

На правах рукописи



Грибанов Алексей Валерьевич

**НОВЫЙ МЕТОД МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ РЕЗОНАТОРА С
ОДНОВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД В ДИОДНО-
НАКАЧИВАЕМОМ Nd:YAG-ЛАЗЕРЕ**

01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения
Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Донин Валерий Ильич

Официальные оппоненты: Прокопьев Владимир Егорович
профессор, доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт сильноточной
электроники Сибирского отделения Российской
академии наук, старший научный сотрудник.

Скворцов Михаил Николаевич
доктор физико-математических наук, Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
Институт лазерной физики Сибирского отделения
Российской академии наук, главный научный
сотрудник, руководитель научно-
исследовательской группы лазерной
спектроскопии.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
государственный университет».

Защита состоится «12» октября 2017 г. в 10-00 часов на заседании
диссертационного совета Д 003.005.01 при Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии
Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090,
Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д.ф. – м.н.



Ильичев Л.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Получение высокой пиковой мощности видимого излучения от твердотельного лазера с непрерывной диодной накачкой является актуальной задачей для целого ряда областей научного и прикладного характера – точная абляционная обработка материалов, получение экстремально короткого УФ излучения на многозарядных ионах и на этой основе экстремально коротких импульсов, нелинейная оптика, спектроскопия комбинационного рассеяния, медицина и т.д. Метод модуляции добротности резонатора лазера (Q-switch) позволяет увеличивать пиковую мощность лазера приблизительно в τ_{sp} / τ_c раз (где τ_{sp} – время жизни верхнего рабочего уровня, τ_c – время жизни фотона в резонаторе). Для типичного Nd:YAG-лазера это увеличение составляет 10^3 - 10^4 раз. Дальнейшее увеличение пиковой мощности можно осуществлять методами синхронизации мод лазера (ML). Однако осуществление синхронизации мод при Q-модуляции, в отличие от непрерывного режима, представляет более трудную задачу вследствие высокого усиления, трудно контролируемых нелинейных эффектов, разрушения оптических элементов лазера и т. д. Обычно устойчивый режим генерации с Q-switch и синхронизацией мод (QML) реализуется с помощью двух акустооптических модуляторов (АОМ) в резонаторе, один из которых работает в режиме бегущей акустической волны, а другой – в режиме стоячей (см., напр., [1]). Режим QML может быть получен и на основе поглощающих элементов в резонаторе [2-6], однако в этом случае частота следования импульсов увеличивается с ростом накачки, а достигаемые пиковые мощности оказываются крайне низкими. Для улучшения указанных характеристик лазера иногда используется комбинация АОМа с поглощающими элементами.

Ультракороткие импульсы (УКИ) применяются для исследования быстропротекающих процессов. Обычные электронные средства прямой регистрации не могут обеспечить достаточно быстрого отклика в случае, если исследования требуют временного разрешения в пико- и фемтосекундном

диапазоне. Для этих задач развиваются другие методы измерений, например, методика “pump-probe” или “накачка-зондирование” (см., напр., [7, 8]). Различные вариации этой технологии могут быть использованы для наблюдения множества процессов в различных материалах. Например, при помощи фемтосекундных импульсов можно вызывать быстрый разогрев электронов и изучать процессы, отвечающие за перенос энергии электронов в веществе. Также методика накачки-зондирования применима для исследования быстропротекающих процессов в химии и биологии, например, для изучения динамики белков, внутриклеточных процессов, фотоиндуцированной деградации ДНК и др.

Благодаря высокой мощности и интенсивности излучения в виде УКИ значительно повышается эффективность нелинейных преобразований, позволяя получать излучение на других длинах волн. В частности, пикосекундные импульсы лазера могут быть эффективно преобразованы в ультрафиолетовую область спектра. Короткие, обладающие высокой энергией импульсы лазерного излучения ультрафиолетового диапазона полезны для многих практических применений, например, изготовления солнечных элементов, плоских дисплеев, устройств для трехмерного хранения информации, высокоточной обработки различных материалов, производства фотошаблонов и для дистанционного зондирования. Кроме того, с помощью параметрических генераторов света излучение можно преобразовать в ИК диапазон, что значительно расширяет применение УКИ для дистанционного зондирования атмосферы.

УКИ могут использоваться для реструктуризации металлических или диэлектрических поверхностей [9-12]. В зависимости от плотности энергии излучения на поверхности могут быть сформированы различные рельефы.

