

**Кузнецов Алексей Геннадьевич**

**Исследование уширения спектра генерации волоконных  
лазеров с модуляцией добротности резонатора**

01.04.05 «Оптика»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
Институте автоматики и электрометрии  
Сибирского отделения РАН

Научный руководитель доктор физико-математических наук  
Бабин Сергей Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Курков Андрей Семенович

кандидат физико-математических наук  
Кучьянов Александр Сергеевич

Ведущая организация Новосибирский государственный университет

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2011 г. в \_\_\_\_  
час. на заседании диссертационного совета Д 003.005.01 в Учреждении РАН Ин-  
ституте автоматики и электрометрии СО РАН, адрес: 630090, г. Новосибирск,  
проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Института авто-  
матики и электрометрии СО РАН.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
д.ф.-м.н.

Насыров К.А.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Волоконные лазеры с модуляцией добротности резонатора (или Q-Switched лазеры, где «Q» – параметр добротности резонатора, а «switch» – выключатель) – это импульсные источники лазерного излучения с большой пиковой мощностью (~10 кВт и более) и импульсами длительностью от 10 нс. Из преимуществ таких волоконных лазерных систем следует отметить следующие:

- высокая (до ~80%) эффективность преобразования излучения диодной накачки в лазерное излучение благодаря большой длине взаимодействия и малому диаметру световедущей сердцевины (обычно от 4 до 20 мкм);
- для обеспечения работы лазера не требуется водяного охлаждения, а достаточно воздушного;
- лазерный выходной пучок высокого качества ( $M^2 \sim 1.1-1.5$ ), которое определяется волноводными свойствами оптоволокна и практически не зависит от мощности излучения.

Немаловажным преимуществом является также простота и надежность волоконных лазеров: резонатор может быть полностью выполнен на основе волоконных элементов, а световедущее волокно может быть компактно свернуто в кольца и изолировано от внешней среды, что исключает необходимость юстировки и постоянного обслуживания лазерной системы и в целом повышает стабильность работы при различных внешних условиях.

Благодаря своим преимуществам волоконные Q-switched лазеры начали активно применяться на практике, в частности, в обработке материалов и в качестве источника зондирующего излучения в сенсорных системах различного типа, например, в лидарах (получение информации об удалённых объектах с помощью активных оптических систем), использующих явления отражения и рассеяния света в прозрачных и полупрозрачных средах, и рефлектометрах (измерение параметров волоконно-оптических линий и окружающей среды) [1, 2]. Иттербиевый волоконный Q-Switched лазер, как и твердотельные лазеры на кристаллах, излучает на длине волны ~1,06 мкм, что обеспечивает лучшее взаимодействие излучения с металлами в отличие, например, от CO<sub>2</sub>-лазера, излучающего на длине волны 10,6 мкм. В качестве усиливающей среды волоконных лазеров используются волоконные световоды на основе кварцевого стекла, легированные такими редкоземельными элементами как Nd, Yb, Er, Ho, Tm. В Q-switched лазерах внутри резонатора, помимо активной среды, находится оптический переключатель, который модулирует потери в резонаторе – обычно используются электрооптические либо

акустооптические модуляторы с волоконным вводом-выводом излучения, однако существуют и другие устройства, позволяющие модулировать внутриволноводные потери.

Работы по исследованию режимов генерации в волоконных лазерах с модуляцией добротности резонатора были начаты еще в 1980-х годах, когда была построена модель формирования импульса в оптоволоконном резонаторе [3]. Позднее были созданы мощные лазеры, излучающие в инфракрасном диапазоне с большой пиковой мощностью, которые применяются главным образом в микрообработке материалов. Генерация гармоник излучения таких лазеров позволила бы существенно расширить их возможности, однако работы в этом направлении в литературе практически не описаны. Это может свидетельствовать о наличии эффектов, препятствующих эффективной генерации гармоник полностью волоконного лазера с модуляцией добротности. Обычно для генерации гармоник используются гибридные схемы типа «твердотельный/полупроводниковый задающий лазер + волоконный усилитель» [4,5] либо непрерывный узкополосный задающий волоконный лазер с последующей амплитудной модуляцией и усилением в широкоапертурном волокне [6]. Полностью волоконная схема может дать ряд преимуществ в сравнении с гибридными благодаря тому, что задающие волоконные лазеры имеют более широкую линию усиления [1] по сравнению с лазерами на кристаллах или полупроводниках, в пределах которой возможна плавная перестройка длины волны излучения при относительной простоте и высокой стабильности. Однако при больших пиковых мощностях в оптоволоконном волокне возникают нелинейные эффекты, приводящие к заметному уширению спектра, что снижает эффективность удвоения частоты излучения волоконных лазеров. Для увеличения эффективности генерации гармоник требуется научиться управлять формой спектра генерации мощных волоконных лазеров с модуляцией добротности.

