

Разработка физических основ короткоимпульсных источников лазерного излучения с резонаторами на основе новых топологий

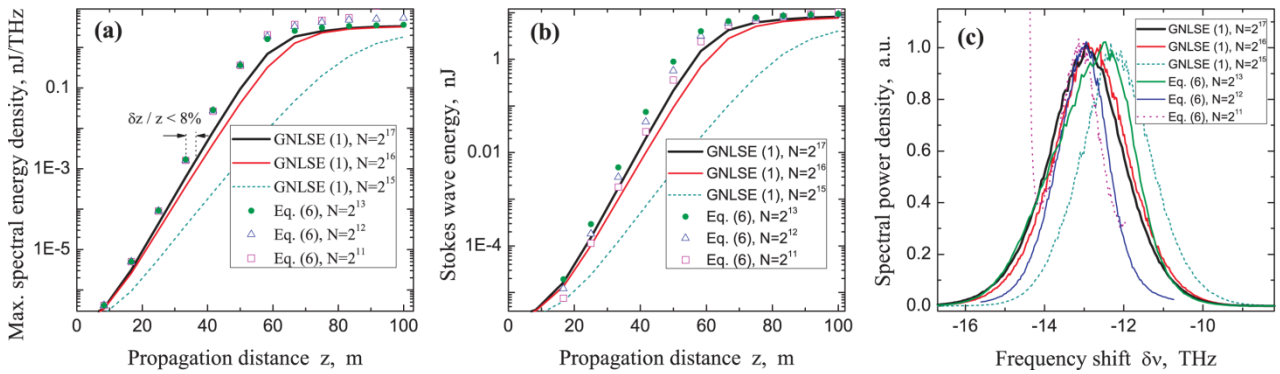
- Кобцев Сергей Михайлович, д.ф.-м.н., с.н.с., зав.ОЛФИТ НГУ;
- Смирнов Сергей Валерьевич, к.ф.-м.н., с.н.с. ОЛФИТ НГУ;
- Иваненко Алексей Владимирович, к.ф.-м.н., н.с. ОЛФИТ НГУ;
- Кохановский Алексей Юрьевич, м.н.с. ОЛФИТ НГУ;
- Подивилов Евгений Вадимович, д.ф.-м.н., проф. каф. теор.физики НГУ;
- Терехов Иван Сергеевич, д.ф.-м.н., доцент 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), проекта РФФИ 19-42-540013 «Разработка высокоэнергетичных волоконных импульсных лазеров для биомедицины» (рук. к.ф.-м.н. С.В.Смирнов, 2019-2021), проекта РФФИ 20-02-00511 «Решения для частотных комбов в микрорезонаторах с квадратичной нелинейностью» (рук. д.ф.-м.н. Е.В.Подивилов), проекта РНФ 16-11-10133 «Исследование емкости нелинейных оптоволоконных каналов связи» (рук. д.ф.-м.н. И.С.Терехов).

Бурно развившиеся в последние годы волоконные технологии позволяют относительно просто конфигурировать различные схемы резонаторов волоконных лазеров, в том числе те, которые ранее невозможно было реализовать с помощью волоконных компонентов. В связи с этим стала актуальной разработка физических основ короткоимпульсных волоконных источников излучения с резонаторами на основе новых топологий, так как ранее эмпирически было выявлено, что топологические особенности резонаторов этих лазеров в существенной степени влияют на свойства лазерной генерации. Реализуемый в НГУ исследовательский проект направлен на поиск ответа на вопрос о том, какие топологии резонаторов волоконных лазеров с синхронизацией мод излучения способны улучшить как свойства лазерной генерации, так и свойства выходного излучения (обеспечить лучшую эффективность генерации излучения, обеспечить её более высокую стабильность, повысить воспроизводимость параметров, улучшить энергетические, временные, спектральные и когерентные свойства импульсов). В рамках проекта исследуется широкий спектр топологий резонаторов волоконных источников с синхронизацией мод излучения, в числе как относительно простые линейные, кольцевые и линейно-кольцевые схемы резонаторов, так и более сложные с резонаторами в виде цифр 8, 9, букв греческого алфавита “гамма”, “тета” и других, в которых свойства лазерной генерации и свойства выходного лазерного излучения значительным образом определяются физическими свойствами резонатора лазера, зависящими в том числе и от его топологии. В проекте также