С каждым годом расширяется применение лазеров в биомедицинских целях. В данной области применение ультракоротких лазерных импульсов позволяет получить ряд преимуществ не только по сравнению с классическими хирургическими методами, но и по сравнению с длинноимпульсными лазерами. В частности, лазеры УКИ могут эффективно применяться для внутриглазной

хирургии (см., напр., [13, 14]). В операциях на роговице используется лазерный оптический пробой, который возникает при плотностях мощности импульса, соответствующих порогу образования плазмы. С оптическим пробоем связаны такие физические эффекты, как формирование плазмы и генерация ударной волны, кроме того может возникать кавитация. Ударные волны и кавитация в большинстве случаев являются нежелательными эффектами, т. к. они вызывают повреждение окружающих тканей. Поскольку для возникновения ударных волн и кавитации необходимы более высокие значения плотности энергии по сравнению с генерацией плазмы, использование пико- и фемтосекундных импульсов может снизить разрушительное воздействие благодаря созданию высокой пиковой интенсивности при относительно низкой энергии импульса.

Целью настоящей диссертационной работы являлась экспериментальная проверка нового метода, позволяющего при помощи одного акустооптического модулятора (АОМ) бегущей ультразвуковой волны в сочетании со сферическим зеркалом (СЗ) резонатора получать модуляцию добротности резонатора с одновременной синхронизацией мод в твердотельных лазерах (метод СЗАОМ) и проведение детальных исследований основных особенностей и характеристик излучения диодно-накачиваемого Nd: YAG-лазера с СЗАОМ.

Основные задачи работы.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Запуск диодно-накачиваемого Nd: YAG-лазера с реализацией метода СЗАОМ и получение одновременно модуляции добротности резонатора и синхронизации мод, а также измерение характеристик выходного излучения этого лазера.
2. Расчет и настройка резонатора Nd: YAG-лазера с учетом формирования в резонаторе керровской линзы для сокращения длительности генерируемых импульсов. Измерение характеристик выходного излучения лазера с образованием керровской линзы в резонаторе.

3. Проведение прямых измерений длительности импульса с помощью стрик-камеры Агат-СФЗМ в диодно-накачиваемом Nd:YAG-лазере с модуляцией добротности и синхронизацией мод по методу СЗАОМ.

Научная новизна работы:

1. На примере диодно-накачиваемого Nd:YAG-лазера произведено исследование нового метода СЗАОМ, который при помощи одного АОМа с бегущей звуковой волной позволяет одновременно осуществлять модуляцию добротности резонатора и синхронизацию мод излучения.
2. Прямые измерения длительности импульса диодно-накачиваемого Nd:YAG-лазера, в котором модуляция добротности и синхронизация мод осуществлена методом СЗАОМ, показали немоноимпульсность пикосекундных импульсов (появление дополнительных импульсов на аксиальном периоде). Число таких импульсов увеличивается с отстройкой частоты межмодовых биений продольных мод от удвоенной частоты бегущей звуковой волны модулятора. При этом длительность отдельных импульсов остается постоянной (~ 45 пс); при точной настройке длины резонатора наблюдается практически моноимпульсный режим.
3. Экспериментально показано, что в диодно-накачиваемом Nd:YAG-лазере с синхронизацией мод методом СЗАОМ в случае непрерывной синхронизации мод (т. е. при непрерывной подаче звукового сигнала на АОМ) и точной настройке длины резонатора или частоты межмодовых биений продольных мод на удвоенную частоту бегущей звуковой волны модулятора "самопроизвольно" возникает режим QML, при котором частота следования цуга импульсов задается частотой релаксационных колебаний лазерного поля, а внутри цуга содержатся одиночные пикосекундные импульсы (режим "авто- QML").

Практическая значимость работы: В диссертационной работе создана оригинальная конструкция Nd:YAG-лазера, которая обеспечивает компактность, простоту и сравнительно низкую цену изготовления устройства. Предлагаемый лазер позволяет при средних выходных мощностях около $1 \div 2$ Вт и частотах повторения Q-switch импульсов $1 \div 2$ кГц получать пиковые мощности ~ 50 МВт и обладает высокой кратковременной и долговременной стабильностью выходных характеристик без использования каких-либо схем автоподстройки.

Положения, выдвигаемые на защиту

1. Разработанный метод СЗАОМ при помощи одного АОМа бегущей звуковой волны в сочетании со сферическим зеркалом резонатора позволяет одновременно осуществлять модуляцию добротности резонатора и синхронизацию мод.
2. Структура пикосекундных импульсов выходного излучения диодно-накачиваемого Nd:YAG-лазера, в котором модуляция добротности и синхронизация мод осуществлена методом СЗАОМ, при точной настройке длины резонатора (частоты межмодовых биений продольных мод) на удвоенную частоту бегущей звуковой волны модулятора зависит от джиттера (дрожания) рабочей частоты модулятора.
3. Отстройка длины резонатора от оптимальной приводит к уменьшению количества моноимпульсов в статистике выходного излучения лазера, при этом длительность моноимпульсов (~ 45 пс) существенно не меняется. При увеличении отстройки > 3 мм моноимпульсов не наблюдается – каждый импульс превращается в цуг длительностью ~ 2 нс, содержащий в себе до 20 отдельных импульсов.
4. В диодно-накачиваемом Nd:YAG-лазере, непрерывная синхронизация мод в котором осуществляется методом СЗАОМ, за счет релаксационных колебаний лазерного поля генерация происходит в

режиме авто-QML, стабильность которого максимальна при точной настройке длины резонатора.

