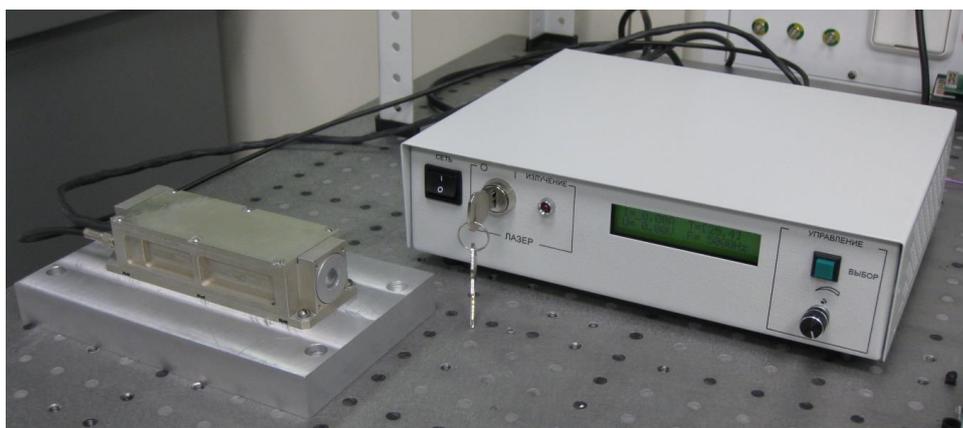


Рисунок 7 - Экспериментальный образец двухволнового твердотельного лазера с диодной накачкой на кристалле Nd:YLF с блоком питания.

В Главе 4 «Исследование вынужденного комбинационного рассеяния в лазере с продольной диодной накачкой при синхронизации поперечных мод» исследуются генерационные характеристики лазера. Основные результаты данной главы были опубликованы в работе автора [3]. В § 4.1 подробно описана схема эксперимента, представленная на рисунке 8.

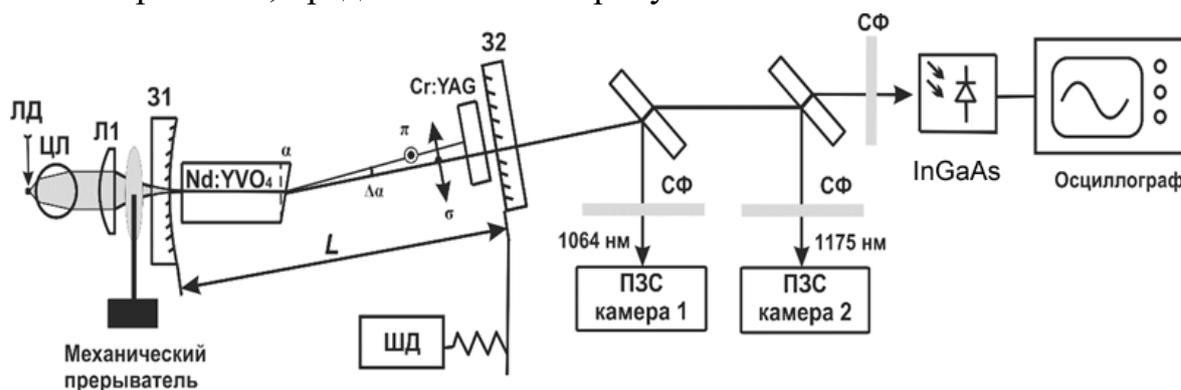


Рисунок 8 - Схема эксперимента лазера с пассивной модуляцией добротности, где слева направо лазерный диод (ЛД), цилиндрическая линза (ЦЛ), сферическая линза (Л1), входное зеркало накачки (31), активный элемент (Nd:YVO₄), пассивный затвор (Cr⁴⁺:YAG), выходное зеркало резонатора (32), светофильтры (СФ), длина резонатора (L), шаговый двигатель (ШД), фотодиод (InGaAs), Осциллограф (Tektronix MDO4104-3).

