

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Бобкова Константина Константиновича

«Одномодовые иттербиевые волоконные импульсные лазеры с предельно высокой пиковой мощностью и факторы, влияющие на их долговременную надежность» представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика»

По мере того как расширяется круг и объем задач решаемых с помощью мощных лазеров возрастает актуальность обеспечения их надежности, долговременной стабильности и воспроизводимости их характеристик. В последние годы все более широкое применение находят волоконные лазерные системы с диодной накачкой, излучающие в *импульсно-периодическом* режиме импульсы фемтосекундного диапазона длительности. Эти полностью твердотельные системы сочетают в себе высокую яркость выходного излучения, эффективность, компактность и дешевизну.

Как правило, такие системы строятся по схеме задающий генератор и усилитель мощности с использованием отмеченный Нобелевской премией за 2018 год метода чирпирования усиливаемого импульса. Обычно такая система имеет несколько каскадов усиления, из которых наиболее энергетически нагруженным является финальный каскад усиления. Вполне логично, что по мере роста энергетики и времени эксплуатации таких лазерных систем именно в этом каскаде в первую очередь проявляются эффекты, влияющие на кратковременную и долговременную стабильность и надежность систем в целом. Исследованию физической природы таких эффектов в импульсно-периодических иттербиевых волоконных лазерных усилителях и разработке принципов и рекомендаций по их преодолению посвящена диссертационная работа Бобкова К. К.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списков цитируемой литературы и публикаций автора.

Во *введении* обоснована актуальность проведения исследований, сформулированы цель работы, задачи, которые решались при выполнении работы, новизна полученных результатов и их практическая значимость, основные защищаемые положения, а так же дана информация об апробации работы.

Первая глава диссертации посвящена обзору литературы по имеющим отношение к исследуемой автором проблеме характеристикам материалов и явлениям. Обстоятельно рассмотрены основные оптические и физико-химические свойства трехвалентных ионов иттербия в матрице кварцевого стекла и их особенности применительно к лазерно-активным световодам. Отмечено появление экспериментальных данных по медленной деградации энергетических характеристик и качества пучка, то есть яркости, выходного излучения импульсно-периодических иттербиевых волоконных лазерных систем при их длительной работе. Значительная часть этой главы посвящена так же обзору «традиционных» нелинейных оптических эффектов, способных повлиять на характеристики лазерного излучения, и типов волоконных световодов и лазерных систем на их основе, конструкция которых позволяет надеяться на снижение влияния такого рода эффектов на характеристики генерируемого/усиливаемого излучения. В этом плане особо выделена задача снижения вклада нелинейных эффектов в мощных волоконных усилителях, использующих отмеченный Нобелевской премией за 2018 год метод чирпирования усиливаемого импульса.

Во *второй главе* представлены результаты исследованию природы явления фотопотемнения в иттербиевых волоконных световодах с сердцевиной на основе

силикатного стекла. В первом параграфе главы проанализированы существовавшие на время начала работы воззрения на природу этого явления, отмечен ряд противоречий в моделях, объясняющих фотопотемнение через образование кислородно-дырочных центров окраски под действием излучения накачки. Выполненный в тесном взаимодействии с технологами цикл исследований спектров поглощения и люминесценции иттербий-содержащих алюмо-, фосфоро- и фосфороалюмосиликатных стеклянных и кристаллической YAG матрицах позволил диссертанту убедительно доказать, что фотопотемнение при воздействии ИК излучения накачки является следствием трансформации возбужденного на верхний лазерный уровень иона трёхвалентного иттербия и окружающих его атомов кислорода в двухвалентный ион иттербия и кислородно-дырочный центр окраски. Полученные результаты позволили объяснить, почему легирование матрицы световода фосфором повышает стойкость иттербиевых волоконных активных сред к фотопотемнению, что является чрезвычайно важным практическим выходом проведенных исследований.

Третья глава диссертации посвящена исследованию природы эффекта постепенного, в масштабе десятков-сотен часов, искажения распределения исходно низшей поперечной моды выходного излучения при долговременной работе усилителя пикосекундных импульсов с суб-мегаваттной пиковой выходной мощностью. Автор обнаружил связь степени искажения моды с модуляцией вдоль волокна интенсивности кооперативной люминесценции трехвалентных ионов иттербия и установил, что

- 1) период этой модуляции соответствует интерференции полей основной и первой высшей мод сердцевины активного световода,
- 2) скорость искажения моды зависит от степени устойчивости материала световода к фотопотемнению.

