

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Гайнова Владимира Владимировича «Оптическая интерферометрия кварцевого волоконного световода легированного редкоземельными ионами в условиях генерации лазерного излучения» по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

### 1. Актуальность темы диссертации

определяется широким использованием волоконных лазеров в науке, технологии и медицине. Однако при мощностях лазерного излучения более 100 Вт для иттербиевых лазеров и меньших значений для волоконных лазеров на основе других редкоземельных ионов происходит сильный нагрев и, как следствие, изменение свойств активной среды. Поэтому для создания и эксплуатации волоконных лазеров необходимо знать температуру активной среды во время работы. Несмотря на важность этой задачи вплоть до настоящего времени не было предложено надежных прямых методов измерения температуры активного волокна. Тематика исследований диссертационной работы В.В.Гайнова связана с разработкой метода волоконной интерферометрии для прямого измерения температуры в сердцевине активного световода в условиях лазерной генерации, и использовании данного метода для исследования зависимости температуры разогрева от мощности накачки, параметров активной среды и теплоотвода.

Таким образом, актуальность темы исследования не вызывает сомнений.

### 2. Новизна результатов

Научная новизна работы определяется тем, что в ней:

- Разработан экспериментальный стенд на основе волоконной интерферометрии для измерения *in situ* эффективной средней по длине температуры в сердцевине активного световода в условиях генерации мощного лазерного излучения, и впервые проведены измерения температуры в этих условиях;
- Впервые экспериментально измерена зависимость эффективного коэффициента теплообмена активного волокна от разности температур волокна и окружающей среды при естественном воздушном конвекционном охлаждении;
- Из сравнения результатов эксперимента с численным моделированием впервые продемонстрирована существенная зависимость разогрева иттербиевого световода от коэффициента нерезонансных потерь в сердцевине волокна, при этом вклад резонансных и нерезонансных потерь в нагрев волокна может достигать сравнимых величин при изменении дифференциальной эффективности лазера менее чем на 8%;

- На основе интерференционного метода с модуляцией накачки впервые экспериментально измерена эффективная разность температур сердцевины и оболочки активного световода в зависимости от мощности накачки, причём вклад электронного и теплового механизма в изменение показателя преломления в данной методике разделяется экспериментально;
  - Впервые проведены измерения изменения показателя преломления при оптической накачке в сердцевине  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$  активных световодов;
- 3. Практическая значимость диссертации определяется тем, что**
- Разработан метод измерения среднего по длине приращения температуры в сердцевине активных волоконных световодов в условиях генерации лазерного излучения, что позволило создать новые методы диагностики состояния активной среды волоконного лазера;
  - Предложена и апробирована методика по измерению эффективного коэффициента конвективного теплообмена световода, а также его зависимости от температуры световода;
  - Предложена методика по измерению средней по длине разности температур сердцевины и оболочки активного волокна в условиях лазерной генерации и выполнены измерения этой величины для  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$  активных световодов с целью определения степени влияния профиля неоднородности температуры на параметры излучения волоконного лазера.
  - Предложена интерференционная методика для исследования кинетики безызлучательных переходов в активных средах на основе легированных кристаллов и стёкол, обладающая технологическими преимуществами для активных сред волоконной геометрии.

#### **4. Оценка содержания диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

**Первая глава диссертации** посвящена анализу литературы и представляет собой подробный обзор физических явлений, лежащих в основе работы волоконного лазера, а также современного уровня технологии мощных волоконных лазеров и усилителей. Описаны спектроскопические характеристики трехвалентных ионов иттербия и эрбия в стекле, а также процессы межцентровой передачи энергии  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$ . Подробно рассмотрены влияние основных тепловых эффектов на характеристики генерации и принципы измерения температуры в активных элементах твердотельных, в том числе волоконных, лазеров. Проанализированы также работы, посвященные численному моделированию распределения температуры по длине световода, указано на допущения относительно модели и используемых количественных величин, не контролируемых экспериментально.