Для возможности получения генерации на π и σ поляризации, на активном элементе одна грань закошена на небольшой угол α . Вследствие двулучепреломления π и σ поляризации выходят из кристалла под разными углами, что позволяет простым поворотом выходного зеркала на небольшой угол $\Delta\alpha$ получить ге-

нерацию на необходимой поляризации. Данная оригинальная схема генерации была использована в работе [9].

В § 4.2 приведены исследования зависимости порога генерации Nd:YVO₄ лазера с пассивным Cr⁴⁺:YAG затвором на основной - 1053 нм и стоксовой 1175 нм компонентах излучения от длины резонатора в условии частотного вырождения мод резонатора. Было обнаружено при длине резонатора $L = 80$ мм, что соответствует полуконфокальной конфигурации, происходит падение порога генерации, кроме того пространственная структура излучения имеет кольцевую структуру, как для основной 1053 нм, так и для стоксовой 1175 нм компонент излучения, которые представлены на рисунке 9.

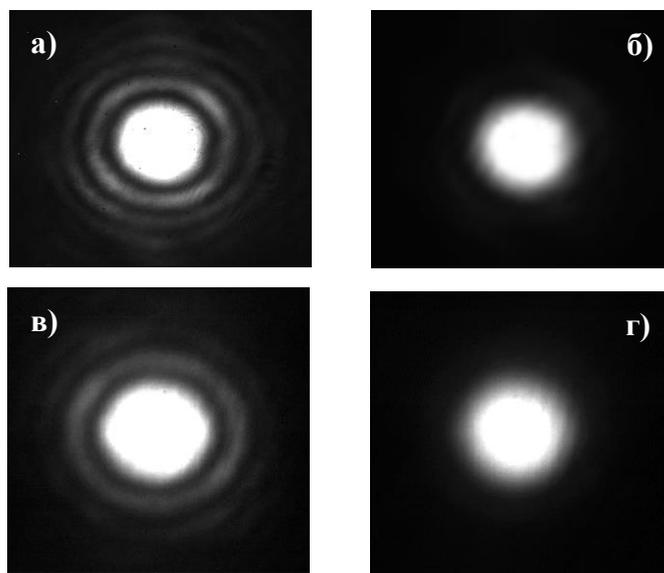


Рисунок 9 - Пространственная структура излучения генерации на длинах волн 1064 нм (а, б) и 1175 нм (в, г) при $L = 80$ мм (а, в) и $L = 84$ мм (б, г).

Также были измерены формы импульсов излучения основной и стоксовой компонент, представленные на рисунке 10. Как можно заметить из представленных ниже рисунков, в лазере на кристалле Nd:YVO₄ с продольной диодной накачкой и модуляцией добротности резонатора пассивным Cr⁴⁺:YAG затвором в областях синхронизации поперечных мод наблюдается синхронизация одновременно продольных и поперечных мод основной и стоксовой компонент излучения.

