

На правах рукописи



Хрипунов Сергей Александрович

**НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОЕ
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МНОГОЧАСТОТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЛОКОННО-ДИСКРЕТНЫХ
ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМАХ**

Специальность 01.04.21 —
«Лазерная физика»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Кобцев Сергей Михайлович

Официальные оппоненты: **Комаров Андрей Константинович**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и электротехники
Сибирского отделения Российской академии наук,
лаборатория нелинейной физики,
ведущий научный сотрудник

Нюшков Борис Николаевич,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского
отделения Российской академии наук, научно-
исследовательская группа оптических часов,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

Защита состоится «___» _____ 2017 года в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 003.024.01 на базе Института лазерной физики СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева 15Б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института лазерной физики СО РАН(<http://www.laser.nsc.ru>).

Автореферат разослан «___» _____ 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 003.024.01, к.ф.-м.н.



Н. Г. Никулин

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Активное развитие волоконной оптики привело к появлению волоконных источников непрерывного и импульсного лазерного излучения, востребованных во многих областях науки и техники. Достоинствами оптоволоконных источников лазерного излучения являются их высокие эффективность и выходная мощность, широкая спектральная область усиления позволяет им генерировать ультракороткие лазерные импульсы, а системы, выполненные полностью из оптического волокна (цельноволоконные), не нуждаются в юстировке и слабо чувствительны к изменениям параметров окружающей среды. Тем не менее по функциональным возможностям и техническим характеристикам цельноволоконные оптические элементы существенно уступают многочисленным дискретным (объемным) элементам в ряде задач, что не позволяет создать на их основе высокоэффективные цельноволоконные лазерные системы, например, в случае нелинейно-оптических преобразований. Решением данной проблемы является разработка гибридных лазеров на основе волоконно-дискретных лазерных систем, сочетающих преимущества одновременно волоконных и дискретных оптических компонентов.

Нелинейно-оптическое спектральное преобразование непрерывного излучения, например, генерация второй гармоники, привлекательно возможностью получения излучения на длинах волн, которые сложно получить с помощью генерации фундаментального излучения. Методы удвоения одной частоты непрерывного лазерного излучения относительно хорошо развиты и обеспечивают близкую к предельной эффективность генерации второй гармоники, например, во внешнем высокодобротном резонаторе [1, 2]. Существующие методы удвоения нескольких частот непрерывного лазерного излучения обеспечивают существенно меньшую эффективность [3-5], хотя бóльшая эффективность этих методов востребована в силу широкого распространения многочастотных волоконных лазеров. Изучение физических механизмов, позволяющих реализовать высокоэффективное нелинейно-оптическое спектральное преобразование непрерывного многочастотного излучения в волоконно-дискретных лазерных системах, является актуальной научной задачей.

В импульсных волоконно-дискретных лазерных системах может проявляться другой тип нелинейно-оптического преобразования излучения – преобразование поляризации излучения. Эффект нелинейной эволюции поляри-

зации излучения [6, 7] используется в лазерных системах этого типа для пассивной синхронизации мод излучения и получения ультракоротких импульсов. Проблема применения эффекта нелинейной эволюции поляризации излучения для синхронизации мод волоконно-дискретных лазерных систем заключается в том, что запуск и поддержание стабильного режима синхронизации мод требуют изменения состояния поляризации внутрирезонаторного излучения, но алгоритмы реализации требуемого изменения слабо разработаны и не позволяют воспроизводить параметры генерируемых импульсов после регулируемого изменения. Таким образом, актуальным является исследование физических процессов управления нелинейно-оптическими поляризационными преобразованиями многочастотного излучения в волоконно-дискретных лазерных системах и разработка на основе результатов этих исследований алгоритмов автоматического управления состоянием поляризации внутрирезонаторного излучения этих систем.

В настоящей диссертационной работе представлены результаты исследований нелинейно-оптических спектрального и поляризационного преобразований многочастотного излучения в двух волоконно-дискретных лазерных системах. Первая часть работы посвящена изучению механизмов эффективного удвоения частоты непрерывного многочастотного излучения иттербиевого волоконного лазера в высокодобротном резонаторе удвоителя с возможностью перестройки длины волны излучения второй гармоники. Вторая – исследованию процессов запуска и обеспечения стабильного режима пассивной синхронизации мод на основе эффекта нелинейной эволюции поляризации.

Целью данной работы является изучение нелинейно-оптических преобразований многочастотного излучения в волоконно-дискретных лазерных системах и выявление физических механизмов, позволяющих существенно улучшить характеристики этих преобразований.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать волоконно-дискретную лазерную систему, состоящую из оптически связанных волоконно-дискретного и высокодобротного резонаторов, для эффективного удвоения частот перестраиваемого непрерывного многочастотного излучения иттербиевого лазера в

нелинейном кристалле, оптимизировать разработанную схему для устойчивой работы в рамках исследования.

