

## Физика частично когерентных импульсов в волоконных лазерах

- 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, Макаренко Максим Олегович, магистранты НГУ.

Исследования выполнены в рамках базовой части гос.задания N 3.5572.2017/БЧ "Физика частично когерентных импульсов в волоконных лазерах с синхронизацией мод" (рук. С.В.Смирнов, 2017-2019), гранта РФФ N 17-12-01281 "Разработка физических основ короткоимпульсных волоконных источников излучения с резонаторами на основе новых топологий" (рук. д.ф.-м.н. С.М.Кобцев, 2017-2019), гранта РФФ N 16-12-10402 "Управление светом в синтетических фотонных решетках с модуляцией параметров" (рук. д.ф.-м.н. Д.В.Чуркин, 2016-2018).

Результаты недавних исследований показали [1-4], что волоконные лазеры с пассивной синхронизацией мод обеспечивают большое многообразие режимов генерации, отличающихся как количественно (параметрами генерируемых импульсов), так и качественно. Помимо «обычных» бесструктурных импульсов волоконные лазеры могут генерировать сложно-структурированные импульсы — частично когерентные волновые пакеты, демонстрирующие различные временные и спектральные свойства излучения, а также обладающие различной пространственно-временной динамикой [4,5]. Исследование частично когерентной лазерной генерации представляет большой научный интерес (ввиду наличия междисциплинарных физических аналогий [6], способных достичь более глубокого понимания физических процессов и явлений в смежных областях), и несомненную практическую ценность. Значительная практическая ценность этих импульсов обусловлена тем, что они могут нести рекордную энергию и обеспечивать рекордно высокую среднюю мощность излучения [7-10]. Кроме того, было показано, что даже при сопоставимом уровне энергии частично когерентные лазерные импульсы могут обеспечивать более высокую эффективность нелинейно-оптических преобразований [11,12], а также чрезвычайно перспективны для спектроскопических исследований с использованием лазерно-индуцированной абляции и других актуальных применений [13,14].

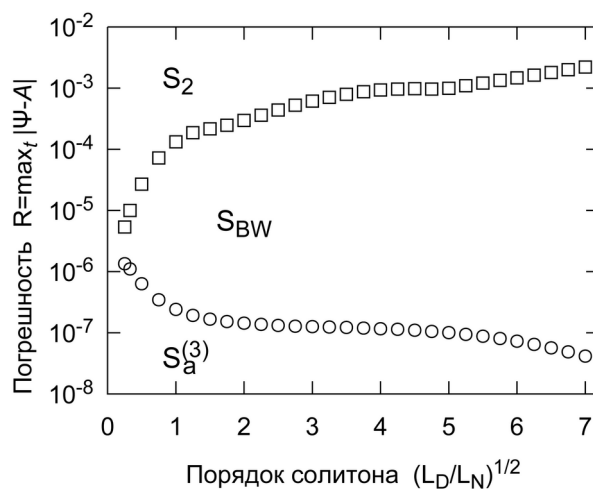
Несмотря на ранее достигнутые успехи до настоящего времени остаются невыясненными вопросы о зависимости эффективности нелинейно-оптических преобразований от степени когерентности, отсутствует понимание возможностей и способов генерации двухмасштабных импульсов с заданной степенью когерентности, а использованные в первых демонстрациях схемы генерации и их параметры, очевидно, далеки от оптимальных. Задачей реализуемого проекта является решение указанных выше проблем

за счёт генерации новых знаний в области эффективного использования частично когерентного короткоимпульсного лазерного излучения, а также разработки, создания и оптимизации на основе полученной информации новых схем волоконных лазеров, обеспечивающих генерацию двухмасштабных лазерных импульсов с изменяемой степенью когерентности для решения актуальных задач в области фотоники, нанотехнологий и биомедицины.