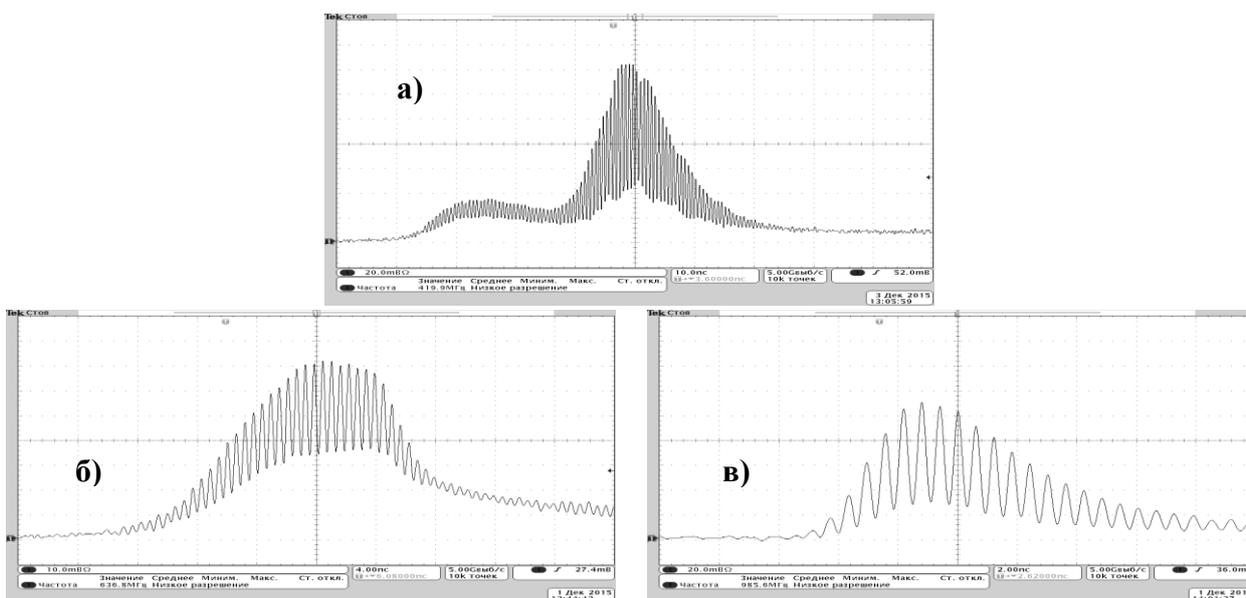


Рисунок 10 - (а) Осциллограмма импульсов 1064 нм и 1175 нм; (б) Осциллограмма импульса 1064; (в) Осциллограмма импульса 1175 нм;

Синхронизация поперечных мод стоксовой компоненты излучения в лазере на кристалле Nd:YVO_4 с продольной диодной накачкой и модуляцией добротности резонатора пассивным затвором наблюдалась впервые.

Данные выводы к четвертой главе представлены в § 4.3.

В Главе 5 «Генерация разностной частоты двухволнового лазера в нелинейном кристалле» представлен способ генерации ТГц излучения путем генерации разностной частоты двухволнового лазера в нелинейном кристалле. Основные результаты данной главы были опубликованы в работах автора [1, 4-7, 10, 12, 13].

В § 5.1. Представлен краткий обзор доступных и широко используемых нелинейных кристаллов прозрачных в области ТГц. Был выбран кристалл GaSe , который имеет большую нелинейность, малое поглощение в ТГц диапазоне, возможность обеспечить фазовый синхронизм на нужной частоте терагерцевого излучения в широком диапазоне спектра. Причем возможна реализация синхронизма 2-го типа, что подходит нам по условиям генерации разностной частоты двухволнового лазера на Nd:YLF , т.к. излучение 1047 нм и 1053 нм имеют ортогональную поляризацию. В § 5.2 описана схема эксперимента, представленная на рисунке 11.

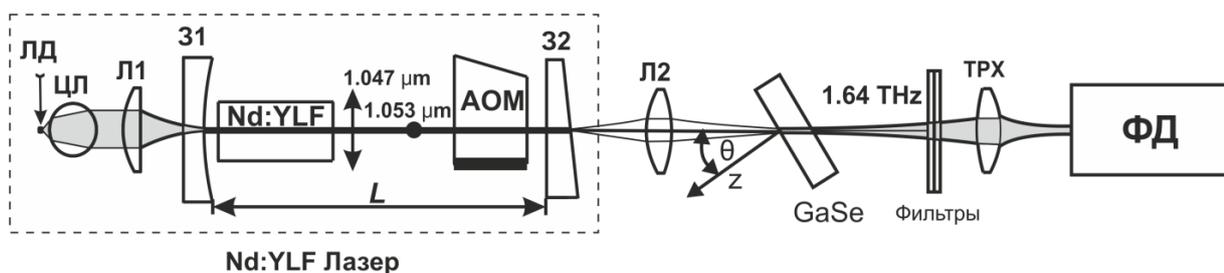


Рисунок 11 – Схема эксперимента генерации терагерцового излучения, где слева направо лазерный диод (ЛД), цилиндрическая линза (ЦЛ), сферическая линза (Л1), входное зеркало накачки (31), активный элемент (Nd:YLF), длина резонатора (L), акустооптический затвор (АОЗ), выходное зеркало резонатора (32), фокусирующая линза лазерного излучения (Л2), нелинейный кристалл (GaSe), терагерцовая линза (ТРХ), ТГц детектор НЕВ- болометр или ячейка Голея (ФД).