2. Исследовать режимы генерации второй гармоники многочастотного излучения иттербиевого волоконно-дискретного лазера, резонатор которого оптически связан с высокодобротным резонатором удвоителя с нелинейным кристаллом внутри.
3. Выявить возможности и ограничения перестройки длины волны излучения второй гармоники разработанной системы.
4. Разработать волоконно-дискретную лазерную систему с пассивной синхронизацией мод на основе эффекта нелинейной эволюции поляризации излучения с возможностью управления состоянием поляризации внутрирезонаторного излучения.
5. Исследовать режимы генерации волоконно-дискретной лазерной системы с пассивной синхронизацией мод на основе эффекта нелинейной эволюции поляризации излучения. Определить стабильность и устойчивость режима синхронизации мод разработанной системы при изменениях мощности излучения накачки, параметров управляющего фазового элемента, поляризационного состояния системы и др.
6. Провести теоретическое исследование эффективности генерации второй гармоники непрерывного излучения при удвоении частоты излучения с помощью нелинейных оптических кристаллов в широком диапазоне мощностей основного излучения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Частоты непрерывного многочастотного излучения волоконно-дискретной лазерной системы могут быть эффективно удвоены в высокодобротном резонаторе при наличии оптической связи между резонаторами лазера и удвоителя.
2. Система оптически связанных резонатора волоконно-дискретной лазерной системы и высокодобротного резонатора позволяет осуществить перестройку длины волны эффективно удвоенного непрерывного многочастотного излучения иттербиевого лазера в спектральном диапазоне 521-545 нм.

3. Автоматический запуск режима пассивной синхронизации мод на основе эффекта нелинейной эволюции поляризации излучения волоконно-дискретной лазерной системы может быть осуществлен при помощи одного электро-управляемого фазового элемента.
4. Эффективность методов удвоения частоты непрерывного излучения с использованием внешнего высокодобротного резонатора и без его использования при мощности излучения в диапазоне 1-10 кВт становятся сравнимыми, при этом генерация второй гармоники излучения при одном или двух проходах через нелинейный кристалл может быть предпочтительней из-за относительно высокой эффективности преобразования и простоты реализации.

Научная новизна: в результате проведенных в настоящей работе исследований

1. Выявлено, что в волоконно-дискретной системе, содержащей оптически связанные резонаторы волоконно-дискретного лазера и высокодобротного резонатора, возможна эффективная генерация второй гармоники непрерывного многочастотного излучения, при этом нормальная пучку излучения поверхность с отражением 0.2% внутри высокодобротного резонатора обеспечивает положительную обратную связь для резонатора волоконного лазера.
2. Продемонстрировано, что наличие оптической связи между резонатором волоконно-дискретного лазера и высокодобротным резонатором удвоителя приводит к селекции мод генерации лазера таким образом, что в генерацию выходят лишь моды с частотами, кратными области свободной дисперсии резонатора удвоителя.
3. Впервые обеспечена перестройка длины волны излучения второй гармоники многочастотного излучения волоконно-дискретного лазера в диапазоне 521-545 нм, частота которого была удвоена в связанных резонаторах волоконно-дискретного лазера и высокодобротном резонаторе удвоителя.
4. Установлено, что автоматический запуск режима синхронизации мод волоконно-дискретного лазера на основе эффекта нелинейной эволюции поляризации может быть осуществлен при помощи одной волновой пластины, управляемой напряжением.

5. Определено, что при мощностях непрерывного одночастотного лазерного излучения более 1 кВт эффективность генерации второй гармоники (ГВГ) за один или два прохода через нелинейный кристалл становится сравнимой с эффективностью ГВГ во внешнем высокодобротном резонаторе.

Практическая значимость:

1. Разработан и исследован способ эффективной генерации мощного лазерного излучения видимого диапазона оптической части спектра на основе удвоения частоты непрерывного многочастотного излучения волоконно-дискретного лазера в связанном с ним высокодобротном резонаторе на дискретных элементах.
2. Разработан и апробирован опытный образец волоконно-дискретной лазерной системы, генерирующий мощное непрерывное многочастотное излучение, перестраиваемое в диапазоне 521-545 нм.
3. Предложены варианты конфигураций связанных резонатора волоконно-дискретного лазера и высокодобротного резонатора удвоителя, которые отличаются повышенной стабильностью выходной мощности излучения, шириной области перестройки и шириной линии генерации.
4. Разработан волоконно-дискретный импульсный лазер с возможностью электро-управляемого старта режима пассивной синхронизации мод на основе эффекта нелинейной эволюции поляризации.
5. В результате теоретического исследования определено, что при мощностях основного непрерывного излучения свыше 1 кВт эффективная ГВГ может быть осуществлена при использовании сравнительно простых методов удвоения за один или два прохода основного излучения через нелинейный кристалл.

Апробация работы: Основные результаты работы докладывались на международных конференциях ICONO/LAT-2013 (Москва), SPIE Photonics Europe-2014 (Брюссель, Бельгия), Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике – 2014 (Москва), Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых – 2012 (Красноярск).

Личный вклад: Диссертационная работа является результатом работы автора в Отделе лазерной физики и инновационных технологий (ОЛФиИТ) Но-

восибирского государственного национального исследовательского университета (НГУ) и представляет собой обобщение научных исследований автора, выполненных совместно с сотрудниками ОЛФиИТ НГУ.

Личный вклад автора состоит в разработке и исследовании уникальной системы связанных резонаторов волоконно-дискретного лазера и высокочастотного резонатора удвоителя, что позволило эффективно удвоить частоту непрерывного многочастотного излучения волоконно-дискретного лазера и впервые продемонстрировать перестройку длины волны излучения разработанной системы; также автор разработал и оптимизировал волоконно-дискретную лазерную систему с пассивной синхронизацией мод на основе нелинейной эволюции поляризации с управляемым стартом режима синхронизации мод. Все полученные в диссертации результаты получены автором лично либо при непосредственном участии.

