

## Численное моделирование различных режимов короткоимпульсной генерации в волоконных лазерах и нелинейно-оптических механизмов преобразования лазерного излучения

- Кобцев Сергей Михайлович, д.ф.-м.н., с.н.с., зав.ОЛФИТ НГУ;
- Смирнов Сергей Валерьевич, к.ф.-м.н., в.н.с. ОЛФИТ НГУ;
- Иваненко Алексей Владимирович, к.ф.-м.н., с.н.с. ОЛФИТ НГУ;
- Ньюшков Борис Николаевич, к.ф.-м.н., с.н.с. ОЛФИТ НГУ;
- Кохановский Алексей Юрьевич, к.ф.-м.н., с.н.с. ОЛФИТ НГУ;
- Подивилов Евгений Вадимович, д.ф.-м.н., проф. каф. теор.физики НГУ.

Исследования выполнены в рамках проекта РНФ 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, продление на 2020-2021 гг), проекта РФФИ 19-42-540013 «Разработка высокоэнергетичных волоконных импульсных лазеров для биомедицины» (рук. к.ф.-м.н. С. В. Смирнов, 2019-2021 гг), проекта РФФИ 20-02-00511 «Решения для частотных комбов в микрорезонаторах с квадратичной нелинейностью» (рук. д. ф.-м. н. Е. В. Подивилов, 2020-2022 гг), проекта РНФ 17-72-30006 «Нелинейные технологии для оптических коммуникаций и лазерных приложений» (рук. к.ф.-м.н. А. А. Редюк, продление на 2022-2023 гг), проекта РНФ 22-12-20010 «Фундаментальные основы формирования низкокогерентного короткоимпульсного лазерного излучения» (рук. д. ф.-м. н. С.М.Кобцев, 2022-2024 гг).

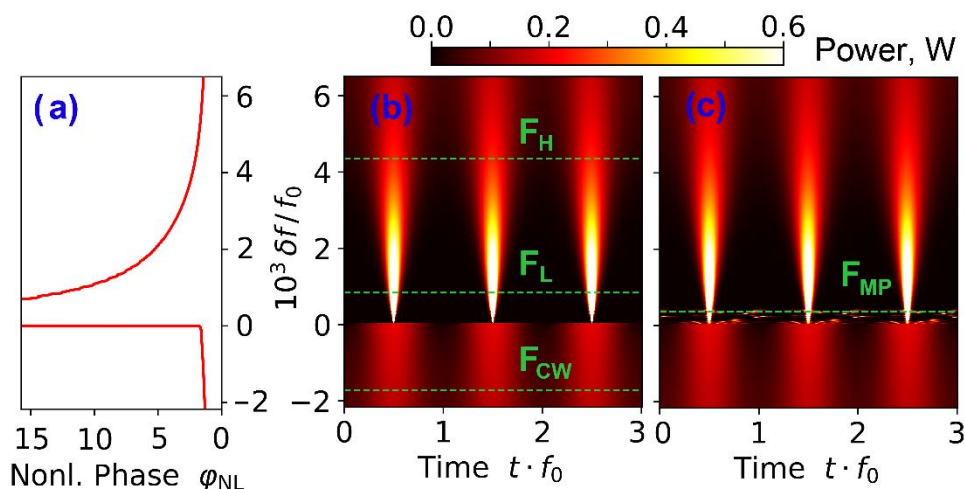
К настоящему времени волоконные лазеры нашли многочисленные применения в телекоммуникациях, промышленности, медицине, научных исследованиях и целом ряде других высокотехнологичных областей благодаря целому ряду уникальных достоинств таких источников, в числе которых компактность, высокий к. п. д., нетребовательность к настройке и юстировке, малая чувствительность к изменению условий окружающей среды, относительно низкая себестоимость и др. Повсеместное распространение и бурное развитие волоконных технологий ставит широкий спектр новых исследовательских задач в области оптики и лазерных технологий. Основные усилия научного коллектива в отчётном периоде были сфокусированы на решении таких задач как исследование и оптимизация волоконных генераторов с квазисинхронной накачкой, генерация произвольных волновых форм в гибридных волоконно-полупроводниковых лазерных системах, а также на задаче о генерации гребёнки эквидистантных частотных линий в микрорезонаторах с квадратичной нелинейностью.