В § 5.3. исследуются характеристики терагерцового излучения. Угловой синхронизм GaSe кристалла, степень поляризации ТГц излучения.

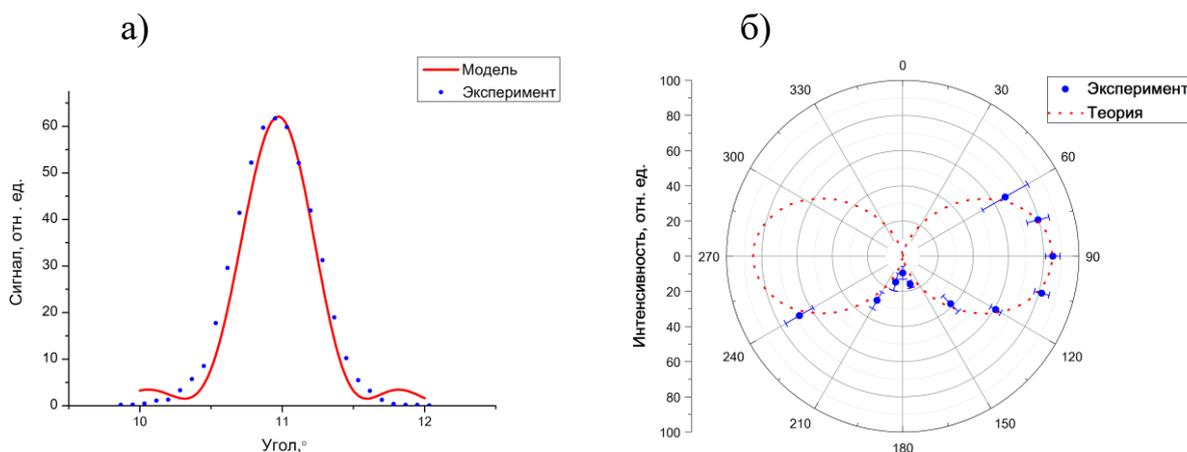


Рисунок 12 – (а) Угловой синхронизм кристалла GaSe толщиной 5 мм. Расчет – сплошная линия, эксперимент – точки; (б) Интенсивность ТГц излучения в зависимости от поворота поляризатора.

Были измерены: угловой синхронизм кристалла GaSe - 10.9 градусов и полуширина углового синхронизма – 0.6 градусов, степень поляризации терагерцового излучения - 1:100.

При частоте модуляции АОЗ 7 кГц с помощью сверхпроводящего НЕВ- болометрического приемника [3], охлаждаемого до температуры жидкого гелия, и осциллографа с полосой 200 МГц зафиксированы временные характеристики импульсов ТГц излучения, которые представлены на рисунке 13.