**Во второй главе** представлено описание экспериментального стенда для измерения стационарной температуры разогрева. Подробно описаны методики обработки экспериментальных данных, процедуры калибровки и подготовки исследуемых образцов.

Описаны два варианта экспериментальных установок с использованием интерферометров Маха-Цендера и Майкельсона. Обосновано применение интерферометра Маха-Цендера для случая небольших мощностей накачки, а схемы с использованием интерферометра Майкельсона для произвольных условий накачки и охлаждения. Показано, что схема с использованием интерферометра Маха-Цендера обладает высокой чувствительностью к изменению фазы (из-за изменения температуры волокна) в связи с большой длиной плеч интерферометра. Такая высокая чувствительность обладает и оборотной стороной – для проведения измерений необходимо максимально исключить случайные колебания температуры окружающей среды и вибрации. Поэтому для проведения измерений при произвольных условиях и высокой мощности накачки используется схема с интерферометром Майкельсона при использовании синхронного детектирования с раздельной амплитудной и фазовой модуляцией.

При описании алгоритма измерений и задач, решаемых с использованием описанных экспериментальных установок, уделено также внимание фундаментальному вопросу о соотношении вкладов электронного и теплового механизмов в изменение показателя преломления. Этот вопрос красиво решается с использованием измерения кинетики изменения разности фаз при импульсной накачке.

**В третьей главе** представлены экспериментальные результаты измерения температуры в волоконных лазерах при различных условиях теплоотвода, приведено сравнение с численными оценками и определена зависимость интенсивности теплоотвода от разницы температур волокна и окружающей среды.

Исследования проводились как на установке, созданной на основе интерферометра Маха-Цендера (мощности накачки не более 3,5 Вт для иттербиевого лазера и 5 Вт для иттербий-эрбиевого волокна), так и на установке на основе интерферометра Майкельсона (иттербиевое волокно, мощность накачки более 100 Вт). Определены характеристики тепловыделения в допороговом режиме и показано влияние генерации лазерного излучения на величину тепловыделения. Показано, что больший коэффициент тепловыделения в допороговом режиме связан с поглощением люминесценции в полимерной оболочке.

Следует отметить, что все измерения сопровождаются хорошо выполненным математическим моделированием тепловых процессов, что дает возможность, в частности, определить влияние резонансных и нерезонансных потерь на эффективность нагрева волокна.

**Четвертая глава** посвящена описанию измерений кинетики изменения показателя преломления в активной среде при оптической накачке. Измерения основываются на применении интерферометрической методики с модуляцией мощности накачки, которая была описана в третьей главе. Длительность фронта импульса накачки составляла около 3 мкс, что значительно меньше времени жизни ионов иттербия. Подобные измерения позволяют определить разницу температур между сердцевиной и оболочкой, что влияет на волноводные свойства оптического волокна, а также определить относительный вклад электронного и теплового механизмов в изменение показателя преломления.

Измерения были проведены для иттербиевых и иттербий-эрбиевых активных волокон. Для иттербиевых волокон было показано, что вплоть до порога генерации основным механизмом, отвечающим за изменение показателя преломления, является электронный, а выше порога генерации – тепловой. Экспериментальные зависимости кинетики разности фаз для иттербий-эрбиевого лазера являются более сложными для интерпретации, что связано с большим значением квантового дефекта. Вследствие этого вклад теплового механизма является значительным также и в допороговом режиме.

В последнем разделе данной главы рассматривается применение интерференционной методики для исследования безызлучательных переходов. Возможности методики продемонстрированы на примере измерения вероятности безызлучательных переходов с уровня  $^4I_{11/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$  при возбуждении на длине волны 979 нм. Показано, что интерферометрический метод измерения кинетики безызлучательного перехода обладает рядом преимуществ. В частности, необходимая чувствительность фотоприёмника определяется диапазоном изменения разности фаз при селективном импульсном возбуждении и интенсивностью зондирующего излучения, которую можно сделать достаточно большой для проведения точных измерений.

