

## Физика генерации двухмасштабных лазерных импульсов

- Кобцев Сергей Михайлович, зав.ОЛФИТ НГУ, д.ф.-м.н., с.н.с;
- Смирнов Сергей Валерьевич, с.н.с. ОЛФИТ НГУ, к.ф.-м.н.;
- Иваненко Алексей Владимирович, н.с. ОЛФИТ НГУ, к.ф.-м.н.;
- Кохановский Алексей Юрьевич, аспирант НГУ;
- Гервазиев Михаил Дмитриевич, Кеммер Анна Владимировна, студенты ОЛФИТ НГУ.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант 14.В25.31.0003 “Физическая платформа нелинейных фотонных технологий и систем”, рук. С.М. Кобцев, 2013-2017 гг.; базовая часть гос.задания №2419 “Физика новых волоконных импульсных лазерных систем”, рук. С.В. Смирнов, 2014-2016).

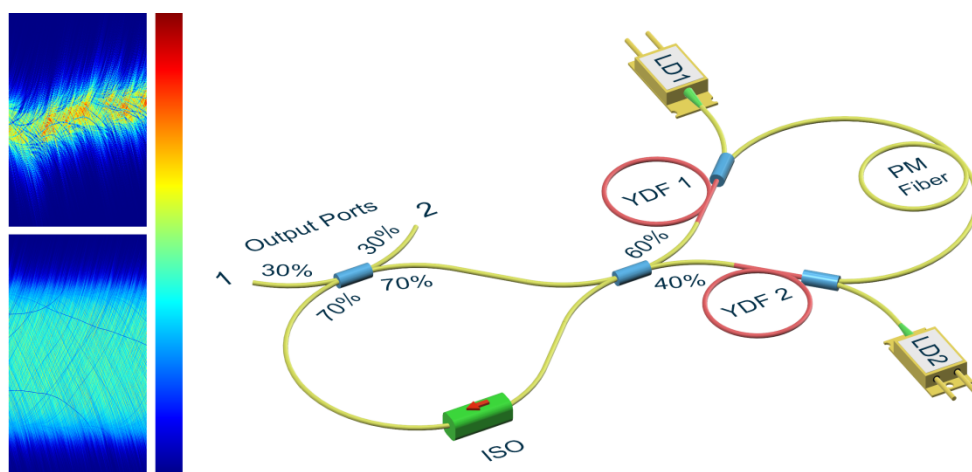
Волоконные импульсные лазерные системы нашли многообразные применения в различных областях науки и техники, однако потенциал их практического применения значительно шире и используется в настоящее время лишь в малой степени. Генерируемые волоконными лазерами сверхкороткие оптические импульсы способны обеспечивать уникальные возможности при решении разнообразных научно-практических задач, включая биофотонику, спектроскопию с временным разрешением (в т.ч. диагностику наноматериалов), двухфотонную микроскопию, прецизионную микрообработку поверхностей и целый ряд других применений. По сравнению с твердотельными аналогами, волоконные лазеры обладают целым рядом преимуществ, включая компактность, относительно высокий к.п.д., отсутствие необходимости в водяном охлаждении и др. Кроме того, как было установлено в результате недавних исследований, волоконные лазеры поддерживают большое многообразие режимов генерации. В частности, помимо «обычных» полностью когерентных лазерных импульсов, волоконные лазеры могут генерировать двухмасштабные частично когерентные импульсы, суть волновые пакеты, состоящие из стохастического набора суб-импульсов. По сравнению с «обычными» лазерными импульсами, они могут обладать существенно более высокой энергией и пиковой мощностью, имеют значительно меньшее время когерентности, которое к тому же относительно слабо подвержено влиянию хроматической дисперсии групповых скоростей. Исследованию уникальных, но слабо изученных к настоящему времени свойств двухмасштабных лазерных импульсов, была посвящена серия работ научного коллектива ОЛФИТ НГУ в отчётном периоде, сочетающая экспериментальные исследования с аналитическими оценками и массивным численным моделированием на кластере ИВЦ НГУ.

Для моделирования лазерной генерации в рамках проводимой работы использовались модели на основе скалярного нелинейного уравнения Шрёдингера (НУШ), а также система НУШ на компоненты поляризации поля оптической волны. Кроме того, обобщённое нелинейное уравнение Шрёдингера использовалось для моделирования нелинейно-оптических преобразований лазерного излучения в нелинейном оптическом волокне (ВКР-преобразование, генерация суперконтинуума). Для интегрирования НУШ был использован метод Фурье расщепления по физическим процессам (step-split Fourier method). Программная реализация была выполнена на языке C++ с использованием библиотек FFTW и boost. Для сбора и обработки результатов моделирования также использовались скрипты на языках Python, bash и JavaScript. В ходе моделирования каждое вычислительное ядро кластера НГУ использовалось для проведения независимых расчётов со своим набором значений параметров; использование большого количества вычислительных ядер позволяло, таким образом, получить зависимость свойств лазерной генерации от физических параметров моделируемой лазерной системы, обеспечивая практически стопроцентную эффективность распараллеливания вычислений.

В результате выполненных исследований волоконных лазеров было продемонстрировано существование большого разнообразия новых режимов генерации частично когерентного импульсного излучения. Показан квазипериодический характер эволюции режимов частичной синхронизации мод волоконных лазеров на больших масштабах времени. Установлено, что для однозначной идентификации режимов генерации частично когерентных импульсов недостаточно регистрации только временных и спектральных свойств излучения с помощью обычно используемых в лазерной физике экспериментальных техник. Результатом данных исследований стала разработка и реализация экспериментальной схемы для измерения пространственно-временной динамики излучения, позволяющей дифференцировать режимы генерации в случае неполной синхронизации мод.