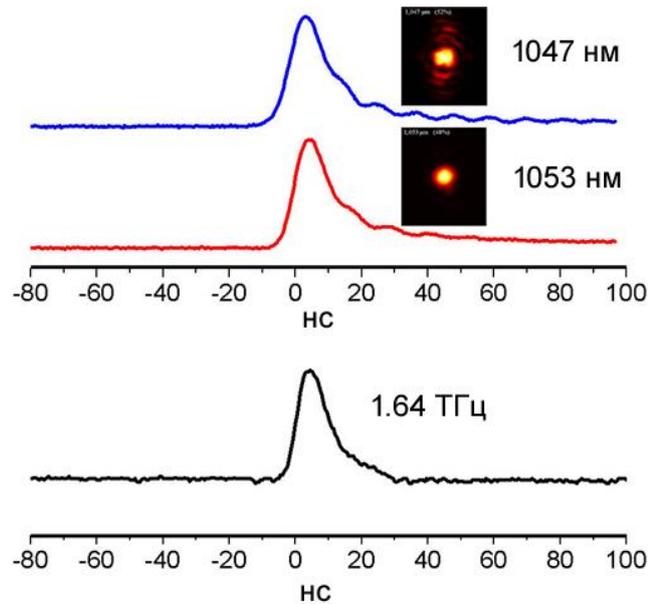


Рисунок 13 - Временная развертка импульсов двухволнового лазера и ТГц излучения. Частота повторения импульсов составила 7 кГц.

Спектральный состав генерируемого ТГц излучения регистрировался с помощью автоматизированного терагерцового Фурье-спектрометра [1], который представлен на рисунке 14.

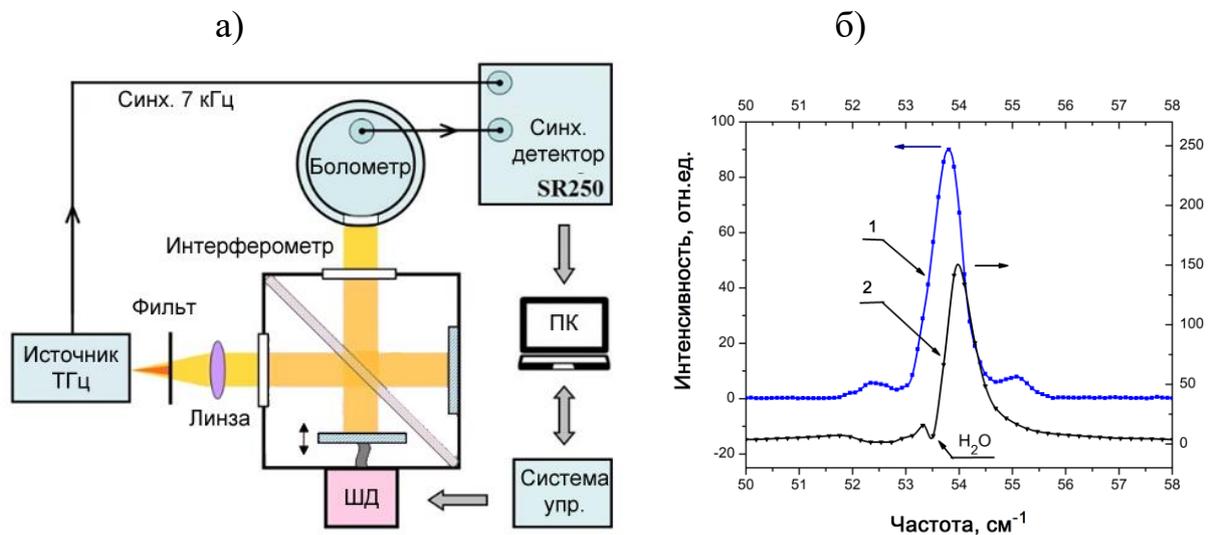


Рисунок 14 – (а) Схема ТГц Фурье спектрометр; (б) спектр ТГц излучения; спектр (1) измерен в случае откаченного интерферометра с давлением 1 Торр; спектр (2) - нормальное давление воздуха в интерферометре. Отличие между 1 и 2 связано с поглощением паров воды

Эффективность преобразования оптического излучения в ТГц составила - 10^{-7} , импульсная мощность ТГц излучения - 0.8 мВт, частота и ширина спектра

ТГц излучения ($53,8 \text{ см}^{-1}$, $0,6 \text{ см}^{-1}$). По итогам работы был создан экспериментальный образец источника когерентного излучения, представленного на рисунке 15, с импульсной мощностью 0.8 мВт, с длительностью импульсов 10 нс и частоте повторений 7 кГц