Таким образом, можно выделить следующие наиболее значимые результаты работы:

1. В работе предложен экспериментальный метод измерения средней по длине волокна температуры в сердцевине активного волоконного световода в условиях мощной лазерной генерации. Метод основан на использовании оптической схемы волоконного интерферометра Маха-Цендера, либо интерферометра Майкельсона, в одно из плеч которого помещена активная схема волоконного лазера.

2. Разработан автоматизированный экспериментальный стенд по измерению стационарного приращения температуры при оптической накачке волоконного лазера.

3. Выполнены измерения абсолютной величины и скорости приращения средней по длине волокна температуры  $\text{Yb}^{3+}$ - и  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ -световодов в стационарном тепловом режиме при различных условиях

теплоотвода. Продемонстрированы особенности теплового режима волокна вблизи порога генерации и предложено их объяснение.

4. Экспериментально продемонстрирована зависимость коэффициента конвекционного теплообмена от разности температур волокна и окружающей среды.

5. На основе интерферометрических измерений с модуляцией мощности накачки произведена оценка средней по длине волокна разности температур сердцевин и оболочки в зависимости от мощности накачки.

6. Определен вклад электронного и теплового механизмов в изменение показателя преломления сердцевин активного световода. По результатам измерений в допороговом режиме определены величины разности поляризуемостей основного и метастабильного уровней активных ионов  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$  на длине волны зондирующего излучения.

7. Предложено применение интерференционной методики для исследования кинетики безызлучательных переходов в активных средах твердотельных и волоконных лазеров.

### **5. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций**

Диссертационная работа представляет целостное исследование. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации В.В.Гайнова, являются обоснованными. Достоверность выводов и рекомендаций обсуждается автором в тексте диссертации, подтверждается их сравнением с известными из литературы теоретическими и экспериментальными результатами. Новизна научных положений, сформулированных автором, не вызывает сомнений.

### **6. Публикации, отражающие основное содержание диссертации**

Основные результаты диссертации изложены в 23 публикациях, в том числе 5 статей в научных журналах, которые включены в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций. В публикациях достаточно полно отражены главные результаты диссертации.

### **7. Автореферат**

Автореферат полностью соответствует диссертации и опубликованным по ней работам.

### **8. Замечания по работе**

По работе и тексту диссертации можно сделать следующие замечания:

- следовало бы более четко определить влияние именно электронной составляющей изменения показателя преломления на работу волоконного лазера;
- в описании методики измерения кинетики безызлучательной релаксации с помощью регистрации электронной составляющей изменения показателя преломления (Глава 4) практически не проведено сравнение с

существующими спектроскопическими методиками, преимущества предлагаемой методики слабо обоснованы. Следовало бы более подробно провести сравнение и более аккуратно показать преимущества и недостатки предлагаемой методики.

Тем не менее, перечисленные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

### 9. Заключение

Диссертация В.В.Гайнова является законченным исследованием, выводы основаны на большом и достоверном экспериментальном материале. Выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, хорошо обоснованы, обладают научной новизной и представляют как научную, так и практическую ценность. Сочетание научной новизны, достоверности результатов и практической значимости позволяет заключить, что диссертация В.В.Гайнова представляет собой законченную научно-квалификационную работу и отвечает критериям, установленным в п. 9-11, 13-14 Положения о порядке присуждения учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор, Гайнов Владимир Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика».

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией активных  
сред твердотельных лазеров  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института общей физики им. А.М.  
Прохорова РАН (ИОФ РАН)



В.Б. Цветков

ФИО: Цветков Владимир Борисович  
Почтовый адрес:  
119991, Москва, ул. Вавилова, 38  
Рабочий телефон: +7(499)503-8274  
E-mail: tsvetkov@lsk.gpi.ru

Подпись В.Б. Цветкова заверяю:  
Ученый секретарь ИОФ РАН



Н. Андреев