

## ОТЗЫВ

научного руководителя о диссертации  
Ефремова Владислава Дмитриевича «Исследование эффектов сужения и  
уширения спектров пикосекундных импульсов в волоконных лазерных  
системах», представленной на соискание степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.3.6 «Оптика»

Оптические импульсы пикосекундной длительности нашли своё применение во многих областях, в химических, биологических и физических лабораториях среди новых методов спектроскопии, метрологии и визуализации. Результаты исследований последних лет показывают, что требуемые характеристики могут достигаться и в волоконных лазерах, которые выгодно отличаются относительно низкой стоимостью, компактностью, высоким качеством выходного пучка и разнообразием характеристик выходного излучения. В таких лазерах излучение распространяется внутри оптического волокна, характеризующегося множеством параметров. Для достижения пикосекундной длительности наиболее эффективными являются методы, основанные на использовании искусственных насыщающихся поглотителей — наборе оптических элементов, которые вместе имитируют нелинейное поглощение за счёт нелинейных эффектов третьего порядка в волокне. К исключительно волоконным относятся нелинейное усиливающее петлевое зеркало и насыщающийся поглотитель на основе эффекта нелинейного вращения поляризации. При этом актуальными остаются вопросы о контроле выходных характеристик генерируемых импульсов и поиске их предельных значений, требующие как продуманной постановки эксперимента, так и применения методов численного моделирования.

В начале работы В.Д. Ефремову была поставлена цель провести исследование эффектов уширения и сужения оптических спектров, возникающих при формировании стабильных импульсов внутри волоконных лазерных систем. Для достижения поставленной цели необходимо было решить целый ряд задач:

- *Изучить теоретические основы распространения излучения по оптическому волокну, а также существующие в нём нелинейные эффекты.* Соискателем был проведён исчерпывающий обзор современных работ, касающихся генерации лазерного излучения в волоконных лазерах, и возникающих при этом эффектах. Это позволило сформулировать требования к численным моделям, способным описывать различные конфигурации волоконных лазерных резонаторов.

- *Подобрать или создать подходящий под поставленную цель и доступные ресурсы инструмент для численного моделирования.* В качестве такого инструмента в

итоге была выбрана библиотека PyOFSS на языке программирования Python, значительно модернизированная впоследствии для обеспечения возможности описания лазерных систем, проведения численного счёта по большому числу обходов резонатора до установления стабильного режима по заданным критериям, а также для использования ресурсов графических ускорителей, позволяющих на порядок сократить расчётное время.

- *Провести численное моделирование различных вариантов волоконных лазеров на основе искусственных насыщающихся поглотителей и других методов генерации пикосекундных импульсов.* Наличие гибкого и эффективного инструмента численного моделирования позволило исследовать различные способы генерации пикосекундных импульсов. В том числе была продемонстрирована возможность использовать нелинейное усиливающее петлевое зеркало как спектральный фильтр для подавления пьедестала оптических импульсов. Впервые было проведено масштабное численное моделирование волоконного оптического параметрического генератора (ВОПГ) в чрезвычайно широком диапазоне параметров и показано, что максимальная энергия параметрического импульса может достигать 40 нДж при увеличении длины пассивного волокна в резонаторе до 100 м. Также впервые было выполнено численное моделирование уникальной схемы ВОПГ с двухплечевой синхронной накачкой, предложенной соискателем и показано, что она позволяет существенно расширить область достижимых параметров параметрических импульсов по аналогии с отстроенными фильтрами генератора Мамышева.

- *Определить параметры исследуемых волоконных лазерных систем, оказывающих влияние на ширину спектра.* Это ключевая задача всей работы, поскольку ряд параметров реальных волоконных систем оказываются скрытыми (не поддающимися прямому измерению), например, эффективная функция пропускания искусственных насыщающихся поглотителей или внутрирезонаторная динамика излучения. В рамках настоящей работы численно и экспериментально исследовано две лазерные системы генерирующие узкополосные (0,12 нм) импульсы пикосекундной длительности, и импульсы с высоким параметром чирпа и крайне широким спектром (порядка 60 нм), ограниченным только возникновением ВКР. В первом случае установлено, что главным элементом резонатора, обеспечивающим такой режим генерации, является чирпованная брегговская решётка с рекордно большой аномальной дисперсией (порядка 80 пс<sup>2</sup>). Для второй системы установлено, что столь сильное уширение спектра достигается благодаря уменьшения коэффициента пропускания малого сигнала амплитудного самомодулятора до уровня порядка 1%, что предотвращает переход к многоимпульсным режимам генерации при увеличении мощности накачки.

• Провести сравнение результатов численных исследований с экспериментальными результатами. Для обеих лазерных систем, генерирующих узкополосные импульсы и импульсы с крайне широким оптическим спектром, найдены параметры при которых наблюдается высокое согласие с экспериментом (как по интегральным значениям, так и по спектральным и временным огибающим импульсов) и построены области существования режимов, предсказывающие возможность уменьшения ширины спектра до 0.08 нм, и увеличения до 100 нм соответственно.

Таким образом, В.Д. Ефремов полностью справился с поставленными задачами, выполнив программу исследований на высоком уровне. Очевидным является большой объем проделанной работы. Помимо навыков решения сложных научных задач и работы с современными измерительными приборами стоит отметить и его крайне высокое внимание к деталям и скрупулёзность при анализе результатов. Он зарекомендовал себя как инициативный, высококвалифицированный сотрудник, способный как к экспериментальным, так и теоретическим изысканиям. Всё вышеописанное позволяет сделать вывод о соискателе как о сформированном молодом специалисте, способном самостоятельно решать поставленные исследовательские задачи, а также доступно и понятно представлять результаты полученной работы. Соискатель является автором и соавтором в общей сложности 12-ти индексируемых печатных работ (включая тезисы конференций), 5 из которых опубликованы в рейтинговых рецензируемых журналах.

Результаты В.Д. Ефремова демонстрируют глубокие знания в области нелинейной оптики, физики лазеров и численного моделирования, аккуратность при проведении экспериментов и прекрасную теоретическую подготовку. Выполненная диссертация на тему «Исследование эффектов сужения и уширения спектров пикосекундных импульсов в волоконных лазерных системах» отвечает всем необходимым требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. (ред. от 11.09.2021 г.), а ее автор, Ефремов Владислав Дмитриевич, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 «Оптика».

Ведущий научный сотрудник ИАиЭ СО РАН

к.ф.-м.н.

Харенко Д.С.

подпись к.ф.-м.н. Харенко Д.С. заверяю:

Учёный секретарь ИАиЭ СО РАН

к.ф.-м.н.



Иваненко А.В.