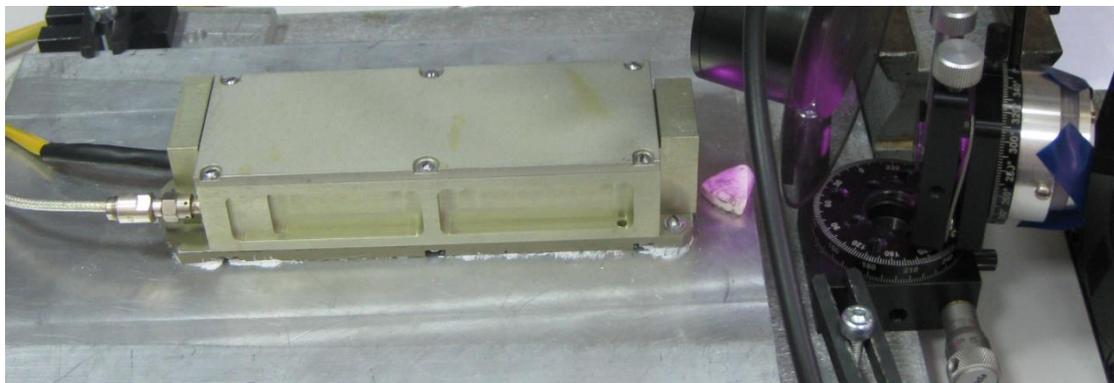


Рисунок 15 - Макет компактного когерентного терагерцового источника излучения.

В § 5.4. представлены выводы к главе 5.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В твердотельных лазерах с продольной диодной накачкой с модуляцией добротности резонатора пассивным $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ затвором в областях синхронизации поперечных мод падение порога генерации и одновременно резкое увеличение длительности импульса излучения, уменьшение импульсной мощности и периода следования импульсов генерации обусловлены увеличением усиления за проход при синхронизации поперечных мод.

Механизм двухволновой генерации в $\text{Nd}:\text{YLF}$ -лазерах с продольной диодной накачкой в режиме модуляции добротности как акустооптическим, так и пассивным $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ затворами обусловлен выравниванием усиления на длинах волны 1047 нм и 1053 нм при выборе длины резонатора в области, где фазовые искажения активной среды, вызванные термооптикой, приводят к падению усиления (росту порога генерации) на длине волны 1047 нм.

В лазере на кристалле $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ с продольной диодной накачкой и модуляцией добротности резонатора пассивным $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ затвором, в областях синхронизации поперечных мод наблюдается синхронизация одновременно продольных и поперечных мод основной и стоксовой компонент излучения.

Впервые, в твердотельном лазере на кристалле Nd:YVO_4 с продольной накачкой и модуляцией добротности резонатора пассивным $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ затвором с ВКР самопреобразованием частоты в условиях вырождения мод резонатора наблюдалась синхронизация поперечных мод стоксовой компоненты излучения.

Создан экспериментальный образец источника когерентного ТГц излучения с частотой $53,8 \text{ см}^{-1}$ и полушириной спектра $0,6 \text{ см}^{-1}$, с импульсной мощностью до $0,8 \text{ мВт}$, с длительностью импульсов 10 нс и частотой повторений 7 кГц . Были измерены угловой синхронизм кристалла GaSe - $10,9$ градусов, ширина $0,6$ градусов, степень поляризации - $1:100$, эффективность преобразования - 10^{-7} .

Нужно отметить, что в качестве источника накачки был использован мощный инжекционный лазер с улучшенными характеристиками на основе полупроводниковой наногетероструктуре, разработанный в НИЯУ МИФИ при поддержке Минобрнауки РФ, соглашение № 14.575.21.0047. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57514X0047.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Ведущие научные журналы, входящие в международную систему цитирования Web of Science:

1. Angeluts A.A., Bezotosnyi V.V., Cheshev E.A., Goltsman G.N., Finkel M.I., Seliverstov S.V., Evdokimov M.N., Gorbunkov M.V., Kitaeva G.Kh., Koromyslov A.L., Kostryukov P.V., Krivonos M.S., Lobanov Yu.V., Shkurinov A.P., Sarkisov S.Yu., Tunkin V.G. Compact 1.64 THz source based on a dual-wavelength diode endpumped Nd:YLF laser with a nearly semiconfocal cavity // *Laser Physics Letters*. – 2014. - V. 11. - № 1. – P. 4.
2. Bezotosnyi V. V., Cheshev E. A., Gorbunkov M. V., Koromyslov A. L., Kostryukov P. V., Krivonos M. S., Popov Yu. M. and Tunkin V. G. Behavior of threshold pump power of diode end-pumped solid-state lasers in critical cavity configurations // *Laser Physics Letters*. – 2015. - V. 12. - № 2. – P. 6.
3. Безотосный В.В., Горбунков М.В., Дашкевич В.И., Коромыслов А.Л., Орлович В.А., Попов Ю.М., Тункин В.Г., Чешев Е.А., Чулков Р.В. Синхронизация поперечных мод стоксовой компоненты излучения Nd:YVO_4 лазера с продольной диодной накачкой в режиме модулированной добротности

пассивным затвором Cr⁴⁺:YAG // Краткие сообщения по физике. – 2016. - Т. 43. - № 6. - С. 203-206.

Прочие научные журналы, сборники трудов, тезисы докладов:

4. Bezotosnyi V.V., Cheshev E.A., Gorbunkov M.V., Koromyuslov A.L., Krokhin O.N., Mityagin Yu.A., Popov Yu.M., Savinov S.A., Tunkin V.G. Coherent THz Repetitive Pulse Generation in a GaSe Crystal by Dual-wavelength Nd:YLF Laser // Physics Procedia. – 2015. –V. 72. – P. 405–410.
5. Ангелуц А.А., Безотосный В.В., Горбунков М.В., Евдокимов М.Г., Китаева Г.Х., Коромыслов А.Л., Кривонос М.С., Саркисов С.Ю., Тункин В.Г., Чешев Е.А., Шкуринов А.П. Генерация излучения 1,63 ТГц при использовании Nd:YLF двухчастотного лазера с диодной накачкой // XIV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики»: сб. тр., М.: ФИАН. – 2012. – С. 121-122.
6. Ангелуц А.А., Евдокимов М.Г., Тункин В.Г., Шкуринов А.П., Китаева Г.Х., Саркисов С.Ю., Безотосный В.В., Горбунков М.В., Коромыслов А.Л., Кривонос М.С., Чешев Е.А. Генерация разностной частоты 1,63 ТГц излучения двухчастотного Nd:YLF лазера в кристалле GaSe //3-й симпозиум «Полупроводниковые лазеры: физика и технология»: сб. тр., / С.-П.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе. - 2012. - С. 33.
7. Ангелуц А.А., Безотосный В.В., Горбунков М.В., Евдокимов М.Г., Китаева Г.Х., Коромыслов А.Л., Кривонос М.С., Саркисов С.Ю., Тункин В.Г., Чешев Е.А., Шкуринов А.П. Использование Nd:YLF двухчастотного лазера с продольной диодной накачкой для генерации излучения 1,64 ТГц // VIII Международная конференция молодых ученых и специалистов «ОПТИКА–2013»: сб. тр. / С.-П.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе. – 2013. - С. 269-271.
8. Безотосный В.В., Горбунков М.В., Коромыслов А.Л., Кострюков П.В., Кривонос М.С., Попов Ю.М., Тункин В.Г., Чешев Е.А. Двухволновой Nd:YLF-лазер с продольной диодной накачкой и акустооптической модуляцией добротности //IV симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур: сб. тр. / М.: ФИАН. – 2014. - С. 105-107.
9. Безотосный В.В. , Горбунков М.В., Коромыслов А.Л., Кострюков П.В., Кривонос М.С., Попов Ю.М., Тункин В.Г., Чешев Е.А. Пороги генерации