Публикации: Основные результаты по теме диссертации изложены в 13 печатных изданиях, 5 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, 3 – в тезисах докладов, 5 являются патентами.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приведен обзор научной литературы по изучаемой проблеме, сформулированы цель и задачи работы, представлены выносимые на защиту положения, изложены ее научная новизна и практическая значимость.

Первая глава посвящена численному исследованию нелинейных процессов, происходящих в нелинейных анизотропных средах, а именно, особенностях формирования излучения *второй гармоники* (ВГ) и оптимизации эффективности преобразования мощности излучения накачки во ВГ. Глава начинается с обзора методов удвоения непрерывного лазерного излучения и описания отличий исследуемой конфигурации волоконно-дискретной лазерной системы от известных ранее схем генерации второй гармоники во внешнем или вложенном высокочастотном резонаторе (рисунок 1). Далее приводятся условие фазового синхронизма, необходимое условие для эффективного нелинейно-оптического преобразования, результаты теории Бойда-Клейнмана [8] и ее обобщение на случай мощной оптической накачки, когда становится суще-

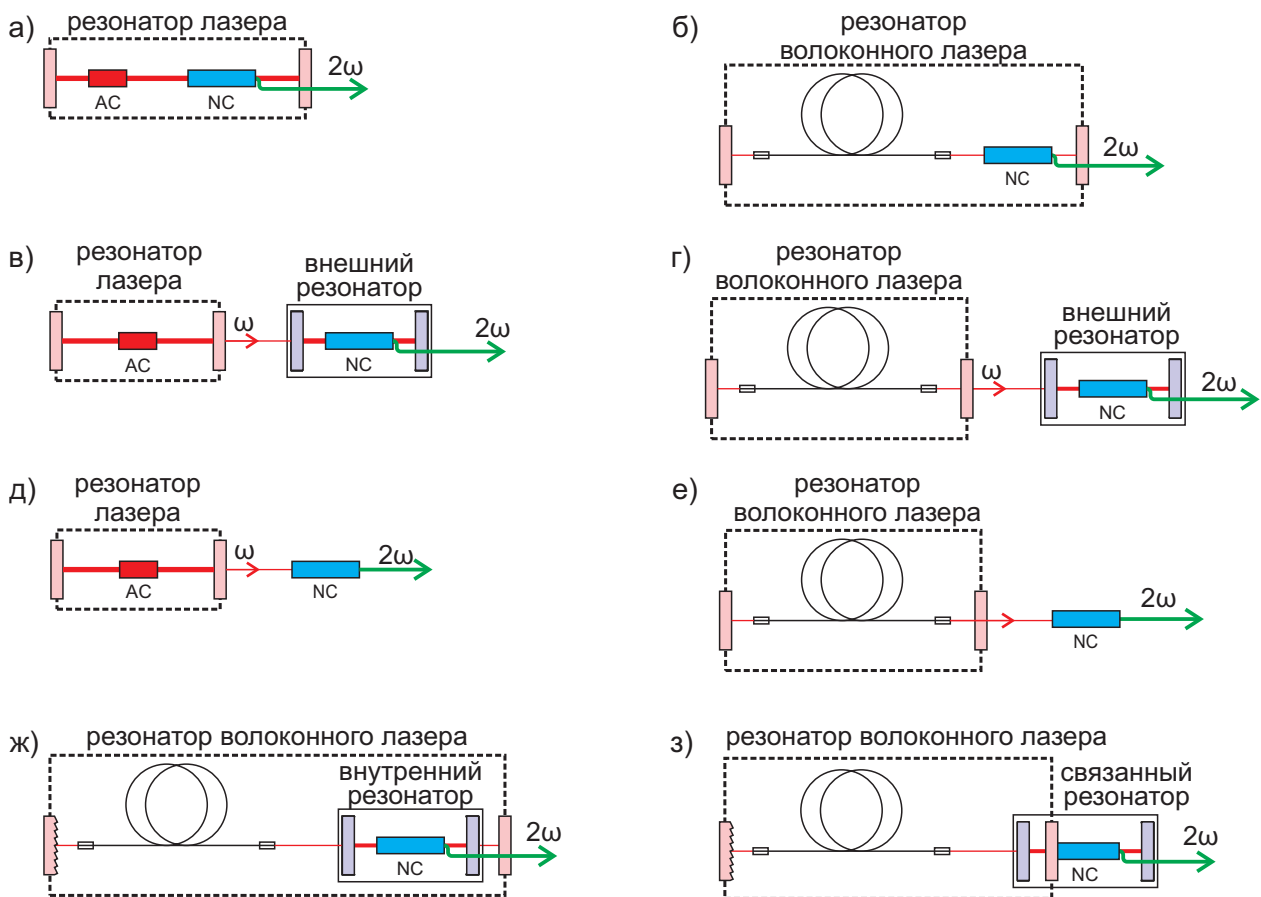


Рисунок 1 — Схемы генерации второй гармоники непрерывного лазерного излучения. АС - активный кристалл, НС - нелинейный кристалл.