- [1] S.M. Kobtsev, S.V. Kukarin, S.V. Smirnov, S.K. Turitsyn, and A.I. Latkin, “Generation of double-scale femto/pico-second optical lumps in mode-locked fiber lasers,” *Optics Express* 17(23), 20707–20713 (2009).
- [2] S.V. Smirnov, S.M. Kobtsev, S.V. Kukarin, and A.V. Ivanenko, “Three key regimes of single pulse generation per round trip of allnormal-dispersion fiber lasers mode-locked with nonlinear polarization rotation,” *Optics Express* 20(24), 27447–27453 (2012).
- [3] S. Kobtsev, S. Smirnov, S. Kukarin, and S. Turitsyn, “Mode-locked fiber lasers with significant variability of generation regimes,” *Optical Fiber Technology* 20(6), 615–620 (2014).
- [4] P. Grelu and N. Akhmediev, “Dissipative solitons for mode-locked lasers,” *Nature Photonics* 26, 84–92 (2012).
- [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).
- [6] E. G. Turitsyna, S. V. Smirnov, S. Sugavanam, N. Tarasov, X. Shu, S.A. Babin, E.V. Podivilov, D.V. Churkin, G. Falkovich, and S.K. Turitsyn. The laminar–turbulent transition in a fibre laser. *Nature Photonics*, v. 7, N10, pp. 783 - 786 (2013).
- [7] S. Kobtsev, S. Kukarin, and Y. Fedotov, “Ultra-low repetition rate mode-locked fiber laser with high-energy pulses,” *Opt. Express* 16(26), 21936–21941 (2008).
- [8] S.M. Kobtsev, S. V. Kukarin, S. V. Smirnov, and Y.S. Fedotov, “High-energy mode-locked all-fiber laser with ultralong resonator,” *Laser Phys.* 20 (2), 351-356 (2010).
- [9] S. V. Smirnov, S. M. Kobtsev, S. V. Kukarin, and S.K. Turitsyn, “Mode-locked fibre lasers with high-energy pulses,” *InTech*, Chapter 3, 39-58 (2011).
- [10] Y.S. Fedotov, A. V. Ivanenko, S. M. Kobtsev, and S. V. Smirnov, “High average power mode-locked figure-eight Yb fibre master oscillator,” *Opt. Express* 22 (25), 31379-31386 (2014).
- [11] S. Smirnov, S. Kobtsev, and S. Kukarin. Efficiency of non-linear frequency conversion of double-scale pico-femtosecond pulses of passively mode-locked fiber laser. *Optics Express* 22(1), 1058-1064 (2014).
- [12] S. Kobtsev, S. Kukarin, S. Smirnov, and I. Ankudinov, “Cascaded SRS of single- and double-scale fiber laser pulses in long extracavity fiber,” *Optics Express* 22 (17), 20770-20775 (2014).
- [13] B. Nie, G. Parker, V. Lozovoy, and M. Dantus, “Energy scaling of Yb fiber oscillator producing clusters of femtosecond pulses,” *Opt. Eng.* 53(5), 051505 (2014).
- [14] S. Kobtsev, S. Smirnov, and 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.

Для моделирования лазерной генерации в рамках проводимой работы использовались модели на основе скалярного нелинейного уравнения Шрёдингера (НУШ). 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 библиотеки FFTW. 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.

Впервые для численного интегрирования нелинейного уравнения Шрёдингера использованы схемы расщепления по физическим процессам высокого порядка точности. Выполнен сравнительный анализ численных схем расщепления, сделан вывод об оптимальных схемах в зависимости от уровня нелинейности начальных условий задачи Коши и требуемого уровня точности численного решения. Показано, что использование новых численных схем высокого порядка точности в ряде случаев позволяет повысить скорость численных расчётов вплоть до порядка величины и более.



Выбор оптимальной численной схемы в зависимости от порядка солитона и требуемой точности.

