

## ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГУ

### *Тема работы*

Численное изучение режима узкополосной генерации волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью

### *Аннотация*

Работа посвящена изучению узкополосной генерации волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью. При генерации близко над порогом спектр лазеров этого типа представляет собой набор узких (характерная ширина – единицы-сотни килогерц) локализованных мод, характерное время жизни которых составляет единицы-десятки миллисекунд, а положение в спектре случайно. Целью работы является детальное исследование свойств данных мод, в частности – характера зависимости их свойств (время жизни, частота возникновения, пиковая мощность) от параметров волокна, формирующего лазерный резонатор. В первую очередь, требует изучения влияние оптической обратной связи на свойства мод и проявление нелинейных эффектов в характере их возникновения и затухания.

### *Состав коллектива*

Чуркин Дмитрий Владимирович, 43 год, д.ф.-м.н., зав. лаб., проректор по науке, Новосибирский государственный университет, трудовой договор.

Ватник Илья Дмитриевич, 34 года, к.ф.-м.н., н.с., Новосибирский государственный университет, трудовой договор.

Терехов Иван Сергеевич, 43 год, д.ф.-м.н., с.н.с, Институт ядерной физики СО РАН, трудовой договор (совместительство).

Горбунов Олег Александрович, 36 лет, к.ф.-м.н., н.с., Новосибирский государственный университет, трудовой договор.

Кудашкин Дмитрий Вячеславович, 31 лет, м.н.с Новосибирский государственный университет, трудовой договор.

Апрелов Николай Андреевич, лаборант-исследователь, 22 лет, Новосибирский государственный университет, трудовой договор.

Колесникова Алена Юрьевна, м.н.с., 26 года, Новосибирский государственный университет, трудовой договор.

### *Информация о гранте*

Локализация в случайных волоконных лазерах, РНФ 19-12-00318-П.

### *Научное содержание работы*

#### *1. Постановка задачи*

#### *2. Современное состояние проблемы (на момент начала работы)*

#### *3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы*

Ресурсы ИВЦ НГУ использовались для моделирования лазерной генерации в волоконном ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью. Процесс моделирования заключался в численном интегрировании системы нелинейных уравнений Шрёдингера методом разделения по физическим процессам. Уравнения описывали распространение волны накачки и двух волн генерации, распространяющихся в прямом и обратном направлении. В системе были учтены следующие физические процессы: дисперсия второго порядка, линейное затухание, керровская нелинейность, взаимодействие волн накачки и генерации за счет ВКР (без учета фазовых эффектов), для волны генерации – обратное рэлеевское рассеяние, играющее роль оптической обратной связи. Программа была написана на языке C++.

#### *4. Полученные результаты*

Численным моделированием было показано существование режима узкополосной генерации, при котором спектр представляет собой набор узких мод, характерное время жизни которых составляло единицы миллисекунд. Было установлено, что необходимым условием существования узких мод является наличие обратной связи в виде слабого рэлеевского рассеяния, так как при его отсутствии моделировался сплошной относительно гладкий спектр. Было показано, что режим перескакивает на генерацию широкого гладкого спектра при достижении достаточной мощности в моде, соответствующей нелинейному набегу фазы порядка одного радиана. При значениях нелинейного коэффициента, соответствующих экспериментальному, данный режим наблюдался лишь в узкой области вблизи порога генерации (ширина диапазона наблюдения по мощности накачки меньше-порядка 0,1 Вт, при том, что значение мощности накачки на пороге составляла величины порядка 1 Вт). Но при моделировании с искусственно заниженным на два порядка нелинейным коэффициентом данный режим мог наблюдаться и высоко над порогом. Этот вывод хорошо согласуется с ранней аналитической теорией, объясняющей уширение спектра волоконных лазеров влиянием нелинейного эффекта четырехволнового смешения. Известно, что уширение спектра генерации происходит за счет взаимодействия пары

интенсивных мод (либо пары фотонов из одной интенсивной моды – вырожденное четырехволновое смешение) с двумя другими, сумма частот которых равна сумме частот исходных фотонов, в результате которой часть энергии может передаться второй паре мод. Нам удалось проиллюстрировать этот процесс на ранней стадии, показав, что в спектре наблюдается вырожденное четырехволновое смешение, при котором энергия из одной из мод перераспределяется в две другие, расположенные симметрично относительно нее, на протяжении нескольких последовательных обходов. Таким образом, был экспериментально подтвержден механизм четырехволнового смешения как причина затухания узких спектральных мод.