ственным истощение основного излучения при генерации второй гармоники. На основе этих результатов проводится моделирование эффективности преобразования непрерывного одночастотного излучения во ВГ в широком диапазоне мощностей - от 1 Вт до 10 кВт для случаев удвоения частоты за один и два прохода через нелинейный кристалл и когда кристалл расположен внутри высокодобротного резонатора (рисунок 2).

Проведенный анализ показал, что эффективность удвоения частоты излучения основной гармоники в высокодобротном резонаторе существенно превышает эффективности более простых схем удвоения за один и два прохода вплоть до мощностей накачки 0.5 - 1 кВт. Это подчёркивает необходимость разработки более эффективных методов генерации второй гармоники в случае непрерывного многочастотного фундаментального излучения относительно малой мощности (рисунок 2).

С ростом мощности основного излучения эффективность одно- и двух-проходной схемы увеличивается, тогда как эффективность удвоения во внешнем резонаторе остается на неизменно высоком уровне. Поэтому при мощно-

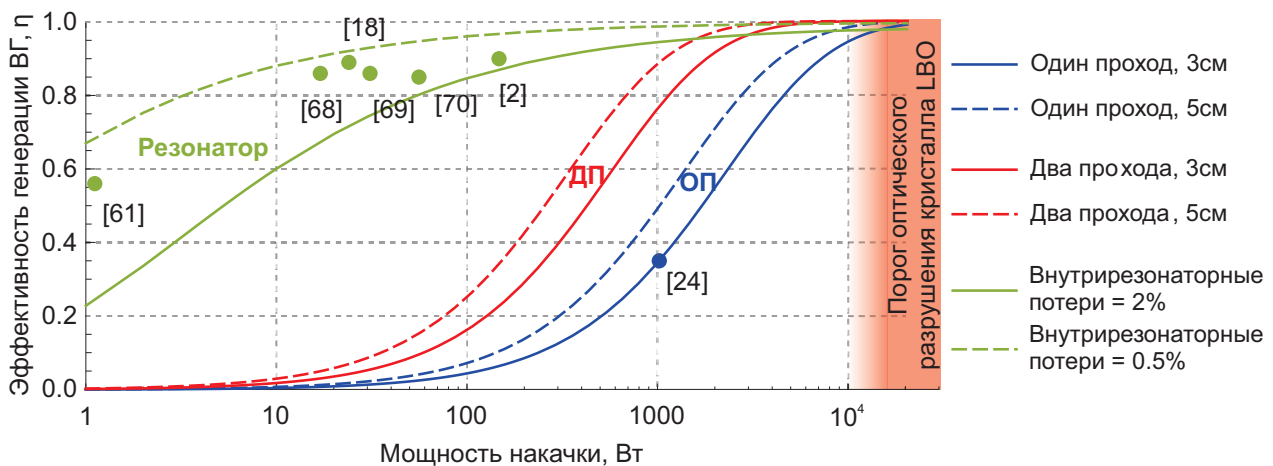


Рисунок 2 — Зависимость эффективности генерации ВГ при различных конфигурациях схем удвоения от мощности основного излучения; точками обозначены экспериментальные результаты других групп.

сти излучения накачки свыше 1 кВт более простые способы удвоения частоты непрерывного лазерного излучения достигают эффективности, ранее достижимой только во внешнем высокочастотном резонаторе, и оказываются более эффективными при наличии потерь внутри внешнего резонатора.

Во **второй главе** дается общая характеристика волоконных лазеров и приводятся их основные достоинства. Рассматриваются основные типы оптических волокон, на основе которых построены лазерные системы, описанные в диссертационной работе. Далее приведен краткий обзор редкоземельных элементов, которыми допируют активные оптические волокна и дана подробная характеристика волокон допированных ионами иттербия и эрбия, на основе которых построены исследуемые в работе лазерные системы. Получены выражения для расчета усиленного спонтанного излучения волоконных лазеров, на основе которых построена численная модель иттербиевого волоконно-дискретного лазера и определены его оптимальные параметры и характеристики выходного излучения.

Третья глава посвящена изучению нового механизма удвоения частоты непрерывного многочастотного излучения волоконного лазера в частично-связанном с ним высокочастотном резонаторе, который обеспечивает эффективное преобразование излучения и возможность перестройки длины волны излучения ВГ на области шириной более 20 нм. После чего изучается физический принцип взаимодействия двух частично-связанных резонаторов, при котором выходное зеркало волоконного лазера, располагается внутри резонатора удво-

ителя, как показано на рисунке 3 (выходным зеркалом является просветленная грань нелинейного кристалла).