Личный вклад автора. Основные результаты, изложенные в работе, получены при личном участии автора. Он принимал активное участие в планировании и проведении экспериментов в обсуждении полученных результатов и подготовке статей.

Апробация работы и публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, включая материалы конференций. Список публикаций (приведен в конце автореферата) включает 1 главу в монографии, 1 патент, 1 заявку на патент и 5 статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений, списка цитируемой литературы из 142 наименований. Общий объем диссертации составляет 105 страниц, включая 1 таблицу и 51 рисунок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации материалов диссертации.

Первая глава представляет собой обзор литературы, в ней рассмотрены методы получения высоких пиковых мощностей излучения – модуляция добротности резонатора и синхронизация мод лазера.

Раздел 1.1 данной главы посвящен методу модуляции добротности резонатора. В нем рассмотрен важный класс современных лазерных систем с

применением этого метода – микрочиповые лазеры. Приведены основные характеристики современных микрочиповых лазеров и указаны их недостатки.

В разделе 1.2 рассмотрена синхронизация мод в твердотельных лазерах. Дается сравнение активной и пассивной синхронизации мод, приводятся основные достоинства и недостатки этих методов. Кроме того, рассмотрены различные виды пассивной синхронизации мод, такие как colliding pulse mode locking, синхронизация мод при помощи нелинейного зеркала, при помощи каскадной нелинейности второго порядка, при помощи насыщающихся поглотителей, синхронизация мод керровской линзой, интерференционная синхронизация мод и др. Также рассмотрена активная синхронизация мод. В каждом случае приводятся литературные данные по таким твердотельным лазерам, как Nd:YAG, $Ti^{3+}:Al_2O_3$ и др.

В разделе 1.3 рассмотрен режим QML, приведены примеры реализации данного режима активными и пассивными методами. Раздел 1.4 посвящен краткому описанию результатов экспериментов по изучению структуры импульсов в различных типах лазеров с синхронизацией мод.

Вторая глава состоит из четырех разделов и посвящена описанию экспериментальной установки и нового метода реализации одновременно модуляции добротности резонатора и синхронизации мод с помощью одного акустооптического модулятора бегущей волны. В разделе 2.1 подробно описана схема Nd:YAG-лазера с Z-образным четырехзеркальным резонатором, поперечной накачкой и эффективным удвоением частоты, на базе которой производились эксперименты.

В разделе 2.2 представлен принцип работы предлагаемого нового метода реализации режима QML, конструктивно состоящего из сферического зеркала резонатора (СЗ) и АОМ бегущей волны (СЗАОМ). Для обеспечения режима QML модулятор располагается под углом Брэгга (θ_B) к оптической оси резонатора рядом с концевым сферическим зеркалом З1 так, чтобы оптическая длина пути между центром модулятора и отражающей поверхностью зеркала

была равна радиусу кривизны (R_1) этого зеркала (см. рис. 1). При подаче рабочей частоты $f = 50$ МГц, равной половине межмодового интервала лазера, $c/2L = 2f$, на пьезопреобразователь АОМа в кварцевом светозвукопроводе образуется бегущая звуковая волна, на которой происходит брэгговская дифракция лазерного излучения. При прохождении светового луча 1 (с частотой ν_0) через АОМ справа налево на зеркало падает два луча (лучи 2 и 3). Луч 2 (с частотой ν_0) проходит по оси резонатора, отражается от зеркала и возвращается в АОМ, где распадается на лучи 4 и 5 с частотами ν_0 и $\nu_0 - f$ соответственно. Луч 4 распространяется в обратном направлении по оси резонатора, луч 5 выходит из резонатора в обратном направлении под углом $2\theta_B$. Луч 3, испытывающий брэгговскую дифракцию, падает на зеркало с частотой $\nu_0 + f$ и, отражаясь от сферической поверхности зеркала, попадает обратно в АОМ, где распадается на луч 6 без изменения частоты $\nu_0 + f$, выходящий из резонатора в обратном направлении под углом $2\theta_B$, и на луч 7 после повторной дифракции в светозвукопроводе модулятора. Последний луч с частотой $(\nu_0 + 2f)$ распространяется в обратном направлении по оси резонатора. За счет этого луча и достигается эффект синхронизации мод. Выходящие под углом $2\theta_B$ из резонатора лучи 5 и 6 с частотами $\nu_0 - f$ и $\nu_0 + f$ обеспечивают модулирующие добротность резонатора потери, и лазер работает в режиме модуляции добротности с частотой следования импульсов, задаваемой частотой переключения модулятора ($\sim 1 \div 100$ кГц). Кроме того, в результате интерференции лучей 5 и 6 их суммарная интенсивность будет промодулирована с частотой $2f$. Следовательно, вносимые этими лучами потери можно рассматривать, как модулирующие потери, также обеспечивающие синхронизацию мод лазера. При этом после отключения рабочей частоты звуковая волна в светозвукопроводе АОМа отключается за время $t = d_c/V_{зв} = 0,2\text{см}/5 \cdot 10^5 \text{см/с} \approx 0,4$ мкс (где d_c – диаметр лазерного луча в светозвукопроводе, $V_{зв}$ – скорость звука). Длительность импульса генерации лазера в режиме Q-switch составляет ~ 100 нс, т. е. в течении t за счет луча повторной дифракции с частотой $(\nu_0 + 2f)$ в импульсе генерации одновременно