Сравнение с экспериментом было проведено для нескольких типов волокон, образующих лазерный резонатор. При моделировании лазеров на волокне с большим значением дисперсии (SMF, Truewave REACH) было получено хорошее полуквантовое согласие с экспериментом. При моделировании лазера на волокне с низким значением дисперсии (Truewave RS, Truewave XL) согласия с экспериментом не было достигнуто: в эксперименте вообще не наблюдалось режима узкополосной генерации, в то время как в моделировании он проявлялся. Этот факт позволил уточнить физическую модель возникновения узких мод, дополнив ее влиянием кросс-фазовой модуляции волны накачки с узкими модами. Численные оценки показали, что в первом случае разбегание волн накачки и генерации происходит быстро, а во втором – достаточно медленно, так что нелинейный набег фаз при большой дисперсии не достигает значительной величины, а при малой оказывается порядка или больше одного радиана. Это приводит к разрушению модовой структуры излучения и невозможности наблюдения его экспериментально. В численном моделировании же эффект фазовой кросс-модуляции не учитывается ввиду чрезмерных требований к вычислительным ресурсам, поэтому режим генерации мод наблюдается повсеместно.

#### 5. Иллюстрации, визуализация результатов (опционально)

*Эффект от использования кластера в достижении целей работы.*

Все численные расчеты производились с использованием вычислительных ресурсов ИВЦ НГУ. Без их использования проведения полноценного исследования не было возможно, так как быстродействия даже самых современных ПК недостаточно для выполнения требуемого объема вычислений в разумный срок.

*Перечень публикаций, содержащих результаты работы (если есть). Если имеется, указать DOI, импакт-фактор журнала (Thomson Reuters, РИНЦ,...)*

Статьи:

– Горбунов О.А., Ватник И.Д., Подивилов Е.В., Смирнов С.В., Чуркин Д.В. «Численное изучение механизмов генерации и затухания узких спектральных мод в излучении волоконного ВКР-лазера со случайно распределенной обратной связью». *Прикладная фотоника*, т. 10, №5, 2023 (принята в печать) (РИНЦ).

– Ilya D. Vatnik, Oleg A. Gorbunov and Dmitry V. Churkin, «Comparative study of ultra-narrow mode generation in random fiber lasers based on different fiber types». *MDPI Photonics*, 10(11), 1225, 2023. (<https://doi.org/10.3390/photronics10111225>) (impact factor 2.4, Scopus).

– Oleg Gorbunov, Ilya Vatnik, Sergey Smirnov, Dmitry Churkin, «Simulation of narrow generation in a Raman fiber laser with random distributed feedback». *Optics and Laser Technology*, 2023 (submitted) (impact factor 5, Scopus)

Конференции:

– Oleg A. Gorbunov, Ilya D. Vatnik, Sergey V. Smirnov, and Dmitry V. Churkin "Manifestation of optical feedback in power and spectral radiation properties of a Raman fiber laser with randomly distributed feedback well above generation threshold", Proc. SPIE 12323, Quantum and Nonlinear Optics IX, 123230G (3 January 2023); <https://doi.org/10.1117/12.2643924> (Scopus)

– Горбунов О.А., Ватник И.Д., Подивилов Е.В., Смирнов С.В., Чуркин Д.В. «Численное изучение механизмов генерации и затухания узких спектральных мод в излучении волоконного ВКР-лазера со случайно распределенной обратной связью», ВКВО-2023. Тезисы опубликованы в *Фотон-Экспресс*, 6(190), с. 448-449 (DOI: 10.24412/2308-6920-2023-6190-448-449) (РИНЦ).

– Oleg A. Gorbunov, Ilya D. Vatnik, Sergey V. Smirnov, and Dmitry V. Churkin «Numerical modelling of ultra-narrow generation in a Raman fiber laser with random distributed feedback». Proc. SPIE 12775, Quantum and Nonlinear Optics IX, 12775-54 (in press) (Scopus).

*Опционально: ваши впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также предложения по их совершенствованию*