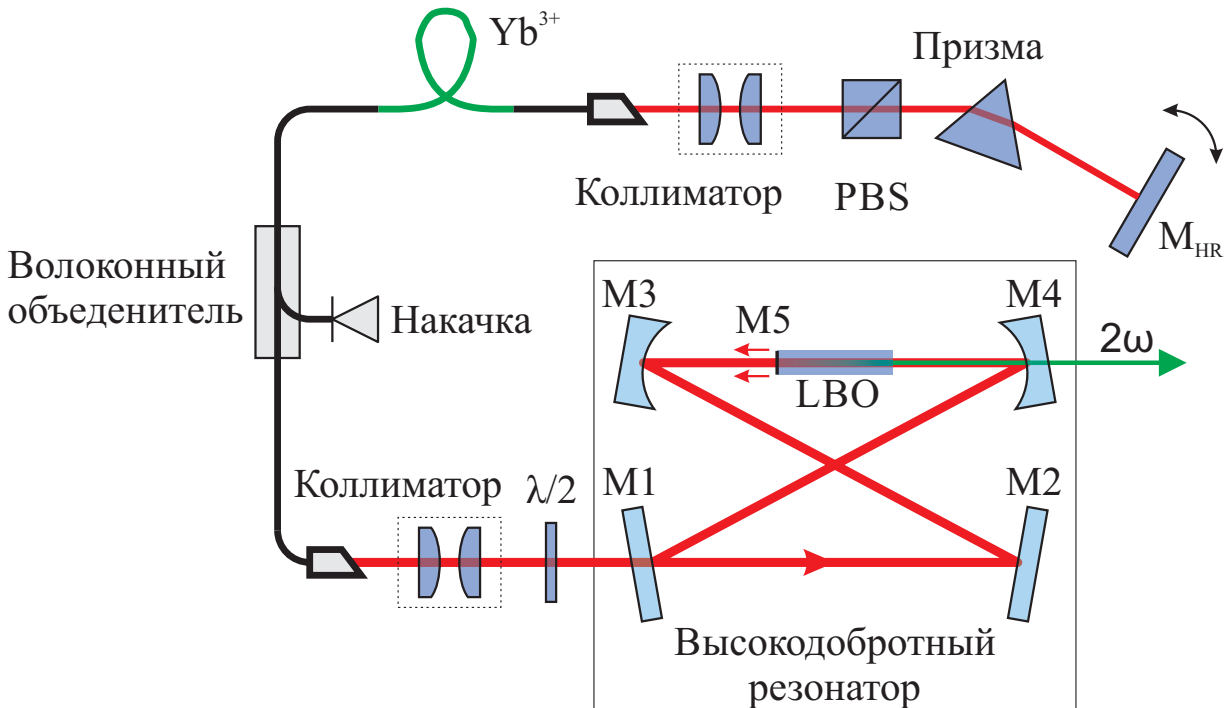


Рисунок 3 — Схема экспериментальной установки для нелинейно-оптического спектрального преобразования многочастотного лазерного излучения.

Поскольку выходное зеркало располагалось внутри высокодобротного резонатора, то эффективная лазерная генерация волоконного лазера возможна лишь при некотором не нулевом коэффициенте связи резонатора волоконного лазера и высокодобротного резонатора удвоителя. В настоящей работе показано, что коэффициент связи данных резонаторов, значение которого лежит в диапазоне 0-1 [9], зависит от частоты излучения волоконного лазера. Так, для частот излучения волоконного лазера совпадающих с собственными частотами резонатора удвоителя коэффициент связи резонаторов при коэффициенте отражения торцевой поверхности нелинейного кристалла 0.002 (поверхность с просветляющим покрытием) составляет 0.023. Как показали экспериментальные исследования такого коэффициента отражения выходного зеркала достаточно для эффективной генерации волоконного лазера. Анализ частичной оптической связи резонаторов лазера и удвоителя демонстрирует значительную (более, чем на 3 порядка) разницу в коэффициентах связи совпадающих и не совпадающих продольных мод волоконного лазера и удвоителя. Именно это является причиной селекции продольных мод связанных резонаторов, приводя-

щей к генерации системы из связанных резонаторов на тех продольных модах, которые являются общими для обоих резонаторов.

Далее в настоящей главе представлены результаты теоретического и экспериментального изучения особенностей работы разработанной схемы. Эффективность преобразования мощности излучения накачки в излучение с длиной волны ~ 1 мкм составила около 60%, а эффективность преобразования накачки в излучение второй гармоники 14%. Максимальная мощность выходного излучения с длиной волны 536 нм составила 880 мВт при мощности накачки на длине волны 976 нм 6.2 Вт, как показано на рисунке 4. При мощности выходного излучения второй гармоники на уровне 500 мВт ее нестабильность не превышала 2-3 %.

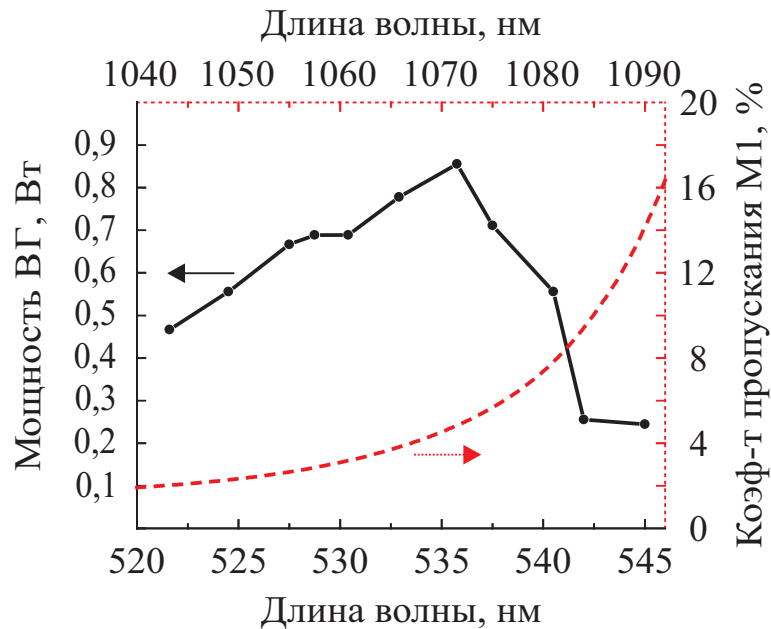


Рисунок 4 — Зависимость выходной мощности излучения второй гармоники и коэффициента пропускания входного зеркала высокодобротного резонатора М1 от длины волны.