### Цель работы

Исходя из вышесказанного, цель работы была сформулирована следующим образом: исследование механизма уширения и возможностей оптимизации выходного спектра волоконных лазеров с модуляцией добротности резонатора для различных применений.

### Основные задачи

Основные задачи, которые необходимо было решить для достижения цели работы:

1. Исследование механизмов уширения спектра в мощном иттербиевом Q-Switched лазере, состоящем из задающего волоконного лазера и усилителя.
2. Разработка методов управления спектром генерации волоконных импульсных лазеров с модуляцией добротности резонатора.
3. Разработка методов перестройки частоты генерации волоконных Q-Switched лазеров.
4. Создание мощного иттербиевого Q-Switched лазера и его применение для обработки материалов.
5. Генерация второй и третьей гармоник излучения иттербиевого Q-Switched лазера с узким спектром.
6. Создание эрбиевого Q-Switched лазера с управляемым спектром в полностью волоконной схеме резонатора и его применение в сенсорных системах.

### Научная новизна работы

Впервые построена модель уширения спектра вследствие фазовой самомодуляции (ФСМ) в волоконном усилителе для некогерентных наносекундных импульсов с произвольной формой огибающей интенсивности по времени и по частоте. Показано, что модель хорошо описывает экспериментальные спектры на выходе усилителя мощного волоконного лазера с модуляцией добротности: форма спектра усиленного сигнала имеет двухмасштабный профиль с узкой центральной частью, копирующей входной спектр, и широкими «крыльями» из-за ФСМ в усилителе.

Установлено, что уширение спектра мощного волоконного лазера с модуляцией добротности резонатора вследствие ФСМ существенно снижает эффективность генерации гармоник в нелинейных кристаллах. Поэтому ожидаемая квадратичная зависимость эффективности преобразования от входной пиковой мощности не наблюдается, а вместо этого существует оптимальное ее значение (при постоянной энергии импульса), при котором эффективность генерации второй и третьей гармоник (ГВГ и ГТГ) достигает своего максимума. Этот оптимум определяется величиной спектрального уширения, растущей с увеличением пиковой мощности за пределы спектральной ширины синхронизма нелинейного кристалла.

### Практическая значимость

Продемонстрирована возможность достаточно эффективной ГВГ и ГТГ с полностью волоконным источником ИК излучения на основе иттербиевого лазера с модуляцией добротности резонатора. За счёт оптимизации формы и спектра импульсов ИК волоконного лазера с модуляцией добротности достигнута энергия

более 60 мкДж в импульсе для второй (532 нм) и около 10 мкДж для третьей (355 нм) гармоник при частоте повторения 1 кГц, что соответствует эффективности преобразования энергии ИК импульсов на уровне 20% и 3% в зелёную и УФ область соответственно. Расширение спектрального диапазона генерации за счёт плавной перестройки частоты и генерации гармоник излучения существенно увеличивает возможности применения мощного волоконного лазера с модуляцией добротности резонатора, например, в микрообработке материалов.

Создан волоконный эрбиевый лазер с электрооптической модуляцией добротности, генерирующий излучение на длине волны окна прозрачности стандартного телекоммуникационного волокна (1.53 мкм), что совместно с применением волоконных ответвителей для фильтрации стоксовой и антистоксовой компонент комбинационного рассеяния позволило реализовать полностью волоконную схему измерения температуры вдоль одномодового волокна длиной до 10 км. Достигнутое пространственное разрешение такого сенсора составило 10 м, а температурное – 2°C.

#### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Уширение спектра мощного волоконного лазера с модуляцией добротности связано с фазовой самомодуляцией при распространении задающего импульса в усиливающем волокне. Выходной спектр описывается в модели входных импульсов со случайными модами при произвольной форме временной и спектральной огибающих.
2. Спектром мощных волоконных иттербиевых лазеров с модуляцией добротности можно управлять: перестраивать центральную частоту, менять форму спектра, генерировать гармоники излучения, – оптимизируя таким образом режим генерации под конкретные применения.
3. При заданной энергии импульса волоконного лазера с модуляцией добротности эффективность генерации гармоник излучения имеет оптимум по длительности импульса, определяющийся балансом роста интенсивности и уширения спектра за пределы области синхронизма кристалла.
4. Используя эрбиевый волоконный лазер с модуляцией добротности резонатора и спектральные фильтры на основе волоконных ответвителей, можно реализовать полностью волоконную схему измерения температуры вдоль стандартных оптоволоконных линий длиной до 10 км.

### Личный вклад

Автор принимал непосредственное участие в проведении экспериментов, выполнил расчеты уширения спектров в волоконных усилителях и сравнение расчетных спектров с экспериментом, провел оптимизацию схемы удвоения и утроения частоты волоконного лазера с модуляцией добротности.

### Апробация работы

Основные положения и результаты диссертации представлялись устными докладами на конференции «Оптика и Фотоника 2008» (Новосибирск, 2008), III Всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине» (Новосибирск, 2009), Международном семинаре по физике лазеров LPHYS'09 (Барселона, Испания, 2009), Международном симпозиуме ISMTII-2009 (Санкт-Петербург, 2009), Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО 2009 (Пермь, 2009), IV Российском семинаре по волоконным лазерам (Ульяновск, 2010), конференции «Фотоника и оптические технологии» (Новосибирск, 2010), Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО 2011 (Пермь, 2011). Результаты работ также докладывались на семинарах Института автоматизации и электрометрии СО РАН.

### Публикации

Соискатель имеет 19 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 7 работ [A1-A7], опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией, 3.

### Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 119 страницах, содержит 50 рисунков. Список литературы состоит из 112 наименований.

## **Содержание работы**

### Введение

Во введении изложена история исследований по теме волоконных лазеров и волоконных лазеров с модуляцией добротности резонатора, обоснована актуальность темы, определены цели и задачи, сформулирована научная новизна диссертационной работы, приведены основные положения.

## Глава I

В главе I обсуждаются основные принципы работы и устройство волоконного лазера с модуляцией добротности резонатора. В §1 приведены основные сведения о таких компонентах волоконных лазеров, как пассивные и активные волокна, модуляторы интенсивности (электро-оптический и акустооптический модуляторы) и их типичные характеристики. Также дается детальное описание различных конфигураций Q-Switched лазеров, исторический анализ численных и аналитических моделей, использующихся для расчета и оптимизации импульсных волоконных лазеров и усилителей. В §2 показано, что длина волны отражения волоконной брэгговской решетки (ВБР) зависит от внешних условий, таких как температура и давление. Это позволяет использовать брэгговские решетки в сенсорных системах, а также в качестве селектора частоты перестраиваемых лазеров.

Как известно, стекло является сильно нелинейным веществом и это, в частности, сказывается на параметрах работы мощных лазеров. Так, например, даже при использовании спектральных элементов, сужающих линию генерации лазера, при высоких мощностях все равно происходит значительное уширение спектра. Для создания лазерных систем требуется достаточно точно рассчитать величину этого уширения, а это в свою очередь требует построения физической модели, в полной мере характеризующей нелинейные процессы, происходящие в оптическом волокне. Существует несколько основных механизмов уширения спектральных линий лазерной генерации, описывающих процессы в непрерывных и импульсных волоконных лазерах, которые рассмотрены в §3. Так, например, в [7] впервые было аналитически описано турбулентное уширение спектра вследствие четырехволнового смешения в длинном ВКР-лазере с непрерывным излучением, которое, однако, не подходит для случая импульсных лазеров с большой пиковой мощностью и коротким резонатором, где влиянием дисперсии можно пренебречь и вклад в уширение спектра дают уже другие нелинейные процессы, которые требуют нового подхода к данной проблеме.