Поскольку с фотопотемнением материала неразрывно, по Крамерсу-Кронигу, связано изменение его показателя преломления, автор логично предположил, что мощность из фундаментальной моды в первую высшую перекачивается путем дифракции первой на индуцированной решетке показателя преломления, период которой в точности соответствует резонансной перекачке мощности между двумя указанными модами, а необходимый для этого сдвиг фаз возникает из-за теплового эффекта на решетке фотопотемнения. Ключевая роль решетки фотопотемнения в таком взаимодействии подтверждена экспериментально путем прямой регистрации наведенной длиннопериодной решетки показателя преломления в деградировавшем световоде без накачки. Дополнительным подтверждением предложенного механизма деградации основной моды является то, что эффект, являясь стабильным и необратимым при нормальных условиях, исчезает под действием излучения с длиной волны около 500 нм.

Иная, но однозначно связанная с глобальной задачей обеспечения высокой яркости излучения лазерной системы и ее долговременной стабильности, проблема решалась в *четвертой главе* диссертации. Ее суть в оптимизации геометрии иттербиевого конусного световода, предназначенного для работы в качестве конечного усилителя чирпированных импульсов. Задача практической реализации такого усилителя является сложной многопараметрической как с точки зрения обеспечения его лазерно-оптических характеристик, так и в плане технологии его изготовления.

Базируясь на результатах исследований, приведенных во второй и третьей главах диссертации автор обосновывает использование фосфороалюмосиликатной стеклянной матрицы как наиболее стойкой к эффекту фотопотемнения при повышенной концентрации

иттербия. Соответствующие образцы конусных световодов длиной до 2 м и диаметрами входной и выходной апертур сердцевины ~ 10 мкм и 60-80 мкм соответственно вытягивались в НЦВО РАН из заготовок, изготовленных в Институте химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН.

Из всего многообразия нелинейных оптических эффектов, способных повлиять на характеристики излучения на выходе рассматриваемого усилителя, автор выделил и подробно рассмотрел три – насыщение усиления, вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) и фазовую самомодуляцию (ФСМ). При этом предполагается, что из них ФСМ ответственна за появление нелинейного чирпа у усиливаемых импульсов, что, в дальнейшем, негативно сказывается на качестве их сжатия, а ВКР ограничивает максимально достижимую величину пиковой мощности на выходе системы. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования насыщения усиления и ВКР пикосекундных нечирпированных и чирпированных импульсов в созданных активных световодах-конусах показали, что:

1. достаточно высокие а) усиление сигнала, $\sim 10^3$, и б) эффективность преобразования накачки в сигнал, 50-60%, достигаются при средней мощности сигнала на входе усилителя ~ 10 мВт, что на 3-4 порядка меньше мощности входного сигнала, обеспечивающего аналогичные характеристики усиления сигнала в обычном световоде, и
2. при такой средней мощности сигнала на входе усилителя эффективность ВКР не превышает 1% при мощности выходного излучения менее 0,15 МВт на длине волны 1030 нм и 0,3-0,4 МВт на длине волны 1064 нм.

При работе такого усилителя на длинах волн сигнала и накачки 1064 нм и 976 нм соответственно, в комплексе с парой дифракционных решеток, сжимавших усиленные чирпированные 28 пс импульсы до ~ 300 фс, установлено экспериментально, что эффективность и степень сжатия усиленных импульсов и максимальная пиковая мощность сжатых импульсов зависят от средней мощности входного сигнала и частоты повторения импульсов. Показано, что условия реализации максимумов пиковой мощности сигнала непосредственно на выходе из световода-конуса и после компрессора не совпадают. Отмечено, что диапазон мощностей сигнала, в котором это наблюдается ниже порога ВКР и объясняется это эффектом ФСМ. Обнаружен режим усиления, который обеспечивает, после сжатия усиленных импульсов до длительности 315 фс, пиковую выходную мощность 22 МВт, что является рекордом для полностью волоконных усилителей.

Так же автором проведены экспериментальные и теоретические исследования долговременной стабильности и воспроизводимости характеристик излучения реализованных световодов-конусов к эффектам фотопотемнения и деградации моды. Показано, что прогнозируемое снижение его энергетической эффективности не превысит 8% за год (8600 часов) непрерывной работы, и нет никаких признаков деградации основной моды за 250 часов непрерывной работы.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложениях приведены уравнения, путем численного решения которых проведено теоретическое моделирование усиления сигнала, его энергетики, вклада эффекта ВКР и динамики деградации энергетической эффективности усилителя разработанного усилителя.