исследуется вопрос о возможностях и ограничениях администрирования резонатора волоконного лазера (по аналогии с администрированием волоконной сети) для управления характеристиками выходных импульсов излучения волоконного лазера. В результате реализации проекта ожидается получение как новых фундаментальных знаний о закономерностях и механизмах генерации ультракоротких лазерных импульсов в волоконных резонаторах с различными топологиями, так и знания о перспективных топологиях резонаторов короткоимпульсных волоконных источников излучения, позволяющих создать новые более совершенные источники короткоимпульсного лазерного излучения.

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 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. Кроме того, для моделирования ВКР-преобразования лазерных импульсов в оптических волокнах была предложена новая эффективная численная модель, позволяющая исследовать спектральные и временные свойства лазерных импульсов в процессе ВКР-преобразования и учитывающая Керровскую нелинейность и дисперсию групповых скоростей. Модель позволяет качественно воспроизвести спектральный профиль ВКР-усиления в приближении медленно меняющихся амплитуд с использованием пары сеток (для Стоксовой волны и накачки) с уменьшенным числом узлов. Предложенная новая модель была протестирована на задаче распространения 100-пс лазерных импульсов по оптическому волокну. Продемонстрировано, что предложенная численная модель обеспечивает точность лучше 10% для скорости роста энергии Стоксовой волны, при этом позволяя повысить быстродействие и уменьшить использование оперативной памяти в 8 раз по сравнению с широко используемой моделью на основе обобщённого нелинейного уравнения Шрёдингера.



(a) Пиковое значение плотности энергии в Стоксовом импульсе в зависимости от пройденного расстояния z вдоль волокна; (b) энергия Стоксовой волны как функция пройденного расстояния z ; (c) независимо нормированные спектры Стоксовой волны после прохождения расстояния $z = 100$ м в оптическом волокне.

В частности, с использованием предложенной высокоэффективной численной модели был выполнен численный анализ механизма преобразования шумоподобных лазерных импульсов в когерентные импульсы посредством ВКР. Были найдены условия, позволяющие повысить эффективность преобразования до 45%. Исследованы границы области параметров, позволяющие выполнять преобразование, а также условия для генерации солитонных молекул в Стоксовой волне. Более подробное описание результатов данного исследования можно найти в работе [5].

В работе [10] продемонстрирована возможность значительно снизить требования к скорости и динамическому диапазону изменения мощности накачки и, таким образом, упростить схему синхронной накачки иттербиевых волоконных лазеров, используя гармоническую модуляцию мощности накачки для получения импульсной генерации в режиме синхронизации мод волоконного резонатора. Показано, что медленная (в микросекундном масштабе) синусоидальная синхронная модуляция мощности накачки с невысоким контрастом (≤ 0.5) может приводить к формированию регулярной последовательности наносекундных лазерных импульсов. Выявлено, что в квазидвухуровневой активной среде лазера может происходить процесс укорочения лазерного импульса относительно периода модуляции накачки за счет селективности временного профиля лазерного импульса, вызванной рассинхронизацией. В исследованной экспериментальной цельноволоконной конфигурации иттербиевого лазера были получены наносекундные импульсы с энергией до 50 нДж. Выполненное теоретическое описание процесса и численное моделирование открывает пути к дальнейшему сокращению длительности импульса за счет настраиваемых параметров модуляции накачки. Результаты данной работы позволяют создать более надежную и простую в реализации высокоэффективную альтернативу другим типам сверхдлинных волоконных лазеров с синхронизацией мод с высокой энергией.