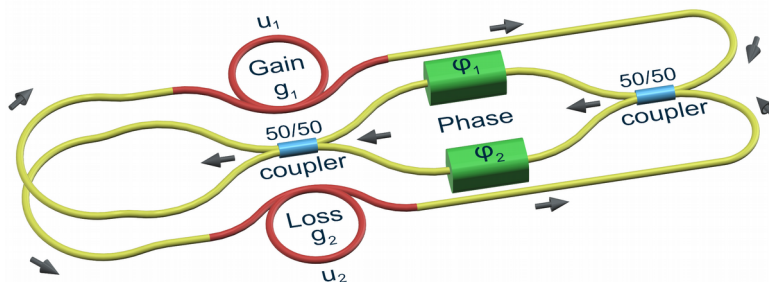
В результате выполненных исследований волоконных лазеров было показано, что эффективность генерации второй гармоники монотонно возрастает с уменьшением степени когерентности лазерных импульсов, при этом эффективность нелинейно-оптических преобразований лазерных импульсов, обладающих наименьшей степенью когерентности может превышать аналогичный показатель для полностью когерентных лазерных импульсов с такими же параметрами (длительность, ширина спектра, энергия) вплоть до двух раз. Установлено, что уменьшение степени когерентности лазерных импульсов позволяет также повысить эффективность генерации суперконтинуума. В частности, уменьшение степени когерентности импульсов приводит к монотонному увеличению ширины генерируемых оптических спектров суперконтинуума.

Выявлены и исследованы перспективные способы управления степенью когерентности импульсной лазерной генерации в волоконных лазерах с пассивной синхронизацией мод на основе эффекта нелинейной эволюции поляризации. С помощью численного моделирования, выполненного на кластере НГУ, и лабораторных экспериментов продемонстрировано, что данные типы лазеров поддерживают большое многообразие режимов генерации, позволяя за счёт изменения настроек внутривибраторных контроллеров поляризации и мощности накачки варьировать степень когерентности лазерных импульсов от 0 до 1, что соответствует вариации относительной высоты пика на АКФ интенсивности от 0,5 до 0 соответственно.

Предложена и исследована новая схема волоконного лазера с пассивной синхронизацией мод на основе нелинейного петлевого усиливающего зеркала с двумя отрезками активного волокна. По сравнению с известными ранее схемами, предложенная новая схема позволяет изменять пиковую мощность генерируемых импульсов и получать большое разнообразие режимов генерации в процессе работы лазера, без внесения изменений в его конструкцию. С помощью численного моделирования и лабораторных экспериментов продемонстрирована возможность управления степенью когерентности генерируемых импульсов в новой схеме за счёт изменения токов диодов накачки.

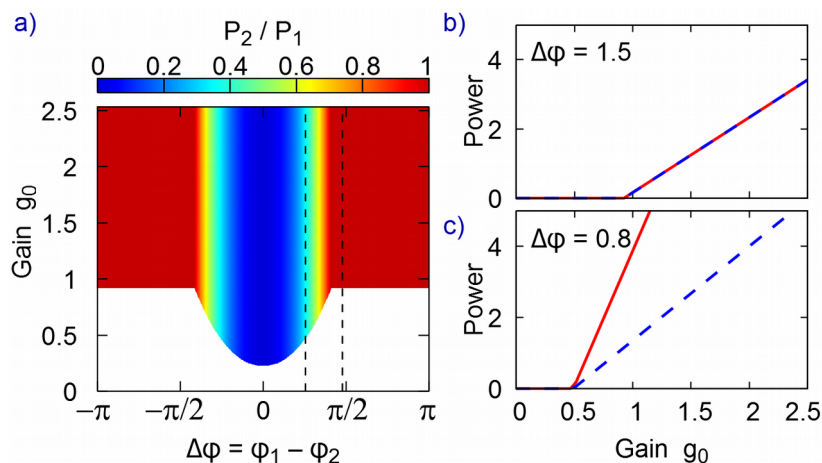
Кроме того, в работе исследована лазерная генерация в РТ-симметричном волоконном лазере. До сих пор исследования РТ-симметрии в оптике были сосредоточены практически исключительно в области оптических микроструктур (микрорезонаторы, микроволноводы и т. п.); целью проводимых в НГУ исследований было расширение концепции РТ-симметрии на область волоконной оптики. В ходе работы была предложена схема РТ-симметричного волоконного лазера, состоящего из двух связанных волоконных резонаторов, в одном из которых реализовано оптическое усиление, в другом — оптические потери. Перестраиваемая связь между двумя частями резонатора управляется при помощи

регулируемых фазовых сдвигов внутри интерферометра Маха — Цендера. В случае нулевого фазового сдвига пассивное и активное волокна оказываются не связаны, и система работает как обычный лазер с кольцевым резонатором; излучение в аттенуаторе отсутствует. Изменение фазового сдвига позволяет переключаться между РТ-симметричным и несимметричным режимами генерации.