Для моделирования лазерной генерации в рамках проводимой работы использовались модели на основе скалярного нелинейного уравнения Шрёдингера (НУШ) наряду с более простыми моделями на основе балансных уравнений. Также 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 вычислительно 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 работах [2, 4, 14] впервые исследованы возможности и ограничения метода синхронизации мод в иттербиевом лазере с квазисинхронной накачкой на основе оптического волокна с сохранением поляризации излучения. Этот технически простой подход к синхронной накачке основан на синусоидальной модуляции её мощности при небольшой отстройке частоты модуляции от межмодовой частоты лазерного резонатора или кратной ей частоты. В сочетании с увеличенной длиной волоконного резонатора, полностью собранного из волокон с сохранением состояния поляризации (PM), данный подход обеспечил стабильную генерацию скалярных (линейно поляризованных) высокоэнергетических (до 130 нДж) импульсов на третьей гармонике (0.69 МГц) фундаментальной частоты повторения импульсов 0.23 МГц. Полученная в работе комбинация низкой частоты повторения импульсов, высокого уровня их энергии и стабильности поляризации уникальна для задающих генераторов с активной синхронизацией мод, полностью основанных на стимулированном излучении. В результате проведённых исследований установлено, что отстройка частоты модуляции накачки является ключевым параметром для управления формированием импульса в таком лазере с синхронизацией мод. В численном моделировании показана теоретическая возможность дальнейшего укорочения внутррезонаторного импульса до суб-наносекундной длительности с помощью мер, предотвращающих накопление импульсами избыточного нелинейного набега фазы. Продемонстрированный подход открывает новые перспективы для синхронизации мод на основе модуляции накачки в лазерах с диодной накачкой и такими инерционными активными средами, как волокна, легированные редкоземельными элементами. В работе [7] дополнительно продемонстрирована возможность генерации в такой системе пакетов лазерных импульсов с контролируемым количеством импульсов в пакете за счёт изменения

частоты модуляции накачки. В работах [14, 16] предложенный концепт был развит для получения в волоконном лазере синхронной двухволновой импульсной генерации на длинах волн 1064 нм и 1240 нм при использовании модулированной накачки на 980 нм.



Полученная в численном моделировании эволюция импульсной генерации, обусловленная подстройкой частоты модуляции накачки вблизи фундаментальной частоты повторения  $f_0$ ; (a) – набег нелинейной фазы в зависимости от относительной расстройки частоты модуляции  $\delta f / f_0$ ; (b, c) – временные распределения мощности лазера при перестройке частоты модуляции в положительном и отрицательном направлениях.

Ещё один цикл работ научного коллектива в отчётном периоде был посвящён поиску и исследованию новых солитонных решений в задаче о генерации второй гармоники и субгармоники в микрорезонаторах с квадратичной нелинейностью. Экспериментальные и теоретические исследования нелинейных гребёнок частот в оптических микрорезонаторах с кубической (керровской) нелинейностью вызвали значительный исследовательский интерес в последнее десятилетие и привели к созданию прототипов работающих устройств на основе солитонов. Создание аналогичных частотных гребёнок в микрорезонаторах с квадратичной оптической нелинейностью может обеспечить новые технологические прорывы за счёт снижения требований на мощность накачки и является важной научной задачей.

В работе [1] с помощью численного моделирования получено обширное семейство двойных солитонных гребёнок, центрированных на частоте накачки  $\omega_p$  и её половине  $\omega_p/2$ . Показано, что близость к точке  $\lambda_c$  равных групповых скоростей волн первой и второй гармоник, достижимая за счёт соответствующей радиальной поляризации микрорезонатора, оказывается наиболее выгодной для генерации спектрально широких двойных гребёнок. Выполненное в работе численное моделирование указывает наиболее перспективные пути реализации частотных гребёнок в эксперименте с резонаторами из ниобата лития; в частности, в работе получены зависимость параметров частотных гребёнок и

диссипативных солитонов от мощности накачки, девиации  $\lambda_p - \lambda_s$ , значений добротности и частотных расстроек, а также необходимых параметров радиальной поляризации микрорезонатора, что создаёт прочную основу для последующих экспериментальных реализаций частотных гребёнок в микрорезонаторах с квадратичной нелинейностью.

