

## УТВЕРЖДАЮ

заместитель директора по научной работе  
Федерального государственного  
бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской  
академии наук», д.ф.-м.н., член-  
корреспондент РАН, Е.А. Хазанов



20 октября 2018 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН) на диссертационную работу Трикшева Антона Игоревича "Когерентное сложение лазерных пучков волоконных лазеров", представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 - Лазерная физика

Диссертационная работа Трикшева А.И. посвящена экспериментальным исследованиям гибридных лазерных систем, включающих лазерные диоды и волоконно-лазерные усилители. Значительное внимание работе уделено исследованию когерентного сложения излучения многоканальных волоконно-лазерных итербиевых усилителей. Актуальность диссертационной работы определяется требованиями создания лазеров с высокой средней мощностью генерации (от нескольких сотен Ватт до нескольких десятков киловатт) и одновременно с высоким качеством пучка излучения, что необходимо для решения технологических задач и в системах специального назначения.

Когерентное или спектральное сложения лазерных пучков, активно развиваемые в последние годы, привели к значительному росту мощности волоконных и твердотельных лазерных систем. Оба метода обладают своими преимуществами и недостатками и оптимального решения до настоящего времени не найдено. Поэтому работа, направленная на создание гибридных лазерных систем и изучение методов когерентного сложения лазерных пучков и исследование физических проблем, возникающих при реализации

этого подхода, является без сомнения актуальной. Практическая ценность работы заключается в том, что результаты исследований имеют широкий круг возможных применений (например, для создания лидаров для дистанционного зондирования ветровых потоков, осуществления климатических наблюдений и повышения безопасности полетов самолетов в условиях возмущенной атмосферы; создания лазерного детектора гравитационных волн, а также для удаленного лазерного воздействия на конструкционные материалы).

### **Оценка содержания диссертационной работы и результатов.**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 139 страниц, включая 90 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 108 наименований.

Во введении сформулированы цели и задачи исследований, обоснована актуальность работы. Кратко рассмотрено состояние вопроса на момент начала исследований, сформулированы защищаемые положения, научная новизна работы и ее практическая ценность, описаны основные результаты работы и вклад автора в решение поставленных задач.

Первая глава диссертации носит обзорно-аналитический характер. Рассматривались две группы методов сложения лазерных пучков: когерентные и некогерентные. В данной работе была выбрана полностью волоконная схема когерентного сложения с использованием опорного канала для анализа фазы каждого рабочего канала. Проведен обзор и анализ компонентной базы для создания подобных систем. Описаны конструкции узкополосных задающих генераторов, произведен обзор активных волокон для каскадов усиления.

Вторая глава посвящена описанию гибридного одночастотного лазера с выходной мощностью излучения до 3 Вт. Представлены результаты исследования параметров излучения задающего генератора, а также результаты исследования влияния двухкаскадного волоконного иттербиевого усилителя на данные параметры. Приведены результаты по оптимизации рабочих параметров.

Третья глава содержит результаты исследований системы когерентного сложения семи лазерных каналов. Описан принцип фазовой подстройки каналов, основанный на синхронном детектировании сигнала, полученного при сложении выходного и опорного излучения. Представлено описание схемы когерентного сложения семи лазерных каналов. Приведены исследования по возможности масштабирования системы. Приведен сравнительный анализ полученных экспериментальных результатов с теоретическим расчетом.

В четвертой главе представлены исследования одночастотного гибридного лазера на коническом волокне с выходной мощностью до 160 Вт. Исследовано влияние каскадов усиления на излучение задающего генератора. Представлены результаты исследования по оптимизации усилительных каскадов. Показано, что лазерная система на основе конического волокна позволяет решить вопрос о создании полностью волоконной одночастотной лазерной системы с выходной мощностью до нескольких сотен Ватт, однако существующие сложности вовводу излучения накачки и создания полностью волоконной лазерной системы требуют рассмотрения альтернативных вариантов мощных усилителей.

Пятая глава содержит результаты исследований одночастотного гибридного лазера на основе волокна с широким полем моды (LMAволокна) с выходной мощностью до 120 Вт. Также представлено исследование двухканальной системы когерентного сложения, рабочие каналы которой представляют собой гибридные лазеры на основе LMA волокна. В главе показано решение проблемы согласования волокон разных диаметров путем с помощью модового адаптера, который представлял собой волокно конической формы, с плавным изменением диаметра сердцевины.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные автором в ходе проведенных исследований.