В результате проведенного исследования были определены физические процессы позволяющие перестраивать длину волны излучения ВГ в спектральной области шириной более 20 нм (521-545 нм), при этом наблюдалось изменение мощности выходного излучения, как показано на рисунке 4. Такое поведение мощности выходного излучения было связано с резкой зависимостью коэффициента пропускания входного зеркала резонатора удвоителя от длины волны излучения волоконного лазера.

Заключительная часть данной главы посвящена выявлению способов оптимизации разработанной волоконно-дискретной лазерной системы. Представлена схема экспериментальной установки, отражающая оптимизацию узлов данной лазерной системы (рисунок 5).

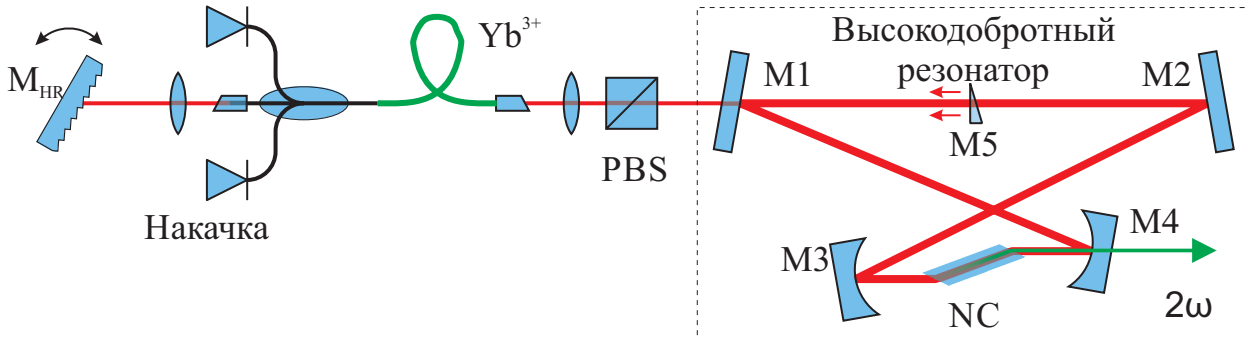


Рисунок 5 — Оптимизированная схема волоконно-дискретной лазерной системы для нелинейно-оптического спектрального преобразования непрерывного многочастотного излучения.

В четвертой главе приведен обзор развития генераторов ультракоротких импульсов в их хронологическом порядке. Даны основные определения эффектам пассивной *синхронизации мод* (СМ) и *нелинейной эволюции поляризации* (НЭП). Далее в главе представлены результаты исследования нелинейно-оптического поляризационного преобразования многочастотного излучения волоконно-дискретного импульсного лазера с синхронизацией мод на основе нелинейной эволюции поляризации. Традиционной проблемой лазеров этого типа является неопределённость алгоритма запуска режима синхронизации мод с помощью нескольких дискретных или волоконных контроллеров поляризации. В данной работе разработан метод программно-управляемого старта режима синхронизации мод (рисунок 6) с помощью одной жидкокристаллической электрически-управляемой волновой пластинки. Физика предложенного метода основывается на следующих основных положениях:

1. установление требуемой поляризации внутрирезонаторного излучения для запуска режима синхронизации мод возможно с помощью одного двулучепреломляющего элемента при предварительной настройке поляризации излучения путём укладки оптического волокна резонатора лазера, которое за счет скруток и изгибов выполняет функцию двулучепреломляющих элементов волновой задержки;

