

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента Мелькумова Михаила Александровича  
на диссертационную работу Коптева Максима Юрьевича  
«Разработка перестраиваемого полностью волоконного источника  
фемтосекундных импульсов на основе гибридной Er-Tm лазерной системы»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 1.3.19 - «Лазерная физика»

### **Актуальность темы диссертации**

Волоконные лазеры и усилители играют важную роль в жизни современного общества. Их использование привело к революции в оптоволоконных телекоммуникациях, упростило различные этапы промышленного производства от изготовления до маркировки, они широко применяются в медицине, метрологии, научных исследованиях и многих других приложениях. На данный момент подавляющее большинство используемых и производимых волоконных лазеров и усилителей основаны на активных световодах, легированных редкоземельными элементами. Данное обстоятельство, в немалой степени, обусловлено тем, что в таких световодах часто сравнительно легко достигаются концентрации активных центров, достаточные для реализации лазеров, способных работать при накачке в оболочку, что позволяет достигать высоких средних мощностей работы или энергии в импульсе, в тоже время сохраняя высокое качество излучения.

Тем не менее, остаются отчасти нерешенными некоторые задачи важные в том числе для практических применений данных устройств, а именно: повышение энергии и пиковой мощности в импульсе, например на 1.55 мкм для эрбиевых световодов, концентрация активных ионов в которых ограничена явлением кластеризации и апконверсии, а также расширение спектрального диапазона работы таких лазеров, которые без привлечения специальных схем нелинейного преобразования дают выходное излучение только в областях усиления используемых редкоземельных ионов.

Диссертационная работы Коптева М.Ю. посвящена методам повышения пиковой мощности и энергии в импульсе в эрбиевых лазерах и усилителях, а также вопросам получения перестраиваемых по длине волны импульсов и получению импульсов со сверхшироким спектром - генерации суперконтинуума в области 1,5-3 мкм при сохранении высокого пространственного качества выходного излучения.

Таким образом, нет сомнений, что тема диссертации, ее общая направленность и полученные результаты имеют высокую актуальность как для современной лазерной физики, так и для различных применений.

**Содержание работы, степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна**

В диссертации Коптева М.Ю. проанализированы и обоснованы возможные пути повышения пиковой мощности волоконных эрбиевых импульсных систем (лазеров и усилителей) с помощью двух основных приемов - понижения нелинейности в световоде путем увеличения диаметра его сердцевины (световоды с большим полем моды - LMA и конусные световоды) и использование усиления растянутых импульсов (CPA). Рассмотренные в работе подходы повышения пиковой мощности позволяют сохранить высокое качество выходного излучения, что весьма важно для многих применений.

В работе исследуется возможность перестройки фемтосекундных лазерных импульсов с длин волн 1.55 мкм и 2 мкм в длинноволновую часть спектра с помощью рамановских солитонов, а также исследуется возможность получения широкополосного спектра - суперконтинуума в теллуритных и высокогерманатных световодах.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

В первой главе проведено исследование использования LMA и конусных эрбиевых световодов с большой сердцевиной для создания импульсных лазеров с большой пиковой мощностью. На основе конусного световода продемонстрирована CPA система с большой пиковой мощностью. Используемые подходы позволяют снизить влияние нелинейных эффектов в волокне и добиться предельно возможных интенсивностей в волокне вплоть до мощности самофокусировки излучения. В полностью волоконном режиме автором получены фемтосекундные импульсы с близкой к рекордному значению пиковой мощностью в 165 кВт. Также в первой главе была продемонстрирована волоконная CPA система, основанная на активном конусном эрбиевом световоде. В ней импульсы, растянутые до длительности 100 пс, удалось сжать до длительности 500 фс, при этом пиковая мощность на выходе компрессора составила более 10 МВт. Стоит отметить, что автором впервые была продемонстрирована волоконная эрбиевая CPA система, с оконечным усилителем, выполненном на конусном активном световоде.

Во второй главе рассмотрена возможность получения подобных ультракоротких импульсов (УКИ) в более длинноволновом диапазоне с помощью генерации и перестройки в гибридной эрбий-тулиевой лазерной системе, в которой генерировались фемтосекундные импульсы наноджоульного уровня энергии на длине волны 2 мкм. В усилителе на тулиевом

волокне экспериментально показана возможность достижения режима генерации двухцветных оптически синхронизированных фемтосекундных импульсов, причем один импульс имеет длину волны около 2 мкм, а второй может быть перестроен в диапазоне 2.15-2.3 мкм с помощью изменения уровня мощности накачки тулиевого усилителя.