Для описания задающего осциллятора с модуляцией добротности обычно применяется модель некогерентного импульсного излучения, т.е. когда в генерацию выходит много мод, не синхронизованных по фазе. Спектральное уширение такого импульса в волоконном усилителе обычно оценивается качественно с помощью аналитического выражения для спектральной ширины [8]. Это выражение было получено еще в 1985 году в [9], где рассматривалось уширение спектра импульсов в квазимонохроматическом приближении (когда ширина спектра и длительность импульса связаны соотношением неопределенности – т.н. спектрально-



ограниченный импульс). В этом случае уширение определяется фазовой самомодуляцией в приближении, когда влиянием дисперсии групповых скоростей можно пренебречь. ФСМ вызывает набег фаз, зависящий от интенсивности, тогда как форма импульса во времени остается неизменной. Уширение спектра происходит вследствие зависимости интенсивности и соответственно набега фазы от времени, что означает сдвиг мгновенной оптической частоты от центральной частоты  $\omega_0$  при перемещении вдоль импульса. Существуют работы (см. напр. [10],[11]), где показывается существенное расхождение экспериментальной ширины спектра импульсных волоконных лазеров с теорией [8]. Главная причина упомянутых расхождений, по всей видимости, связана с использованием модели спектрально-ограниченных импульсов, что, очевидно, неприменимо для волоконных лазеров с модуляцией добротности резонатора.

Альтернативный подход развит в статье [12], где описывается модель расчета спектрального уширения за счёт самомодуляции фазы для стохастических мод лазерного излучения. В этом случае предполагается, что импульс имеет прямоугольный профиль огибающей интенсивности по времени с наполнением случайными короткими импульсами. При распространении по волокну происходит самомодуляция фазы такого случайно изрезанного импульса, что приводит к существенному спектральному уширению первоначального сигнала. В данной статье авторы получили аналитическую формулу, которая в принципе позволяет численно рассчитать форму уширенного спектра в случае прямоугольного импульса входного сигнала. Использование в работе [12] прямоугольной формы импульса и специальной функции для описания спектра не позволило сравнить расчет с экспериментальными данными. Можно констатировать, что уширение реальных экспериментальных спектров мощных импульсных волоконных лазеров практически не исследовалось.

Таким образом, существует лишь ограниченное число публикаций, посвященных исследованиям формы спектра генерации полностью волоконных Q-Switched лазеров и его влиянию на эффективность удвоения и утроения частоты генерации. При этом вопрос механизма уширения спектра генерации остается открытым, а текущее представление об уширении спектра в мощных импульсных волоконных лазерах с модуляцией добротности резонатора при пренебрежимо малой дисперсии не позволяет в полной мере аналитически описать этот процесс.

## Глава II

Мощному иттербиевому импульсному лазеру, оптимизированному для микрообработки материалов, посвящена глава II. В §4 описывается задающий осцилля-

тор данного лазера в различных конфигурациях. Также сравниваются два типа лазеров в кольцевой и линейной схемах с пленочным фильтром и волоконной брэгговской решеткой (ВБР) в качестве спектральных селектирующих элементов. В кольцевой схеме резонатора с пленочным фильтром длительность импульса составила 150 нс при частоте повторения 20 кГц и ширине спектра излучения 2 нм. При частоте повторения 100 кГц длительность импульса существенно увеличивается и составляет 500 нс при достаточно узком спектре 0.5 нм. С целью уменьшения длительности импульса был создан линейный резонатор, длительность импульса в котором при частоте повторения импульсов 20 кГц составила 20 нс. Минимальная длительность импульса, которая была достигнута в таком резонаторе при частоте повторения 1 кГц, составила ~ 10 нс. В описываемом лазере в качестве селектора частоты применялась ВБР, которая позволила существенно уменьшить спектральную ширину излучения для дальнейшего удвоения и утроения частоты. На основе лазера с ВБР был создан осциллятор, перестраиваемый в диапазоне длин волн 1060-1080 нм, характеристики которого приводятся. Мощный волоконный усилитель и выходные характеристики усиленного сигнала с узким спектром представлены в §5. Средняя мощность усиленного излучения при частоте повторения импульсов 1 кГц и мощности диодов накачки усилителя ~20 Вт составила 470 мВт, что соответствует усилению 18.9 дБ. Пиковая мощность составляет при этом 8 кВт, а ширина спектра 0.13 нм, что позволяет производить достаточно эффективное удвоение и утроение частоты выходного излучения. Однако при этом оказалось, что при больших пиковых мощностях в усилителе начинают играть значительную роль нелинейные эффекты, приводящие к значительному уширению спектра, что снижает эффективность преобразования частоты. Модель уширения и сравнение с экспериментальными данными приведены в §6. Впервые построена модель уширения некогерентных наносекундных импульсов. Форма выходного спектра вычисляется из спектральной формы входного сигнала и временной формы импульса по формуле

$$I_{out}(\omega) = G \int dt P(t) \int d\tau \frac{K_{in}(\tau) e^{i\omega\tau}}{\left[1 + (\nu\gamma L_a P(t))^2 (1 - |K_{in}(\tau)|^2)\right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (1)$$