Считаю, что диссертационная работа Бобкова К. К. представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу, в результате которой:

- Установлен, механизм фотопотемнения в области длин волн лазерной генерации в легированных иттербием кварцевых стеклах под действием излучения накачки и найдены составы стекол с высокой долговременной устойчивостью к фотопотемнению.
- Впервые обнаружен эффект постепенной и необратимой деградации основной поперечной моды на выходе импульсно-периодических волоконных лазеров с высокой пиковой мощностью при относительно небольшой средней мощности и предложен и обоснован механизм его возникновения.
- Разработан уникальный импульсно-периодический волоконный усилитель пикосекундных импульсов на основе иттербиевого световода-конуса с минимизированным вкладом нелинейных эффектов, высокой стойкостью к эффектам фотопотемнения и деградации качества пучка выходного излучения.

Полученные результаты являются оригинальными, и они имеют большую научную и практическую ценность. Их достоверность подтверждается адекватностью использованных методов исследования и созданием работающего устройства – усилителя на основе легированного иттербием конусного волоконного световода – позволившего при работе в импульсно-периодической лазерной системе задающий генератор – стретчер – усилитель – компрессор достигнуть в импульсе субпикосекундной длительности рекордную, для такого типа волоконных лазерных систем, пиковую выходную мощность при высокой долговременной стабильности достигнутых характеристик.

Вместе с тем имеется ряд замечаний, как по содержанию, так и по оформлению диссертации.

1. На мой взгляд, название диссертации не точно соответствует содержанию работы. Более корректно было бы «Одномодовые иттербиевые волоконные импульсные **усилители** с предельно высокой пиковой мощностью **выходного излучения** и факторы, влияющие на их долговременную надежность».
2. Содержание первой главы диссертации не соответствует ее заявленной цели как обзора литературы по теме диссертации. Приведенная в ней информация носит в основном общеобразовательный характер, и, по крайней мере, в части приведенного обзора нелинейных оптических явлений воспроизводит то, что содержится в популярных учебниках.
3. Все исследованные в диссертации эффекты являются свето-индуцированными, то есть по своей сути нелинейными оптическими. Эффективность таких взаимодействий вообще-то определяется интенсивностью, а не мощностью излучения. В тексте диссертации, однако, автор приводит только мощностные характеристики излучения, и только в редких случаях поперечные размеры пучков, что не позволяет провести независимую оценку действующих интенсивностей излучения и эффективности обсуждаемых нелинейных эффектов. Это обстоятельство существенно затрудняет восприятие работы.
4. Предложенный в главе 3 механизм деградации основной моды предполагает наличие некоторого количества высшей моды в исходном состоянии световода, однако автор не приводит никаких данных на этот счет.
5. В тексте имеется целый ряд физически неадекватных и некорректных терминов, фраз и формулировок. Среди них много раз повторяемый термин «порог нелинейных

эффектов», фразы «усилитель обладает дифракционно-ограниченным качеством выходного излучения» на стр.16, «монохроматическое излучение с пиковой мощностью» на стр.34, «ввод излучения в световод с помощью сварочного аппарата» на стр.98, и т.д.

6. Имеется ряд некорректностей в рисунках и подписях к ним. Так подпись к рисунку 9 гласит, что приведен спектр ВРМБ-усиления в кварцевом стекле, тогда как в [39] сказано, что это спектр спонтанного рассеяния, рисунок 42 не соответствует обсуждаемому его тексту на стр.100 и 101 и практически совпадает с рисунком 43, рисунки 50 в главе 4 и 1 в приложении 1 совпадают. На многих рисунках/графиках отсутствует маркировка кривых, нет единообразия в их оформлении, большинство экспериментальных данных приведено без указания погрешностей их измерения.

Отмеченные недостатки, однако, не снижают ценности полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертации в целом.

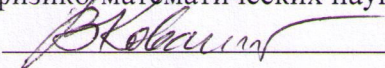
Тема диссертации соответствует специальности 01.04.21 - «Лазерная физика». Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях в рецензируемых журналах, из которых 5 в рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, и доложены на 11 российских и международных конференциях. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

Считаю, что по объему выполненной работы, актуальности, новизне и значимости полученных результатов диссертационная работа Бобкова К. К. полностью соответствует критериям, предъявляемым ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации к кандидатским диссертациям и установленным в п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК», а ее автор, Бобков Константин Константинович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика».

Официальный оппонент,

главный научный сотрудник ФИАН,

доктор физико-математических наук

 / В. И. Ковалёв

«18» января 2019 г.

Подпись В. И. Ковалёва заверяю.

Ученый секретарь ФИАН,

кандидат физико-математических наук

 / А. В. Колобов

«18» января 2019 г.

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН

Тел.: +7 (499)135-42-64, факс: +7 (499)135-78-80

e-mail: scilpi@mail.ru

url: <http://www.lebedev.ru>

*С отзывом Знакомств
18.01.2019 / К*