В третьей главе проведено экспериментальное исследование процессов нелинейного преобразования излучения в средний ИК диапазон в германатных и теллуритных световодах. В качестве задающего генератора была использована, разработанная во второй главе, эрбий-тулиевая лазерная система. Исследуемый германатный световод был выполнен в виде конуса с уменьшающимся по длине диаметром. В нем была продемонстрирована генерация широкополосного суперконтинуума в диапазоне 1.5 – 3 мкм в случае накачки полуторамикронными фемтосекундными импульсами и 2 – 3 мкм при накачке двухмикронными импульсами. Показано, что использование конусного германатного световода, позволяет снизить требования к пиковой мощности импульсов накачки и обеспечить генерацию широкополосного суперконтинуума даже при накачке полуторамикронными фемтосекундными импульсами с энергией несколько наноджоулей. В ходе исследования теллуритного световода с подвешенной сердцевиной, где в качестве накачки также выступала эрбий-тулиевая система, была показана генерация перестраиваемых рамановских солитонов в диапазоне длин волн 1.6 – 2.65 мкм. Также, длительность солитонов на длине волны 2 мкм измерялась методом оптического стробирования с разрешением по частоте, и было показано, что полученные импульсы действительно являются солитонами.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Результаты работы, выносимые на защиту полноценно освещены в диссертационной работе Коптева М.Ю., автореферате, опубликованных статьях, и тезисах и являются научно обоснованными. Достоверность результатов и примененных методов сомнений не вызывает. Полученные результаты обладают научной новизной и имеют практическую значимость для ряда применений, в том числе для задач спектроскопии, дистанционного зондирования атмосферы, атмосферной и космической связи итд.

Диссертационная работа Коптева М.Ю. является законченным научным исследованием. Работа выполнена на высоком профессиональном уровне. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в высокорейтинговых научных журналах (Optics Express, Optics Letters, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics). Автореферат и публикации по теме работы в достаточной мере отражают основное содержание работы и характеризуют полученные автором результаты.

## Замечания по диссертационной работе

Представленная автором работа имеет ясное изложение, а оформление выполнено на хорошем уровне. Однако, по тексту диссертации можно сделать замечания как оформительского характера, так и по содержанию:

- 1) В работе встречаются пунктуационные и орфографические ошибки.
- 2) В целях работы присутствует демонстрация двухцветного режима генерации  $Tm$  усилителя, т.е. режима, который был обнаружен случайно в процессе исследований, что не выглядит последовательно и логично. Кроме того, причины, по которым усилитель работает в таком режиме не обсуждаются.
- 3) Наблюдение самофокусировки для импульсов мощностью 10 МВт не описано в диссертации, а есть только в статье автора. На мой взгляд, в диссертацию следовало бы включить более широкое описание, чем в статье, а не наоборот.
- 4) Автору стоило бы уделить больше места исследованию влияния параметров световодов и их длины на характеристики исследуемых схем лазеров, включая полученные диапазоны перестройки, мощности и т.д. И в целом, на мой взгляд, стоило бы больше внимания уделить факторам, которые ограничивали рост энергии, пиковой мощности и диапазон спектральной перестройки импульсов, а также ширину спектра суперконтинуума. Привести в работе хотя бы общее описание основных влияющих факторов и обсудить степень их воздействия на получаемый результат.
- 5) В работе очень мало внимания уделено обсуждению выбора дисперсии и длины компенсирующих дисперсию волокон, то же самое касается световодов для растяжения импульсов для целей СРА. Не понятны не только критерии выбора параметров и длин световодов, но и были ли они оптимальными для данных схем и насколько.
- 6) В работе не указан анализатор спектра, посредством которого измерены спектры суперконтинуума (1,5-3 мкм), и как проводилась нормировка его чувствительности по длине волны, что может существенно повлиять на форму полученных спектров суперконтинуума и долю мощности вне области накачки.

## Заключение

Перечисленные замечания и недостатки не снижают общей положительной оценки работы, ее научной значимости и новизны. Диссертационная работа Коптева М. Ю. «Разработка перестраиваемого полностью волоконного источника фемтосекундных импульсов на основе гибридной Er-Tm лазерной системы» представляет собой законченную научно-квалификационную работу и отвечает требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. (ред. от 01.10.2018 г.), а ее автор, Коптев Максим Юрьевич, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук,  
заведующий лабораторией Волоконных лазеров и  
усилителей

Мелькумов Михаил

Александрович

24 ноября 2021 г.

Научный центр волоконной оптики им.  
Е.М.Дианова РАН – обособленное подразделение  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Федерального  
исследовательского центра «Институт общей  
физики им. А.М.Прохорова Российской академии  
наук»

г. Москва., ул. Вавилова, д. 38

Тел. +7 (910) 457-27-93

e-mail: [melkoumov@fo.gpi.ru](mailto:melkoumov@fo.gpi.ru)

Подпись М.А. Мелькумова заверяю

Зам. директора по научной работе



Глушков Владимир Витальевич

подпись, печать