где  $G$  – усиление сигнала,  $\gamma$  – нелинейность,  $K_{in}(\tau)$  – корреляционная функция спектра импульса в предположении случайной фазы мод,  $P(t)$  – огибающая входного импульса  $L_a$  – длина усилителя,  $\nu$  – фактор уширения.

Был проведен расчет и сравнение спектров на выходе усилителя с реально полученными спектрами. Характер уширенных спектров двухмасштабный: в то время как центральная область спектра изменяется незначительно, «крылья» вносят су-

ществительный вклад в итоговую спектральную ширину и имеют экспоненциальный вид. Показано, что при использовании для вычисления формы импульса, описываемой гиперболическим секансом, возможно существенное упрощение вычислений и формула (1) принимает вид

$$I_{out}(\omega) = G \int d\tau \frac{K_{in}(\tau)e^{i\omega\tau} \left[ 1 + \frac{1}{2} (\nu\mathcal{L}_{af}P_0)^2 (1 - K_{in}(\tau)^2) \right]}{\left[ 1 + (\nu\mathcal{L}_{af}P_0)^2 (1 - |K_{in}(\tau)|^2) \right]^{3/2}} \quad (2)$$

На рис. 1 приведены в сравнении экспериментальные и рассчитанные спектры на выходе усилителя. Так как в случае использования в формуле (1) временной огибающей импульса в виде гиперболического секанса двойной интеграл существенно упрощается, то для расчета целесообразно использовать формулу (2).

Построенная модель хорошо согласуется с экспериментальными данными, что позволяет моделировать выходной спектр и процессы генерации гармоник излучения мощных волоконных лазеров с модуляцией добротности.

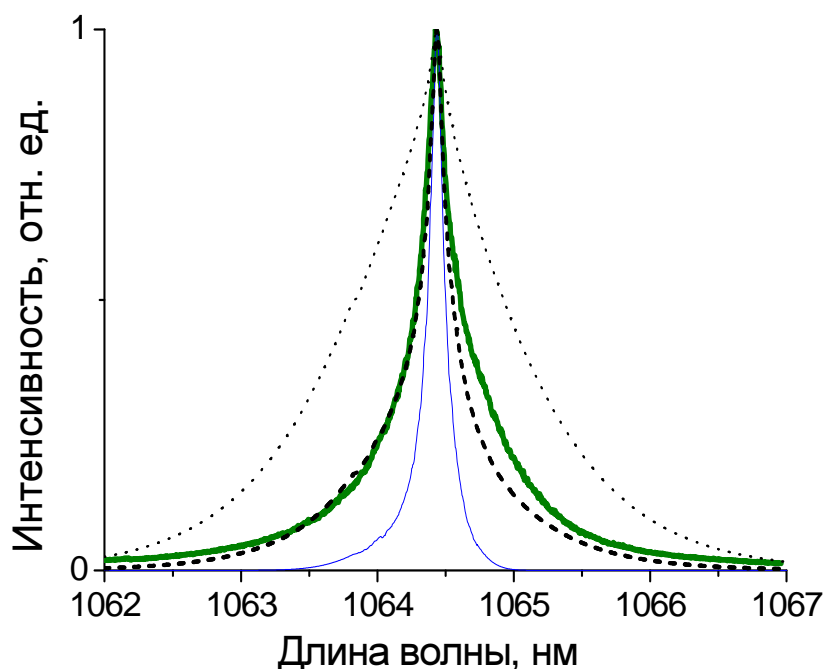


Рис. 1. Спектры волоконного лазера при пиковой мощности импульсов 4 кВт: спектр на входе (тонкая линия) и на выходе усилителя (жирная линия) в сравнении с расчетом для прямоугольной формы импульса [12] (точки) и для гиперболического секанса по формуле (2) (пунктир)