Предложенная в работе новая схема волоконного РТ-симметричного лазера.

Аналитически и с помощью численного моделирования в работе исследованы особенности генерации в предложенной схеме волоконного РТ-симметричного лазера. В частности, продемонстрированы такие контринтуитивные эффекты, как бистабильность РТ-симметричного режима генерации и немонотонный характер зависимости мощности генерации от уровня внутрирезонаторных потерь. Исследовано влияние керровской нелинейности на РТ-переход. Продемонстрировано исчезновение строгой РТ-симметрии с ростом мощности в системе и сформулированы условия на максимальный набег нелинейной фазы в усилителе для наблюдения РТ-перехода в эксперименте.



(a) Отношение мощностей  $P_2/P_1$  в сегментах с потерями и усилением равно единице в РТ-симметричном режиме генерации и меньше единицы в режиме с нарушенной РТ-симметрией. (b),(c) Зависимости внутрирезонаторной мощности в усилителе и аттенуаторе, соответствующие различным сдвигам фаз  $\Delta\varphi = 1.5$  и  $0.8$ , показанным пунктирной линией на панели (a).

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 объёма 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. Kokhanovskiy, S. Kobtsev, A. Ivanenko, and S. Smirnov, "Properties of artificial saturable absorbers based on NALM with two pumped active fibres," *Las. Phys. Lett.* **15**(12), 125101 (2018). doi:10.1088/1612-202X/aae21c. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1612-202X/aae21c/meta> Импакт-фактор (WoS/JCR): 2.240
2. A. M. Perego, S. V. Smirnov, K. Staliunas, D. V. Churkin, and S. Wabnitz, "Self-induced Faraday instability laser," *Phys. Rev. Lett.* **120**, 213902 (2018). Импакт-фактор (WoS/JCR): 8.839 <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.120.213902>
3. S. V. Smirnov, M. O. Makarenko, S. V. Suchkov, D. Churkin, and A. A. Sukhorukov, "Bistable lasing in parity-time symmetric coupled fiber rings," *Photon. Res.* **6** (4), A18-A22 (2018). <https://www.osapublishing.org/prj/abstract.cfm?uri=prj-6-4-A18> Импакт-фактор: 5.242
4. S. Kobtsev, A. Ivanenko, A. Kokhanovskiy, S. Smirnov, "Electronic control of different generation regimes in mode-locked all-fibre F8 laser," *Laser Physics Letters* **15** (4), 045102 (2018). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1612-202X/aaa9c7/meta> Импакт-фактор: 2.240
5. С. В. Смирнов «Схемы расщепления высокого порядка точности для интегрирования нелинейного уравнения Шрёдингера», *Вычислительные технологии*, Т. 22, № 6, С. 89-97.
6. S. V. Smirnov, S. Sugavanam, O. A. Gorbunov, and D. V. Churkin, "Generation of spatio-temporal extreme events in noise-like pulses NPE mode-locked fibre laser," *Opt. Express* **25**, 23122-23127 (2017). <https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-25-19-23122> Импакт-фактор (WoS/JCR): 3.356
7. S. Smirnov, S. Kobtsev, A. Ivanenko, A. Kokhanovskiy, A. Kemmer, and M. Gervaziev, "Layout of NALM fiber laser with adjustable peak power of generated pulses," *Opt. Lett.* **42**, 1732-1735 (2017). <https://www.osapublishing.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-42-9-1732> Импакт-фактор (WoS/JCR): 3.589

## **Патенты, свидетельства**

1. А.В. Иваненко, С.М. Кобцев, С.М. Смирнов, А.В. Кеммер «Волоконный задающий генератор» Патент РФ №2633285 (изобретение), опубликовано 11.10.2017, бюл. № 29. Приоритет 05.07.2016.

2. А.В. Иваненко, С.В. Смирнов, С.М. Кобцев «Волоконный импульсный лазер с нелинейным петлевым зеркалом» Патент РФ № 2618605 (изобретение), опубликовано 04.05.2017, бюл. №13. Приоритет: 16.12.2015.