- при синхронизации поперечных мод в лазерах на Nd-активированных кристаллах, керамике и стеклах при продольной диодной накачке //IV симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур: сб. тр. / М.:ФИАН. – 2014. - С. 173-178.
10. Коромыслов А.Л., Олещенко В.А., Савинов С.А. Генерация когерентного терагерцового излучения наносекундной длительности // XV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики»: сб. тр. / М.: ФИАН. – 2014. - С. 142-143.
 11. Безотосный В.В., Горбунков М.В., Дашкевич В.И., Коромыслов А.Л., Кострюков П.В., Попов Ю.М., Чешев Е.А., Тункин В.Г. Особенности режима синхронизации поперечных мод в твердотельных лазерах с продольной диодной накачкой при модуляции добротности резонатора // 4-й Всероссийский симпозиум с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология»: сб. тр. / С.-П.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе – 2014.
 12. Безотосный В.В., Горбунков М.В., Коромыслов А.Л., Крохин О.Н., Тункин В.Г., Чешев Е.А. Генерация когерентного импульсно-периодического излучения терагерцового диапазона спектра // «Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015: сб. тр. / М.: НИЯУ МИФИ. – 2015. - Т.2. - С. 132.
 13. Безотосный В.В., Горбунков М.В., Коромыслов А.Л., Кривонос М.С., Митягин Ю.А., Савинов С.А., Тункин В.Г., Чешев Е.А. Генерация терагерцового излучения в нелинейном кристалле GaSe с помощью Nd:YLF двухволнового лазера // Импульсная Сильноточная и Полупроводниковая Электроника - 2015” / М.: ФИАН. – 2015. - С. 118.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gorbatshevich A.A., Egorkin, V.I., Kazakov, I.P., Klimenko, O.A., Klokov, A.Yu., Mityagin, Yu.A., Murzin, V.N., Savinov, S.A., Tsvetkov, V.A. The dynamic characteristics of "low-temperature" gallium arsenide for terahertz-range generators and detectors // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2015. – V.42. - №5. - P. 121-126.
2. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology / New-York: Springer, 2009. – P. 340.
3. Shurakov A., Seliverstov S., Kaurova N., Finkel M., Voronov B. and Goltsman G. Input Bandwidth of Hot Electron Bolometer With Spiral Antenna // IEEE

Transactions on terahertz science and technology. – 2012. - V. 2. - №. 4. – P. 400-405.

4. Wu H.-H., Sheu C.-C., Chen T.-W., Wei M.-D., Hsieh W.-F. Observation power drop and low threshold due to beam waist shrinkage around critical configurations in an diode-pumped Nd:YVO₄ laser // Optics Communications. - 1999. - V. 165. - P. 225–229.
5. Ананьев Ю.А. О многопроходных, «V-образных» и прочих модах оптических резонаторов // Оптика и спектроскопия. - 1988. - Т. 64. - № 3. - С. 650–652.
6. Безотосный В.В., Горбунков М.В., Кострюков П.В., Кривонос М.С., Попов Ю.М., Тункин В.Г., Чешев Е.А. Двухволновая генерация в Nd:YLF-лазере с линзоподобным активным элементом и продольной диодной накачкой // Краткие сообщения по физике. – 2011 Т. 10. – С. 43 -51.
7. Безотосный В.В., Горбунков М.В., Кострюков П.В., Кривонос М.С., Попов Ю.М., Тункин В.Г., Чешев Е.А. Порог генерации лазеров на Nd-активированных кристаллах, керамике и стеклах при пространственно неоднородной диодной накачке // Краткие сообщения по физике. – 2013. - Т. 10. - № 3. -С. 3-12.
8. Горбунков М.В., Кострюков П.В., Телегин Л.С., Тункин В.Г., Яковлев Д.В. Особенности структуры основной моды лазеров с устойчивыми резонаторами при пространственно неоднородном усилении // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 2. С. 173–180.
9. Сироткин А.А., Власов В.И., Загуменный А.И., Заварцев Ю.Д., Кутовой С.А. Лазеры на кристаллах ванадатов с σ -поляризацией генерируемого излучения // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41. - № 7. – С. 584–589.