В работе [12] коллективом исполнителей предложен и успешно использован общий метод достижения и управления многочисленными устойчивыми солитонными состояниями, обладающими широкими спектрами первой и второй гармоник. Метод основан на сочетании специальных подобранных экспериментально контролируемых значений расстроек частоты и медленного адиабатического увеличения мощности накачки, начиная с околопороговых значений. Это обеспечивает устойчивость и доступность солитонных режимов генерации частотных гребёнок. Найденные новые нелинейные решения актуальны для накачки во вторую гармонику с параметрическим распадом (генерацией субгармоники) в микрорезонаторе с квадратичной нелинейностью. С помощью численного моделирования в работе продемонстрировано, что такой подход позволяет возбуждать одно- и многосолитонные состояния различной пространственной симметрии – периодические и антипериодические.

В работе [15] выполнено численное исследование остальных (не рассмотренных в предыдущих работах данного цикла) вариантов накачки применительно к микрорезонаторам на основе ниобата лития. Сюда относится случай накачки в первую гармонику для длины волны накачки  $\lambda_p = 2698$  нм в радиально поляризованных микрорезонаторах, а также схемы накачки в первую и вторую гармонику при естественном фазовом синхронизме,  $\lambda_p = 1664$  и  $832$  нм. В результате выполненных исследований установлено, что нелинейные режимы в данном случае существенно отличаются и притом менее эффективны по сравнению со случаем накачки во вторую гармонику. Это обусловлено принципиальным физическим различием схем возбуждения первой и второй гармоник, а также разными сочетаниями знаков коэффициентов дисперсии для мод резонатора.

Более подробно ознакомиться с результатами этих и других работ научного коллектива, выполненных в отчётном периоде с использованием численного моделирования на кластере НГУ, можно, обратившись к полным текстам публикаций (см. список в конце отчёта).

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 резонаторов и настройках управляемых элементов. Проведение

большого объёма параллельных вычислений на кластере ИВЦ НГУ позволило выполнить серию расчётов для микрорезонаторов и волоконных лазерных систем с различными конфигурациями и получить целый ряд новых важных научных и практических результатов; выполнение данного объёма исследований на персональном компьютере было бы физически невозможно. Коллектив исполнителей благодарит системного администратора кластера за технические консультации и оперативную помощь при решении возникающих проблем.

### **Список основных публикаций**

[1] S. Smirnov, V. Andryushkov, E. Podivilov, B. Sturman, I. Breunig. Soliton based  $\chi^{(2)}$  combs in high-Q optical microresonators. *Optics Express*, v. 29, No. 17, 27434-27449 (2021). Импакт-фактор (WoS/JCR): 3.89.

<https://doi.org/10.1364/OE.432529>

[2] B. Nyushkov, A. Ivanenko, S. Smirnov, S. Kobtsev. High-energy pulses from all-PM ultra-long Yb-fiber laser mode-locked with quasi-synchronous pumping. *Optical Fiber Technology*, v. 66, 102650 (2021). Импакт-фактор (WoS/JCR): 2.53.

<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102650> [pdf]

[3] A. Kokhanovskiy, E. Kuprikov, A. Bednyakova, I. Popkov, S. Smirnov, S. Turitsyn. Inverse design of mode-locked fiber laser by particle swarm optimization algorithm. *Scientific Reports*, v. 11, 13555 (2021). Импакт-фактор (WoS/JCR): 4.996.

<https://doi.org/10.1038/s41598-021-92996-1>

[4] B. Nyushkov, A. Ivanenko, S. Smirnov, S. Kobtsev, New approach to mode locking of high-energy-pulse fibre lasers. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, paper JTu3A-141. (May 9-14, 2021)

[https://doi.org/10.1364/CLEO\\_AT.2021.JTu3A.141](https://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2021.JTu3A.141) [pdf]

[5] B. Nyushkov, A. Ivanenko, S. Smirnov, S. Kobtsev. Arbitrary waveform generation by cavity dumping of hybrid fibre laser with two active media. *European Conference on Lasers and Electro-Optics*, paper cj\_10\_6. (June 21-25, 2021, Munich, Germany).