происходит синхронизация мод. Таким образом, выходное излучение лазера принимает вид цуга импульсов (см. рис. 2), следующего с частотой Q-switch.

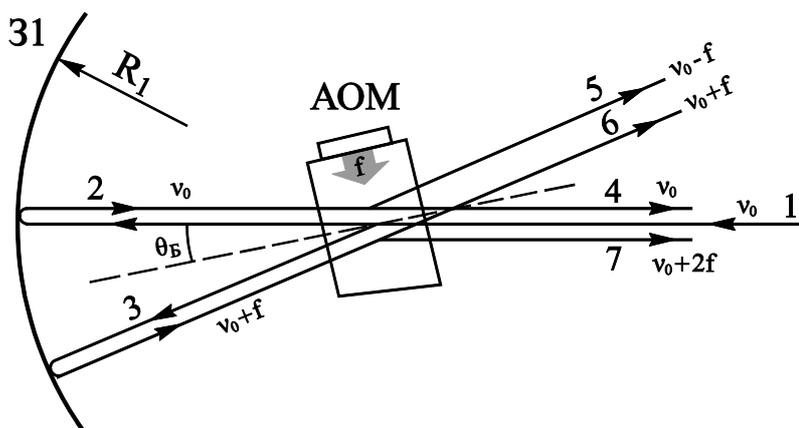


Рис. 1. Принцип работы СЗАОМ.

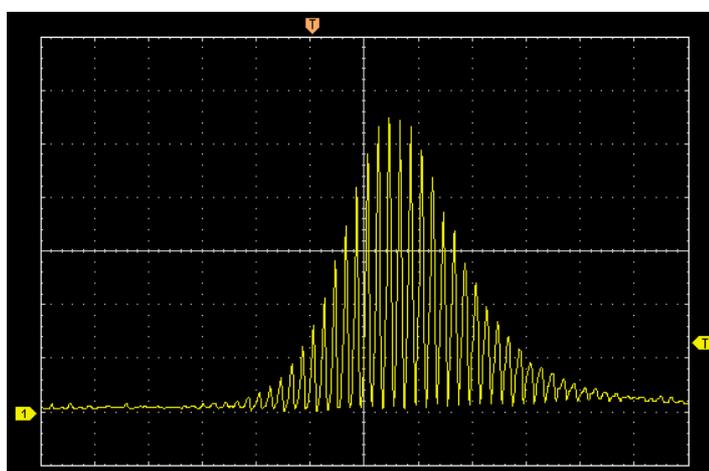


Рис. 2. Осциллограмма импульса генерации на длине волны $\lambda = 1,064$ мкм в режиме QML. Цена деления по оси абсцисс 50 нс.

В разделе 2.3 приводятся характеристики выходного излучения Nd:YAG-лазера с методом СЗАОМ. Исходя из зависимостей пиковой мощности и длительности Q-switch импульсов, средней выходной мощности лазера и эффективности преобразования во вторую гармонику от частоты переключения модулятора в режиме QML, выбирается оптимальный режим работы лазера. Приводятся результаты измерения длительности импульсов выходного излучения лазера и схема их измерения. В разделе 2.4 проводится сравнение полученной в эксперименте длительности импульсов с рассчитанной согласно теории [1, 15, 16].

Третья глава посвящена использованию керровской линзы для сокращения длительности импульсов. В этой главе описываются эксперименты по сокращению длительности отдельного импульса и увеличению пиковой мощности Nd:YAG-лазера (рассмотренного в главе 2) при помощи керровской линзы, формируемой в резонаторе. Для формирования линзы применялись нелинейный кристалл для генерации второй гармоники и пластинка из плавленного кварца. В случае использования нелинейного кристалла вывод излучения лазера осуществлялся на длине волны второй гармоники. В разделе 3.1 даются результаты расчета резонатора в случае формирования керровской линзы в удваивающем частоту нелинейном кристалле LBO. Приводятся результаты измерения длительности импульсов выходного излучения лазера. В разделе 3.2 приводятся те же данные для случая формирования керровской линзы в пластинке из плавленного кварца.