### Глава III

Глава III посвящена исследованию возможности применения разработанных импульсных лазеров для микрообработки материалов. В §7 приводятся результаты

экспериментов и сравнение с классическим  $\text{CO}_2$ -лазером. В ходе работы выполнялась резка электротехнической стали 50 НП различной толщины, а также прецизионная гравировка холоднокатаной листовой стали и стекол со спектральной характеристикой С4 и ИКС-6. Продемонстрирована перспективность применения созданного лазера для выполнения прецизионной обработки материалов. В §8 описывается эксперимент по удвоению и утроению частоты волоконного Q-Switched лазера. Переход в видимый и ультрафиолетовый диапазон значительно расширяет его функциональные возможности при микрогравировке материалов. Было проведено исследование зависимости эффективности удвоения частоты от параметров импульса и получен оптимальный режим (рис. 2). Так как в соответствии с (1) импульсы на выходе усилителя при большой пиковой мощности начинают существенно уширяться по спектру, а «крылья» спектра выходят из области синхронизма удваивающего и утраивающего нелинейных кристаллов, то при заданной энергии импульса существует оптимальное значение пиковой мощности, при котором эффективность ГВГ и ГТГ максимальна. В оптимальных условиях при энергии входных ИК импульсов  $\sim 0,3$  мДж энергия импульсов второй гармоники составила более 60 мкДж, а третьей – более 8 мкДж при частоте повторения 1 кГц. При этом длительность ИК импульса составляла  $\sim 40$  нс, а длительность УФ импульса составила  $\sim 25$  нс. С ростом частоты повторения до 3 кГц при постоянной энергии ИК импульсов энергия импульсов третьей гармоники уменьшалась незначительно, а средняя мощность при этом росла практически линейно с ростом частоты повторения.

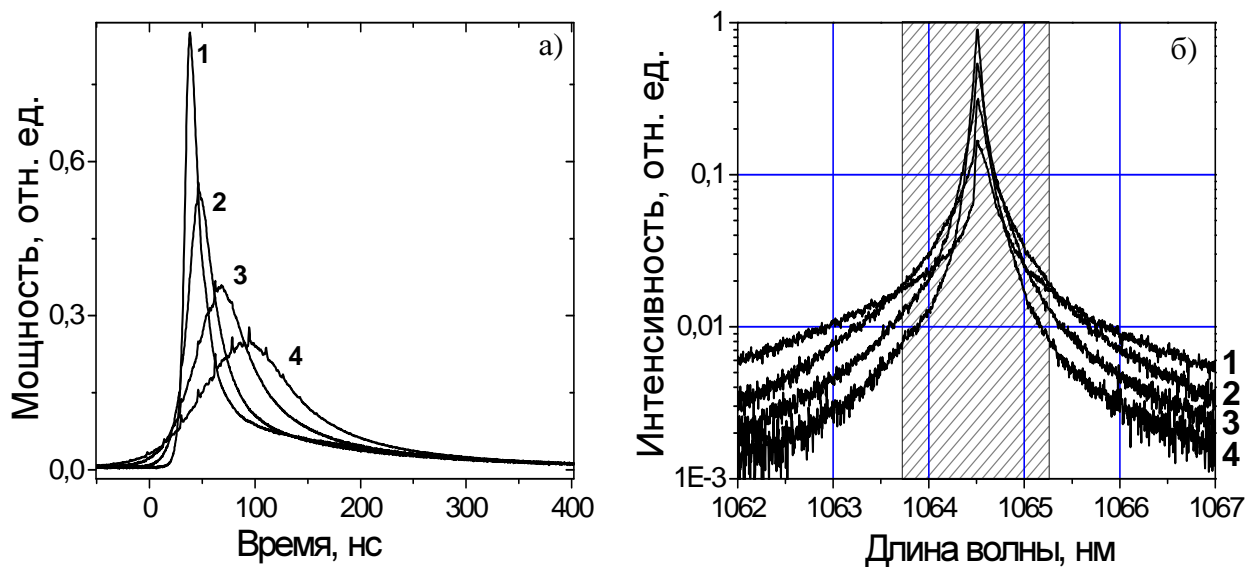


Рис. 2. Импульсы различной длительности: 1 – 15нс, 2 – 30нс, 3 – 60нс, 4 – 100нс на полувысоте (а) и соответствующие им спектры (заштрихованная область – область синхронизма при ГВГ в кристалле КТР) (б)