<https://doi.org/10.1109/CLEO/Europe-EQEC52157.2021.9542525> [pdf]

[6] B. N. Nyushkov, A. V. Ivanenko, S. V. Smirnov. Control of the regimes and parameters of lasing in mode-locked fiber lasers: opportunities and prospects. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 57(6), 569-583 (2021).

<https://doi.org/10.3103/S8756699021060091>

[7] A. Ivanenko, B. Nyushkov, S. Smirnov, S. Kobtsev. New method for generation of a specific number of pulses per bunch in Yb-doped all-PM-fibre laser. *European Conference on Lasers and Electro-Optics*, paper cj\_p\_13. (June 2021).

<https://doi.org/10.1109/CLEO/Europe-EQEC52157.2021.9542254> [pdf]

[8] A. Kokhanovskiy, S. Smirnov, S. Kobtsev. Analysis of the coherent properties of ultrashort pulses inside embedded cavities of mode-locked fiber laser and Raman oscillator. Proc. SPIE, v. 11905, 135-138 (2021).

<https://doi.org/10.1117/12.2602637> [pdf]

[9] A. V. Ivanenko, M. S. Mishevsky, G. E. Vishnyakov, B. N. Nyushkov, S. V. Smirnov and S. M. Kobtsev. Supercontinuum generation in cascaded Raman conversion, 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, 2021.

[10] A. Ivanenko, M. Mishevsky, G. Vishnyakov, B. Nyushkov, S. Smirnov, S. Kobtsev. Properties of supercontinuum formed from different chaotic bunches. Proc. SPIE, v. 11985, 117-121 (2022).

<https://doi.org/10.1117/12.2609199>

[11] D. V. Churkin, S. V. Smirnov. Quasi-CW and pulsed generation in coupled Raman fiber lasers with PT symmetry. Proc. SPIE, v. 12142, 162-165 (2022).

<https://doi.org/10.1117/12.2621833>

[12] E. Podivilov, S. Smirnov, B. Sturman. Adiabatic growing, multistability, and control of soliton-comb states in  $\chi^{(2)}$  microresonators for pumping into second-harmonic modes. JETP Letters, v. 115 (9), 553-559 (2022). Импакт-фактор (WoS/JCR): 1.4.

<https://doi.org/10.1134/S0021364022100435>

[13] B. Nyushkov, A. Ivanenko, S. Smirnov. Hybrid fiber laser integrating fast and slow active media for accurate synthesis of high-energy arbitrary optical waveforms by cavity dumping. Laser Physics Letters, v. 19 (7), 075104 (2022). Импакт-фактор (WoS/JCR): 1.70.

<https://doi.org/10.1088/1612-202X/ac6b44> [pdf]

[14] B. N. Nyushkov, A. V. Ivanenko, S. V. Smirnov, G. E. Vishnyakov, S. M. Kobtsev. Synchronous generation of nanosecond pulses at 1064 nm and 1240 nm in all-fiber laser. International Conference Laser Optics (ICLO, June 20-24, 2022, St. Petersburg, Russia).

<https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9839900> [pdf]

[15] S. Smirnov, E. Podivilov, B. Sturman. Effects of dispersion and pumping scheme on soliton-comb regimes in  $\chi^{(2)}$  microresonators. JOSA B, v. 40 (3), 516-522 (2023). Импакт-фактор (WoS/JCR): 0.587.

<https://doi.org/10.1364/JOSAB.481257> [pdf]

[16] B. Nyushkov, A. Ivanenko, G. Vishnyakov, A. Kharauzov, S. Smirnov. Active compensation of differential group delay in a dual-wavelength pulsed fiber laser driven by quasi-synchronous pumping. Photonics, v. 10 (1), 42 (2023). Импакт-фактор (WoS/JCR): 2.65.

<https://doi.org/10.3390/photonics10010042>