В **четвертой главе** приводятся результаты прямых измерений длительности импульса диодно-накачиваемого Nd:YAG-лазера с модуляцией добротности и синхронизацией мод с помощью стрик-камеры. Здесь же исследуется новый режим генерации твердотельного лазера с Q-switch и синхронизацией мод, в котором Q-switch “самопроизвольно” формируется на частоте релаксационных колебаний. Глава состоит из четырех разделов. В разделе 4.1 описаны предварительные измерения длительности импульсов синхронизации мод лазера при помощи автокоррелятора с генерацией второй гармоники в нелинейном кристалле по неколлинеарной схеме, которые выявили необходимость прямых измерений с помощью стрик-камеры. Раздел 4.2 посвящен описанию схемы измерений длительности импульсов стрик-камерой Агат-СФЗМ. Особое внимание уделено калибровке стрик-камеры и описанию того, как обрабатывались экспериментальные данные.

В разделе 4.3 приведены результаты измерений в режиме QML с частотой следования Q-switch импульсов 1 кГц. Показано, что импульсы диодно-накачиваемого Nd:YAG-лазера с методом СЗАОМ обладают

немоноимпульсной структурой. Структура импульсов зависит от отстройки частоты межмодовых биений продольных мод от удвоенной частоты бегущей звуковой волны модулятора. При точной настройке резонатора импульс может разбиваться на два (см. рис. 3), а при отстройке – на три и более импульсов. Структура импульсов при точной настройке резонатора зависит от джиттера рабочей частоты модулятора. При джиттере рабочей частоты ± 300 Гц и точной настройке резонатора количество моноимпульсов достигало 95% (см. рис. 4). Измеренная длительность импульса генерации на 1064 нм составила 45 ± 10 пс.

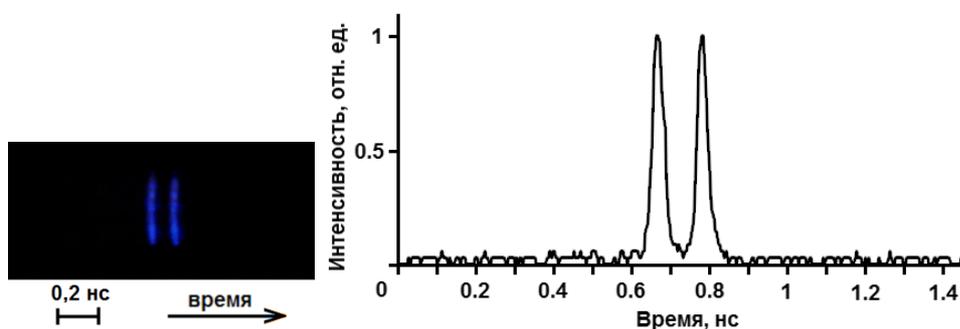


Рис. 3. Пример временной развертки и денситограммы импульсов на шкале 0,34 нс/см (предельное временное разрешение ≈ 6 пс) при точной настройке длины резонатора.

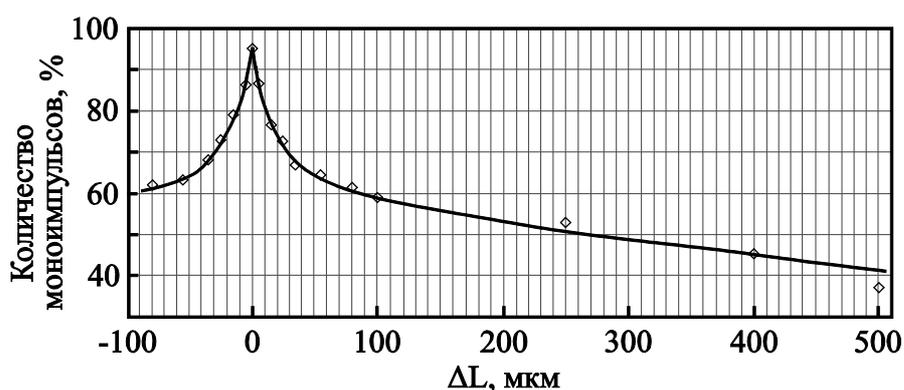


Рис. 4. Зависимость количества моноимпульсов от отстройки длины резонатора.

В обсуждении полученных результатов приводится объяснение немоноимпульсной структуры импульсов выходного излучения,

рассматриваются различные физические механизмы, приводящие к сложной временной структуре импульсов.