## Глава IV

В главе IV детально исследуются и описываются выходные характеристики эрбиевого волоконного импульсного лазера для сенсорных применений. Выходные характеристики разработанного эрбиевого лазера с модуляцией добротности резонатора и с ВБР-контролем спектра приведены в §9. В эксперименте применена кольцевая схема резонатора с электрооптической модуляцией добротности с накачкой полупроводниковым лазером. Сужение спектра производится волоконной брэгговской решеткой, записанной на оптимальной для протяженных волоконных датчиков длине волны  $\sim 1.5$  мкм. Выходное излучение лазера дополнительно усиливается волоконным эрбиевым усилителем, так что пиковая мощность на выходе усилителя составляет более 5 Вт при длительности импульса 60 нс. Описание метода измерения температуры на основе комбинационного рассеяния света в оптоволокне, метода калибровки, а также схемы регистрации полностью волоконного датчика приводятся в §10. Показано, что с помощью фильтрации сигнала направленными ответвителями, а также зондировании линии волоконным лазером, можно создать полностью волоконную систему распределенного измерения температуры, имеющую достаточно хорошее температурное и пространственное разрешение. Температурное разрешение при зондировании линии протяженностью 7 километров составило  $2^\circ\text{C}$  (среднеквадратичное отклонение), а пространственное разрешение определялось длительностью импульса и быстродействием регистрирующих фотодиодов (10 МГц) и составило  $\sim 10$  м.

## Заключение

Заключение содержит формулировку результатов данной работы.

## **Основные результаты**

1. Построена модель уширения спектра вследствие ФСМ в волоконном усилителе для некогерентных наносекундных импульсов с произвольной формой огибающей интенсивности по времени и по частоте. Показано, что модель хорошо описывает экспериментальные спектры на выходе усилителя мощного волоконного лазера с модуляцией добротности: форма спектра усиленного сигнала имеет двухмасштабный профиль с узкой центральной частью, копирующей входной спектр, и широкими «крыльями» из-за ФСМ в усилителе.
2. Установлено, что уширение спектра мощного волоконного лазера с модуляцией добротности резонатора вследствие ФСМ существенно снижает эффектив-

ность генерации гармоник в нелинейных кристаллах. Кроме того, на ГВГ и ГТГ значительным образом влияет несимметричная форма импульса с пологим задним фронтом. Показано, что при заданной энергии эффективность ГВГ и ГТГ имеет оптимум по длительности импульса.

3. Продемонстрирована возможность достаточно эффективных ГВГ и ГТГ с полностью волоконным источником ИК излучения на основе иттербиевого лазера с модуляцией добротности резонатора. За счёт оптимизации формы и спектра импульсов ИК волоконного лазера с модуляцией добротности достигнута энергия более 60 мкДж в импульсе для второй гармоники и около 10 мкДж для третьей гармоники при частоте повторения 1 кГц, что соответствует эффективности преобразования энергии ИК импульсов на уровне 20% и 3% в зелёную и УФ область. Расширение спектрального диапазона генерации за счёт плавной перестройки частоты и генерация гармоник излучения существенно увеличивают области применения мощного волоконного лазера с модуляцией добротности резонатора, в частности, в микрообработке материалов.
4. Создан волоконный эрбиевый лазер с электрооптической модуляцией добротности, генерирующий излучение на длине волны окна прозрачности стандартного телекоммуникационного волокна (1.53 мкм), что совместно с применением волоконных ответвителей для фильтрации стоксовой и антистоксовой компонент комбинационного рассеяния позволило реализовать полностью волоконную схему измерения температуры вдоль одномодового волокна длиной до 10 км. Достигнутое пространственное разрешение такого сенсора составило 10 м, а температурное – 2°C.

## **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

- A1. *Кузнецов А. Г., Бабин С. А., Шелемба И. С.* Распределенный волоконный датчик температуры со спектральной фильтрацией направленными волоконными ответвителями // *Квант. электроника* – 2009. – Т. 39, № 11. – С. 1078-1081.
- A2. *Кузнецов А. Г., Бабин С. А., Шелемба И. С.* Распределенный оптоволоконный датчик температуры на основе комбинационного рассеяния света с WDM-фильтрацией сигнала // *Фотон-Экспресс* – 2009. – № 6 – С. 100-101.
- A3. *Babin S. A., Kuznetsov A. G., Shelemba I. S.* Comparison of Raman and fiber Bragg grating-based fiber sensor systems for distributed temperature measurements // *Key Engineering Materials* – 2010. – Vol. 437 – Pp. 309-313.