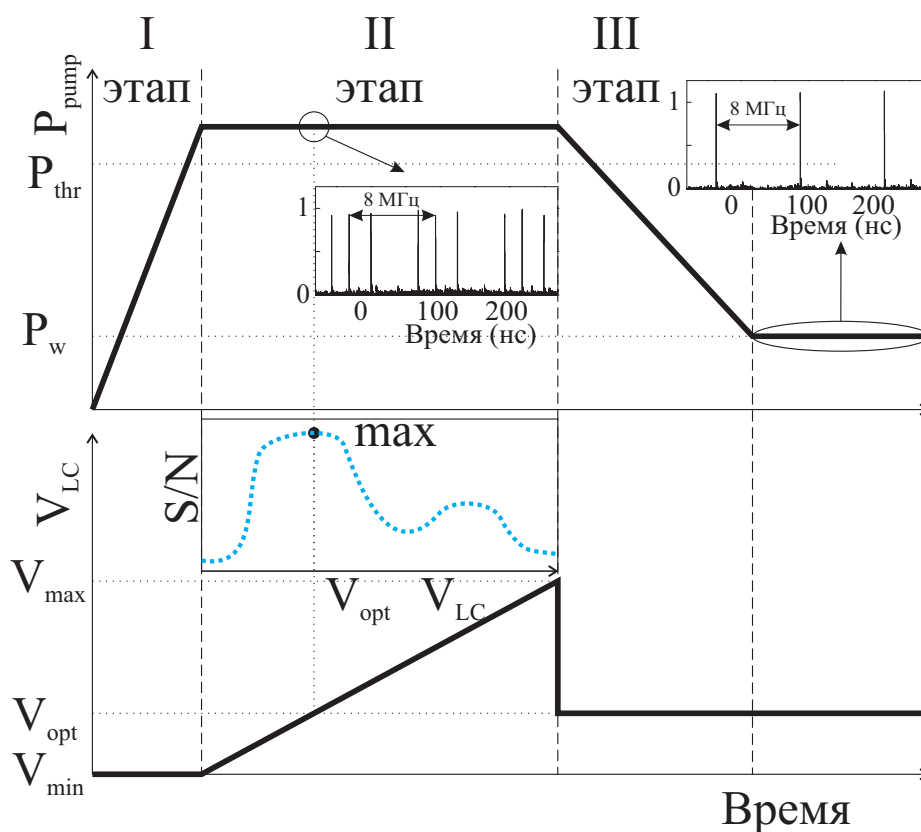


Рисунок 6 — Схематичное изображение метода запуска режима СМ на основе НЭП под управлением компьютера.

2. запуск многоимпульсного режима синхронизации мод волоконного лазера, в котором может проявляться нелинейный оптический эффект Керра в виде нелинейной эволюции поляризации излучения, возможен при любом начальном состоянии поляризации излучения лазера и относительно высокой мощности излучения лазера, обеспечивающей нелинейную настройку такой поляризации излучения, состояние которой воспроизводится (или почти воспроизводится) за полный обход резонатора;
3. в режиме синхронизации мод оптимальная настройка состояния поляризации внутрирезонаторного излучения возможна с помощью одной жидкокристаллической волновой пластинки, управление которой осуществляется до достижения максимального отношения “сигнал/шум” в радиочастотном спектре излучения лазера на частоте следования импульсов;
4. переход относительно нестабильного многоимпульсного режима синхронизации мод в стабильный моноимпульсный осуществляется

при уменьшении мощности излучения накачки лазера с оптимальной настройкой состояния поляризации внутрирезонаторного излучения.

Разработанный метод позволяет реализовать программно-управляемый запуск стабильного моноимпульсного режима синхронизации мод эрбиевого волоконного лазера с длительностью импульсов излучения менее 200 фс и средней мощностью выходного излучения 2.5 мВт.

В **заключении** приведены основные результаты проведенных научных исследований, которые заключаются в следующем:

1. разработана волоконно-дискретная лазерная система, позволяющая эффективно удваивать частоту непрерывного многочастотного излучения волоконно-дискретного лазера в высокодобротном резонаторе. Выходная мощность выходного излучения на длине волны 536 нм разработанной системы составила 880 мВт при мощности накачки 6.2 Вт на длине волны 976 нм. Представленный источник непрерывного многочастотного лазерного излучения видимой части оптического спектра отличается высокой эффективностью преобразования мощности излучения полупроводниковых диодов накачки в излучение видимой части оптического спектра, которая составила 14%.
2. Разработанная волоконно-дискретная лазерная система на основе нелинейно-оптического спектрального преобразования непрерывного многочастотного излучения иттербиевого лазера позволяет осуществить перестройку длины волны выходного излучения в диапазоне 521-545 нм. На краях области перестройки мощность выходного излучения составляла от 30% до 50% от максимального значения в центре диапазона; был предложен способ уменьшения колебаний мощности выходного излучения при перестройке длины волны за счет оптимизации коэффициента пропускания входного зеркала резонатора удвоителя. Были запатентованы варианты конфигураций волоконно-дискретной лазерной системы, позволяющие осуществлять нелинейно-оптическое преобразование многочастотного излучения волоконно-дискретного лазера в высокодобротном резонаторе.
3. Была реализована волоконно-дискретная лазерная система на основе нелинейно-оптического преобразования многочастотного излучения

с пассивной синхронизацией мод на основе эффекта нелинейной эволюции поляризации. В данной лазерной системе был реализован автоматический запуск режима синхронизации мод при использовании одного управляемого внутрирезонаторного фазового элемента.

4. Полученные в данной работе результаты интеллектуальной деятельности защищены пятью патентами РФ на изобретения.

Публикации автора по теме диссертации

1. Khripunov, S. Variable-wavelength second harmonic generation of CW Yb-fibre laser in partially coupled enhancement cavity / S. Khripunov, D. Radnatarov, S. Kobtsev, A. Skorkin // Optics Express. – 2014. – V. 22. – № 6. – P. 7046-7051.
2. Radnatarov, D. Automatic electronic-controlled mode locking self-start in fibre lasers with non-linear polarisation evolution / D. Radnatarov, S. Khripunov, S. Kobtsev, A. Ivanenko, S. Kukarin // Optics Express. – 2013. – V. 21. – № 18. – P. 20626-20631.
3. Khripunov, S. Efficiency of different methods of extra-cavity second harmonic generation of continuous wave single-frequency radiation / S. Khripunov, S. Kobtsev, D. Radnatarov // Applied Optics. – 2016. – V. 55. — № 3. — P. 502-506.
4. Khripunov, S. CW Yb-fibre laser with wavelength-variable efficient intracavity frequency doubling in partially coupled enhancement cavity / S. Khripunov, D. Radnatarov, S. Kobtsev, A. Skorkin // Proc. SPIE. - 2014. – № 9135. — P. 91350E-91350E-7.
5. Kobtsev, S. Self-start of passively mode-locked ring fibre oscillator as a function of pump power / S. Kobtsev, S. Smirnov, S. Khripunov, D. Radnatarov, S. Kukarin, A. Ivanenko // Proc. SPIE. - 2014. – № 9135. - P. 913522-913522-7.
6. Radnatarov, D. Mode-locked Er fibre laser with variable wave plate based on liquid crystal / D. Radnatarov, S. Khripunov, S. Kobtsev, A. Ivanenko, S. Kukarin // ICONO/LAT: tech. digest. — Moscow, 2013. — paper LWF2.
7. Пат. 2548388 Российская Федерация, МПК Н 01 S 3/067. Волоконный лазер с нелинейным преобразованием частот излучения в высо-