В разделе 4.4 даны результаты экспериментов с подачей на АОМ рабочей частоты (49,52 МГц, джиттер ± 3 кГц) в непрерывном режиме. В этом случае лазер работал в режиме QML, но с частотой следования цуга импульсов, равной частоте релаксационных колебаний. На рис. 5 а, б представлены осциллограммы релаксационных колебаний, полученные при токе 19А в чисто непрерывном режиме генерации (т.е. без ультразвуковой волны в АОМ). При подаче звукового сигнала с частотой 49.5 МГц и мощностью 2 Вт (соответствующая дифракционная эффективность $\approx 5\%$) на АОМ характер генерации лазера кардинально меняется и возникает "авто-QСМ режим", иллюстрируемый рис. 5 в - е. Показано, что стабильность этого режима зависит от точности настройки длины резонатора. При точной настройке наблюдалась наилучшая стабильность, а внутри цуга содержались только пикосекундные моноимпульсы длительностью 45 ± 10 пс. В этом же разделе приведены результаты эксперимента с непрерывной подачей на АОМ рабочей частоты (49,52 МГц, джиттер ± 3 кГц) в схеме с внутррезонаторной генерацией второй гармоники в нелинейном кристалле LBO (длина 15 мм, I тип). При точной настройке длины резонатора наблюдалась непрерывная синхронизация мод, т. е. режим авто-QML отсутствовал. Измеренная длительность импульса генерации на 532 нм составила ~ 1 нс.

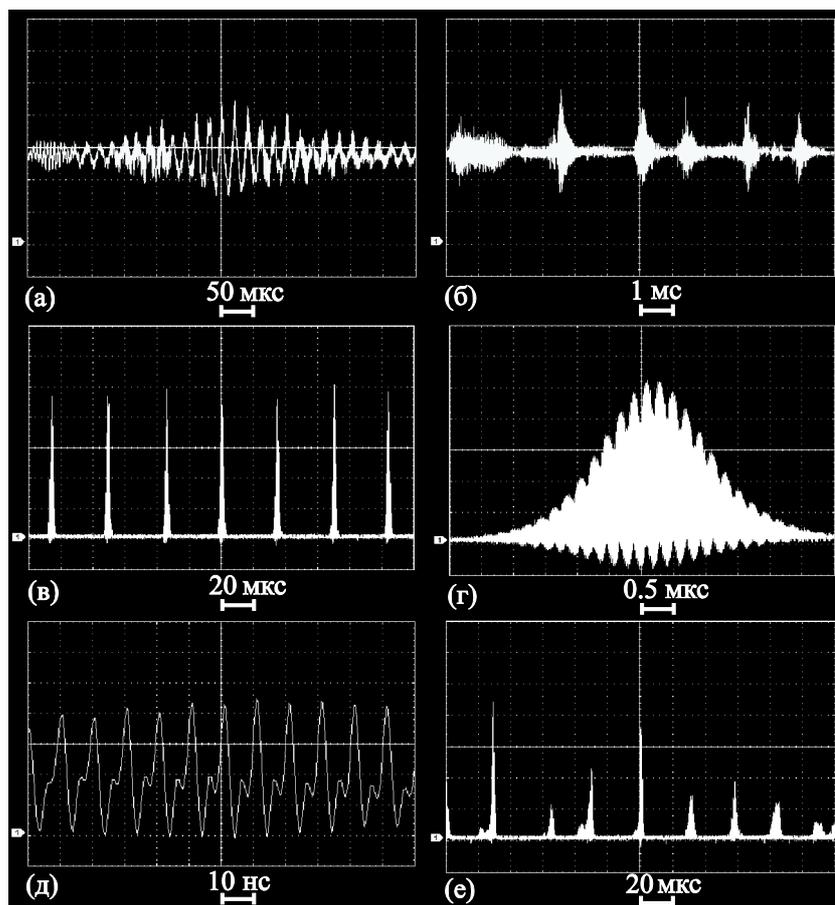


Рис. 5. Осциллограммы релаксационных колебаний. а, б – непрерывный режим; в, г, д – авто-QML режим при точной настройке длины резонатора; е – авто-QML режим при отстройке 0.5 мм.