**В качестве основных результатов работы можно выделить следующие:**

- 1) создан гибридный одночастотный лазер мощностью 2,5 Вт на основе двухкаскадного волоконного усилителя и задающего одночастотного полупроводникового лазерного диода с волоконной брегговской решёткой. Ширина линии генерации составляла 2,4 МГц;
- 2) разработана и создана гибридная одночастотная лазерная система мощностью 130 Вт на основе GTWave-волокна и волокна конической формы;
- 3) создана гибридная одночастотная лазерная система на основе 4-х каскадного волоконного усилителя мощностью 120 Вт на основе GTWave-волокна и волокна с широким полем моды;
- 4) предложена и разработана система контроля и управления фазой излучения с использованием оптоволоконных корректоров фазы с пьезоэлектрическим управлением с быстродействием 0,1 с. Продемонстрированы двух- и семиканальная лазерные системы с когерентным сложением каналов с суммарной выходной мощностью до 60 Вт и 35 Вт соответственно.

По результатам работы получен патент RU 2488862 C1 "Способ когерентного сложения лазерных пучков с синхронным детектированием и устройство для когерентного сложения лазерных пучков с синхронным детектированием".

**Результаты** диссертационной работы **являются новыми, имеют научную и практическую значимость.** Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы к использованию в научно-исследовательских организациях, занимающихся разработками лазеров с высокой средней мощностью, таких как ИПФ РАН, ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ, ГОИ им. С.И. Вавилова, АО «НИИ «ПОЛЮС» ИМ. М.Ф.СТЕЛЬМАХА», МГТУ им. Н. Э. Баумана, ООО «НТО «ИРЭ-Полюс».

**Достоверность полученных в результатов** обусловлена проведенными расчетами наряду с экспериментами, использованием современного измерительного оборудования и общепринятых методов проведения экспериментов.

**В качестве замечаний** к представленной Трикшевым А.И. диссертации можно отметить следующее.

1) Одним из главных целевых параметров систем когерентного суммирования является их быстродействие, позволяющее компенсировать фазовые шумы в полосе частот 10-100 кГц. Быстродействие системы когерентного сложения, представленной Трикшевым А.И., ограничено временем  $\sim 100$  мс. В этом случае следовало бы более подробно обсудить ограничения, которые накладывает ограниченное быстродействие на использование системы в реальных условиях.

2) Важным показателем системы когерентного сложения является также её эффективность, определяемая отношением когерентно-суммируемой мощности к полной мощности. Оценка эффективности когерентного сложения в диссертации отсутствует.

3) Для лазерных систем с оконечным усилителем на коническом волокне (с выходной мощностью до 160 Вт) или с усилителем на основе волокна с широким полем моды (с выходной мощностью до 120 Вт) принципиальным вопросом является качество пучка выходного излучения. Однако этот вопрос в диссертации не обсуждается.

4) Для гибридных систем с задающим генератором на основе лазерных диодов и волоконных усилителей было бы полезно указать пороговые уровни мощности накачки, при которых усиленное спонтанное излучение, распространяющееся навстречу сигналу, способно привести к самовозбуждению системы и разрушению лазерного диода и/или изолятора.

Указанные замечания не снижают высокой оценки диссертации Трикшева А.И., а направлены на более полное раскрытие полученных результатов.

### **Заключение**

Подводя итог вышесказанному, можно утверждать, что диссертационная работа Трикшева А.И. представляет собой законченное научное исследование, выполненное на

актуальную тему, характеризующееся новизной и практической значимостью результатов. Выводы диссертационной работы основаны на результатах, полученных автором лично. Содержание диссертационной работы соответствует указанной специальности, а автореферат полностью отражает ее содержание. По материалам диссертации автором опубликовано 6 статей в ведущих профильных российских и зарубежных рецензируемых журналах из списка ВАК. Результаты докладывались на всероссийских и международных конференциях.

Диссертационная работа Трикшева А.И. соответствует требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 02.08.2016), а ее автор Трикшев Антон Игоревич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 - Лазерная физика.

Доклад по диссертации заслушан на семинаре отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН «23» октября 2018 г.

Отзыв составил

В.н.с. ИПФ РАН,

д.ф.-м.н. по спец. 01.04.21 - Лазерная физика

тел. 7(831) 416-49-47

antipov@appl.sci-nnov.ru



Антипов О.Л.

26.10.2018

**Сведения о ведущей организации.**

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, 46.

Контактный телефон: +7(831) 436-86-10

Интернет-сайт: <http://www.iapras.ru>, email: [igor@appl.sci-nnov.ru](mailto:igor@appl.sci-nnov.ru)

*С отзывом ознакомлен  
29.10.2018*