- кодобротном резонаторе (варианты) / Кобцев С.М., Хрипунов С.А., Раднатаров Д.А.; заявл. 30.12.2013; опубл. 20.04.2015. - 14 с.
8. Пат. 2564517 Российская Федерация, МПК Н 01 S 3/067. Волоконный импульсный линейный лазер с пассивной синхронизацией мод излучения (варианты) / Кобцев С.М., Кукарин С.В., Хрипунов С.А., Раднатаров Д.А.; заявл. 10.01.2014; опубл. 20.07.2015.
 9. Пат. 2564519 Российская Федерация, МПК Н 01 S 3/067. Волоконный импульсный кольцевой лазер с пассивной синхронизацией мод излучения (варианты) / Кобцев С.М., Кукарин С.В., Хрипунов С.А., Раднатаров Д.А.; заявл. 10.01.2014; опубл. 10.10.2015.
 10. Пат. 138626 Российская Федерация, МПК Н 01 S 3/067. Волоконный лазер со стабильной пассивной синхронизацией мод излучения / Кобцев С.М., Смирнов С.В., Хрипунов С.А., Раднатаров Д.А., Иваненко А.В.; заявл. 08.11.2013; опубл. 20.03.2014.
 11. Пат. 139786 Российская Федерация, МПК Н 01 S 3/067. Волоконный кольцевой лазер сверхкоротких импульсов / Кобцев С.М., Смирнов С.В., Хрипунов С.А., Раднатаров Д.А., Иваненко А.В.; заявл. 18.11.2013; опубл. 20.04.2014.
 12. Хрипунов, С. Сравнение методов перестройки длины волны излучение волоконного лазера на примере световода активированного ионами иттербия / С. Хрипунов, С. Кобцев, Д. Раднатаров // 18 Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых: мат. конф. — Красноярск, 2012. — Т. 1. — С. 391-392.
 13. Хрипунов, С. Удвоения частоты излучения непрерывного волоконного лазера в высокодобротном частично-связанном суб-резонаторе / С. Хрипунов, Д. Раднатаров, С. Кобцев, А. Скоркин // III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике: сбор. науч. труд. — Москва, 2014. — С. 43-44

Список литературы

1. Ast, S. High-efficiency frequency doubling of continuous-wave laser light / S. Ast, R. Nia, A. Schönbeck, N. Lastzka, J. Steinlechner, T. Eberle, M. Mehmet, S. Steinlechner, R. Schnabel // Optics Letters. – 2011. – V. 36. – № 17. – P. 3467-3469.

2. Meier, T. Continuous-wave single-frequency 532 nm laser source emitting 130 W into the fundamental transversal mode / T. Meier, B. Willke, K. Danzmann // *Optics Letters*. – 2010. – V. 35. – № 22. – P. 3742-3744.
3. Cieslak, R. Internal resonantly enhanced frequency doubling of continuous-wave fiber lasers / R. Cieslak, W. Clarkson // *Optics Letters*. – 2011. – V. 36. – № 10. – P. 1896-1898.
4. Akulov, V. Tuning and doubling of the generation frequency of fiber lasers / V. Akulov, S. Kablukov // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2013. – V. 49. – № 4. – P. 345-362.
5. Kim, J. Efficient second-harmonic generation of continuous-wave Yb fiber lasers coupled with an external resonant cavity / J. Kim, J. Jeong, K. Lee, S. Lee // *Applied Physics B*. – 2012. – V. 108. – № 3. – P. 539-543.
6. Haus, H. Structures for additive pulse mode locking / H. Haus, J. Fujimoto, E. Ippen // *JOSA B*. – 1991. – V. 8. – № 10. – P. 2068-2076.
7. Tamura, K. Self-starting additive pulse mode-locked erbium fibre ring laser / K. Tamura, H. Haus, E. Ippen // *Electronics Letters*. – 1992. – V. 28. – № 24. – P. 2226-2228.
8. Boyd, G.D. Parametric interaction of focused Gaussian light beams / G.D., Boyd, D.A. Kleinman // *Journal of Applied Physics*. - 1968. - V. 39. - № 8. - P. 3597-3639.
9. Lang, R.J. An exact formulation of coupled-mode theory for coupled-cavity lasers / R.J. Lang, A. Yariv // *IEEE journal of quantum electronics*. - 1988. - V. 24. - № 1. - P. 66-72.