- A4. *Kuznetsov A. G., Babin S. A.* Q-switched fiber laser with spectral control for frequency doubling // *Las. Phys.* – 2010. – Vol. 20, no. 5. – Pp.1266-1269.
- A5. *Бабин С. А., Кузнецов А. Г., Шелемба И. С.* Сравнение методов измерения распределения температуры с помощью брэгговских решёток и комбинационного рассеяния света в оптическом волокне // *Автометрия* – 2010. – Т. 46, № 4. – С. 70-77.
- A6. *Denisov A. V., Kuznetsov A. G., Kharenko D. S. et al.* Frequency doubling and tripling of a fiber Q-switched laser // *Laser Physics* – 2011. – Vol. 21, no. 2. – Pp. 277–282.
- A7. *Кузнецов А. Г., Бабин С. А., Подивилов Е. В.* Уширение спектра генерации мощных волоконных лазеров с модуляцией добротности вследствие эффекта фазовой самомодуляции // *Фотон-Экспресс* – 2011. – Т. 94, № 6. – С. 56-57.

## Список цитируемых работ

- [1] *Middleton W. E. K., Spilhaus, A. F.* Meteorological instruments // University of Toronto – 3rd ed. – 1953.
- [2] *Matt Young* Optics and Lasers: including fibers and optical waveguides. New York: Springer – 2000.
- [3] *Gaeta C. J., Digonnet M. J. F., Shaw H. J.* Pulse Characteristics of Q-Switched Fiber Lasers // *Journal of Lightwave Technology* – 1987. – Vol. 5, no. 12. – Pp. 1645-1651.
- [4] *Popov S. V., Chernikov S. V, Taylor J. R.* 6-W average power green light generation using seeded high power ytterbium fibre amplifier and periodically poled KTP // *Opt. Commun.* – 2000 – Vol. 174, no. 1-4. – Pp. 231-234.
- [5] *Kliner D. A. V., Teodoro F. D., Koplow J. P. et al.* Efficient second, third, fourth, and fifth harmonic generation of a Yb-doped fiber amplifier // *Opt. Commun.* – 2002. – Vol. 210, no. 3. – Pp. 393-398.
- [6] *Liu A., Norsen M. A., Mead R. D.* 60-W green output by frequency doubling of a polarized Yb-doped fiber laser // *Opt. Lett.* – 2005. – Vol. 30, no. 1. – Pp. 67-69.
- [7] *Babin S. A., Churkin D. V., Ismagulov A. E. et al.* Four-wave-mixing-induced turbulent spectral broadening in a long Raman fiber laser // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2007. – Vol. 24, no. 8. – Pp. 1729-1738.
- [8] *Агравал Г.* Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир – 1996.
- [9] *Pinault S. C., Potasek M. J.* Frequency broadening by self-phase modulation in optical fibers // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 1985. – Vol. 2, no. 8. – Pp. 1318-1319.

- [10] *Ryusuke Horiuchi, Koichi Saiki, Koji Adachi et al.* High-Peak-Power Second-Harmonic Generation of Single-Stage Yb-Doped Fiber Amplifiers // *Optical Review* – 2008. – Vol. 15, no. 3. – Pp. 136-139.
- [11] *Feldman S. F., Staver P. R., Lotshaw W. T.* Observation of spectral broadening caused by self-phase modulation in highly multimode optical fiber // *Applied optics* – 1997. – Vol. 36, no. 3. – Pp. 617-621.
- [12] *Manassah J. T.* Self-phase modulation of incoherent light revisited // *Opt. Lett.* – 1991. – Vol. 16, no. 21. – Pp. 1638-1640.



**КУЗНЕЦОВ АЛЕКСЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ УШИРЕНИЯ СПЕКТРА ГЕНЕРАЦИИ  
ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ С МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ РЕЗОНАТОРА**

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Подписано в печать 03.11.2011. Заказ № . Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано «Документ-Сервис», 630090,  
Новосибирск, Институтская 4/1, тел. 335-66-00