В **пятой главе** производится расчет и подбор параметров резонатора титан-сапфирового лазера для получения фемтосекундных импульсов с помощью метода модуляции добротности резонатора и синхронизации мод, описанного в главе 2 и формирования керровской линзы в активном кристалле. Полученные результаты расчетов в дальнейшем планируется использовать при создании мощного криогенно-охлаждаемого титан-сапфирового лазера с использованием метода СЗАОМ. Глава состоит из четырех разделов. В разделе 5.1 описываются экспериментальные результаты по работе титан-сапфирового лазера с накачкой второй гармоникой излучения диодно-накачиваемого Nd:YAG-лазера с модуляцией добротности резонатора. В разделе 5.2 даются результаты матричного расчета резонатора, при котором учитывались керровская и тепловая линзы, возникающие в активном элементе. В разделе 5.3

производится оценка энергетических характеристик лазера. Предполагается получение выходной пиковой мощности на уровне $\sim 1,2$ ГВт. В разделе 5.4 произведена оценка дисперсионного расплывания импульсов и расчет компенсатора дисперсии групповой скорости. Указано что при рассчитанном значении дисперсии резонатора (6000 фс^2) и при отсутствии элементов, компенсирующих дисперсию в резонаторе, минимальная возможная длительность импульсов выходного излучения составит ≈ 150 фс. В качестве компенсатора дисперсии (он будет установлен вне резонатора) была выбрана пара призм из стекла ТФ10, расстояние между призмами должно составлять 56 см.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Изучены выходные характеристики излучения диодно-накачиваемого Nd:YAG-лазера с одновременной реализацией модуляции добротности резонатора и синхронизации мод с помощью метода СЗАОМ. Длительность импульсов, измеренная оптическим автокоррелятором, составила 40 пс. При средней мощности лазера 2 Вт и частоте Q-switch 2 кГц пиковая мощность отдельного импульса составила ~ 2 МВт.
2. Длительность импульсов генерации сокращалась при формировании керровской линзы в резонаторе. При использовании в качестве керровской среды нелинейного кристалла LBO, который одновременно являлся генератором второй гармоники, измеренная длительность импульса (на длине волны $\lambda = 1064$ нм) составила 3,25 пс, а ширина спектра 200 ГГц. Таким образом, полученная длительность импульса близка к предельной, определяемой шириной спектра. При этом частота повторения импульсов модуляции добротности составляла 2 кГц, средняя мощность излучения на второй гармонике 1,5 Вт. Пиковая мощность отдельного импульса вблизи максимума огибающей достигала ~ 50 МВт.
3. Прямые измерения с помощью стрик-камеры длительности импульса диодно-накачиваемого Nd:YAG-лазера, в котором модуляция

добротности резонатора и синхронизация мод осуществлены методом СЗАОМ, показали немоноимпульсность пикосекундных импульсов. Число таких импульсов увеличивается с отстройкой частоты межмодовых биений продольных мод от удвоенной частоты бегущей звуковой волны модулятора, а при точной настройке длины резонатора зависит от джиттера рабочей частоты модулятора. При джиттере рабочей частоты ± 300 Гц и точной настройке резонатора количество моноимпульсов достигало 95%. Измеренная длительность импульсов генерации на 1064 нм составила 45 ± 10 пс.

4. С использованием метода СЗАОМ и с подачей на модулятор непрерывного питающего сигнала ультразвуковой частоты обнаружен новый режим – авто-QML, при котором частота следования цуга импульсов задается частотой релаксационных колебаний лазерного поля. В случае точной настройки резонатора в таком режиме цуги (~ 2 мкс) импульсов были стабильны и их интенсивность отличалась не более $\pm 5\%$, а внутри цуга содержались только пикосекундные моноимпульсы. Стабильность этого режима зависит от точности настройки длины резонатора. Стабильные цуги импульсов наблюдались в пределах отстройки длины резонатора ± 80 мкм. Длительность импульсов измеренная стрик-камерой составляла 45 ± 10 пс.

Список публикаций по теме диссертации

1. Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В. Титан-сапфировый лазер с импульсной накачкой второй гармоникой излучения диодно-накачиваемого Nd: YAG-лазера для двухфотонной спектроскопии // Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39. – №. 3. – С. 244-246.
2. Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В. Модуляция добротности и синхронизация мод в диодно-накачиваемом Nd: YAG-лазере с удвоением частоты // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42. – №. 2. – С. 107-110.
3. Donin V. I., Yakovin D. V., Griбанov A. V. Diode-pumped green Nd: YAG laser with Q-switch and mode locking // Optics letters. – 2012. – V. 37. – №. 3. – P. 338-340.
4. Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В. Самоорганизация режима Q-switch с одновременной синхронизацией мод в диодно-накачиваемом Nd: YAG-лазере // Письма в ЖЭТФ. – 2015. – Т. 101. – №. 12. – С. 881-884.
5. Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В. Структура пикосекундных импульсов генерации в диодно-накачиваемом Nd: YAG-лазере с модуляцией добротности и синхронизацией мод // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. – №. 12. – С. 1117-1120.
6. Donin V. I., Yakovin D. V., Griбанov A. V. Diode-Pumped Nd:YAG Green Laser with Q-Switch and Mode Locking // In book: Nd YAG Laser, INTECH Open Access Publisher. – 2012. – P. 97-110.
7. Грибанов А. В., Донин В. И., Яковин Д. В., Хомутов А. Н. Компактный перестраиваемый ультрафиолетовый TiSa лазер с преобразованием частоты // Сборник трудов второй международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 07-09 февраля 2006 г. Санкт-Петербург, С. 153.
8. Donin V. I., Yakovin D. V., Griбанov A. V. The titan-sapphire laser pumped by the second harmonic radiation of the diode-pumped pulse Nd:YAG laser for the purposes of two-photon spectroscopy // Proc. The 9-th Russian-Chinese

Symposium on Laser Physics and Technologies, Oct. 26-31, 2008, Tomsk, P.196-198.