Также в результате исследований была предложена новая высокоэффективная феноменологическая модель двухмасштабных лазерных импульсов – стохастических цугов, позволяющая существенно (вплоть до 2-3 порядков величины по сравнению с полной численной моделью на основе НУШ) повысить эффективность численного моделирования приложений частично когерентного излучения. Предложенная модель обеспечивает адекватное описание временных и спектральных свойств двухмасштабных импульсов, а также корректно описывает корреляцию близких продольных мод в оптическом спектре лазерной генерации.

Разработаны новые схемы волоконных лазеров с пассивной синхронизацией мод на основе нелинейного усиливающего петлевого зеркала (NALM). Используемая при этом концепция управления нелинейностью впервые позволила получить непосредственно в волоконном задающем генераторе импульсы с рекордно высокой энергией (свыше 12 мкДж). С использованием предложенной в работе новой схемы лазера с дополнительным отрезком активного волокна в усиливающем нелинейном петлевом зеркале и независимо управляемым модулем накачки впервые продемонстрирована возможность независимого электронного управления пиковой мощностью и длительностью генерируемых импульсов в волоконных NALM-лазерах.



Распределение мощности  $P(t,z)$  в двух различных пространственно-временных режимах генерации; новая схема волоконного NALM-лазера с двумя отрезками активного волокна.

Использование кластера ИВЦ НГУ для решения задач НИР позволило существенно расширить возможности при решении поставленных задач, отличающихся высокой вычислительной сложностью и необходимостью поиска и исследования большого количества различных режимов генерации, реализуемых в волоконных лазерах при различных параметрах настройки. Проведение большого объема параллельных вычислений на кластере ИВЦ НГУ позволило выполнить серию расчётов для волоконных лазерных систем с различными конфигурациями и получить целый ряд новых важных научных и практических результатов.

### Список основных публикаций

1. A. Ivanenko, S. Kobtsev, S. Smirnov, and A. Kemmer, "Mode-locked long fibre master oscillator with intra-cavity power management and pulse energy > 12  $\mu$ J," *Optics Express* 24 (6), 6650-6655 (2016). <https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-24-6-6650>

Импакт-фактор (WoS/JCR): 3.148.

2. S. Kobtsev, S. Smirnov, S. Kukarin. Double-scale pulses generated by mode-locked fibre lasers and their applications. Chapter 4 in book “Fiber laser” (ed. M.C.Paul), p. 69-88, InTech, 2016, ISBN: 978-953-51-4615-5. <http://www.intechopen.com/books/fiber-laser/double-scale-pulses-generated-by-mode-locked-fibre-lasers-and-their-applications>
3. S.V.Smirnov, J.D.Ania-Castanon, S.Kobtsev, S.K.Turitsyn. Supercontinuum in telecom applications. Chapter 10 in book “The Supercontinuum Laser Source. The Ultimate White Light” (ed. R.R. Alfano), Springer, 2016, 435p., ISBN: 978-1493933242.
4. S. V. Smirnov, N. Tarasov, and D. V. Churkin, “Radiation build-up in laminar and turbulent regimes in quasi-CW Raman fiber laser,” Optics Express 23 (21), 27606-27611 (2015).  
<https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-23-21-27606>  
Импакт-фактор (WoS/JCR): 3.148.
5. D. V. Churkin, S. Sugavanam, N. Tarasov, S. Khorev, S. V. Smirnov, S. M. Kobtsev, and S. K. Turitsyn, “Stochasticity, periodicity and localized light structures in partially mode-locked fibre lasers,” Nature Communications 6, 7004 (2015). doi:10.1038/ncomms8004.  
<http://www.nature.com/articles/ncomms8004>  
Импакт-фактор (WoS/JCR): 11.329.
6. S. V. Smirnov, S. M. Kobtsev, and S. V. Kukarin, “Linear compression of chirped pulses in optical fibre with large step-index mode area,” Optics Express 23 (4), 3914-3919 (2015).  
<https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-23-4-3914>  
Импакт-фактор (WoS/JCR): 3.148.
7. Y.S. Fedotov, A.V. Ivanenko, S.M. Kobtsev, and S.V. Smirnov, “High average power mode-locked figure-eight Yb fibre master oscillator,” Optics Express 22 (25), 31379-31386 (2014).  
<https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-22-25-31379>  
Импакт-фактор (WoS/JCR): 3.148.

## **Патенты, свидетельства**

1. С.В. Смирнов, С.М. Кобцев. Программный комплекс визуализации результатов параллельного численного моделирования и анализа больших объёмов данных «IntASR-1» (свидетельство о гос.регистрации программы для ЭВМ №2017611832 от 09.02.2017, заявка от 03.11.2016).
2. С.В. Смирнов, С.М. Кобцев. Программный комплекс моделирования оптического стробирования с частотным разрешением «SimFROG-1» (свидетельство о гос.регистрации программы для ЭВМ №2017611072 от 19.01.2017, заявка от 03.11.2016).
3. С.М. Кобцев, С.В. Смирнов, С.А. Хрипунов, Д.А. Раднатаров, А.В. Иваненко. «Способ пассивной синхронизации мод излучения в лазере сверхкоротких импульсов с цельноволоконным оптическим резонатором». Патент РФ № 2560750 на изобретение, опубликовано 20.08.2015, бюллетень №23.