9. Грибанов А. В., Донин В. И., Яковин Д. В., Хомутов А. Н., Яковин М. Д. Синхронизация мод нелинейным кристаллом в зеленом Q-switch Nd:YAG лазере с диодной накачкой // Труды молодежной школы-конференции с международным участием «Лазеры и лазерные технологии», посвященной 50-летию первого в мире лазера. 22-27 ноября 2010 г. Томск, С. 51 – 52.
10. Донин В. И., Никонов А. В., Яковин Д. В., Грибанов А. В. Мощный одномодовый диодно-накачиваемый Nd:YAG-лазер с излучением гармоник 0,532 и 0,355 мкм для прецизионной обработки материалов // Труды IV всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине», 22-25 марта 2011 г. Новосибирск, С. 70 – 73.
11. Донин В. И., Яковин Д. В., Грибанов А. В. Лазер с модуляцией добротности резонатора и синхронизацией мод // Патент № 2478242 от 27.03.2013.
12. Донин В. И., Трубецкой А. В., Яковин Д. В., Грибанов А. В., Затолокин В. Н. Лазер с модуляцией добротности резонатора и синхронизацией мод // Заявка на патент № 2015121867 от 08.06.2015.

Список цитируемой литературы

1. Kuizenga D. J. Short-pulse oscillator development for the Nd: glass laser-fusion systems // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1981. – V. 17. – №. 9. – P. 1694-1708.
2. Херман Й., Вильгельми Б. Лазеры сверхкоротких световых импульсов // Москва: Мир. – 1986. – 368 С.
3. He G. S. et al. Multiple mode-locking of the Q-switched Nd: YAG laser with a coupled resonant cavity // Optics communications. – 1993. – V. 96. – №. 4. – P. 321-329.
4. Chen Y. F. et al. Simultaneous mode locking in a diode-pumped passively Q-switched Nd: YVO₄ laser with a GaAs saturable absorber // Applied optics. – 2001. – V. 40. – №. 33. – P. 6038-6041.
5. Agnesi A. et al. Diode pumped Nd: YVO₄ laser at 1.34 μm Q-switched and mode locked by a V³⁺: YAG saturable absorber // Optics Communications. – 2001. – V. 194. – №. 4. – P. 429-433.
6. Pan S. et al. Diode-pumped passively Q-switched mode-locked Nd: YLF laser with uncoated GaAs saturable absorber // Optics communications. – 2007. – V. 272. – №. 1. – P. 178-181.
7. Auston D. H. et al. Ultrashort light pulses: Picosecond techniques and applications // Ed. S. L. Shapiro. Springer Science & Business Media, 2013. – V. 18. – 392 P.
8. Horn A. Ultra-fast material metrology // John Wiley & Sons, 2009. – 218 P.
9. Wu Q. et al. Femtosecond laser-induced periodic surface structure on diamond film // Applied Physics Letters. – 2003. – V. 82. – №. 11. – P. 1703-1705.
10. Bhardwaj V. R. et al. Optically produced arrays of planar nanostructures inside fused silica // Physical review letters. – 2006. – V. 96. – №. 5. – P. 057404.
11. Bonse J. et al. Femtosecond laser-induced periodic surface structures // Journal of Laser Applications. – 2012. – V. 24. – №. 4. – P. 042006.

12. Sugioka K., Cheng Y. Ultrafast lasers—reliable tools for advanced materials processing // *Light: Science & Applications*. – 2014. – V. 3. – №. 4. – P. e149.
13. Vogel A. et al. Intraocular photodisruption with picosecond and nanosecond laser pulses: tissue effects in cornea, lens, and retina // *Investigative ophthalmology & visual science*. – 1994. – V. 35. – №. 7. – P. 3032-3044.
14. Grewal D. S. et al. Femtosecond laser–assisted cataract surgery—current status and future directions // *Survey of ophthalmology*. – 2016. – V. 61. – №. 2. – P. 103-131.
15. Kuizenga D. J., Siegman A. E. FM and AM mode locking of the homogeneous laser-Part I: Theory // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1970. – V. 6. – №. 11. – P. 694-708.
16. Kuizenga D. J. et al. Simultaneous Q-switching and mode-locking in the cw Nd: YAG laser // *Optics Communications*. – 1973. – V. 9. – №. 3. – P. 221-226.