Работы [6,9] коллектива исполнителей, опубликованные в отчётном периоде, посвящены поиску и исследованию новых солитонных решений в задаче о генерации субгармоники в микрорезонаторах с квадратичной нелинейностью. Экспериментальные и теоретические исследования нелинейных гребенок частот в оптических микрорезонаторах с кубической (керровской) нелинейностью вызвали огромный исследовательский интерес в последнее десятилетие и привели к созданию прототипов устойчиво работающих устройств на основе солитонов. Создание подобных гребенок за счет квадратичной оптической нелинейности сулит новые прорывы и является большой научной задачей. В работе [6] выполнен анализ основных препятствий для реализации частотных гребенок в высокочастотных микрорезонаторах с квадратичной нелинейностью и представлено два семейства стационарных нелинейных решений для таких гребенок, включая солитонные и периодические решения. Несмотря на периодичность световых полей внутри микрорезонаторов, нелинейные решения могут быть топологически разными и относиться к периодическим и антипериодическим граничным условиям. Ожидается, что антипериодические состояния будут наиболее благоприятными для генерации гребенки. Найденные частные решения существуют благодаря большой разнице групповых скоростей между первой и второй гармониками, характерной для микрорезонаторов с квадратичной нелинейностью.

В работе [9] в численном моделировании получена высокостабильная генерация частотных гребенок, принципиально отличающаяся от известной ранее для случая микрорезонаторов с кубической нелинейностью. В работе представлено общее понятие антипериодических состояний, исследовано формирование локализованных когерентных антипериодических стационарных состояний (солитонов), в которых огибающие волн первой и второй гармоник движутся с общей скоростью без изменения формы; исследуются характеристики нового обширного семейства антипериодических солитонов и зависимость ширины генерируемых частотных гребенок от мощности накачки и разности групповых скоростей.

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 настройки. 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.

Список основных публикаций

- [1] A.Kokhanovskiy, A.Ivanenko, S.Kobtsev, S.Smirnov, S.Turitsyn. Machine learning methods for control of fibre lasers with double gain nonlinear loop mirror. *Scientific Reports*, v. 9, 2916 (2019). Импакт-фактор (WoS/JCR): 3.998 <https://www.nature.com/articles/s41598-019-39759-1>
- [2] B.Nyushkov, A.Ivanenko, S.Smirnov, S.Kobtsev. Electronically controlled generation of laser pulse patterns in a synchronously pumped mode-locked semiconductor optical amplifier-fiber laser. *Laser Physics Letters*, v. 16, No. 11, 115103 (2019). Импакт-фактор (WoS/JCR): 2.328 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1612-202X/ab4e9d>
- [3] B.Nyushkov, S.Kobtsev, A.Ivanenko, S.Smirnov. Programmable optical waveform generation in a mode-locked gain-modulated SOA-fiber laser. *J. Opt. Soc. Am. B*, v. 36, No. 11, 3133-3138 (2019). Импакт-фактор (WoS/JCR): 2.18. <https://www.osapublishing.org/josab/abstract.cfm?uri=josab-36-11-3133>
- [4] A.V.Reznichenko, A.I.Chernykh, S.V.Smirnov, I.S.Terekhov. Log-log growth of channel capacity for nondispersive nonlinear optical fiber channel in intermediate power range: Extension of the model. *Phys. Rev. E*, v. 99, 012133 (2019). Импакт-фактор (WoS/JCR): 2.296. <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.99.012133>
- [5] S.Smirnov. Efficient numerical model of stimulated Raman scattering in optical fibers. *J. Opt. Soc. Am. B*, v. 37, No. 4, 1219-1223 (2020). Импакт-фактор (WoS/JCR): 2.18. <https://www.osapublishing.org/josab/abstract.cfm?uri=josab-37-4-1219>
- [6] E.Podivilov, S.Smirnov, I.Breunig, B.Sturman. Nonlinear solutions for chi-squared frequency combs in optical microresonators. *Phys. Rev. A*, v. 101, 023815 (2020). Импакт-фактор (WoS/JCR): 2.777. <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.101.023815>
- [7] O.Shtyrina, A.Kokhanovskiy, I.Yarutkina, A.Skidin, A.Ivanenko, S.Efremov, B.Nyushkov, S.Smirnov, M.Fedoruk. Study of gain efficiency in quasi-distributed amplification systems. *Opt. Lett.*, v. 45, No. 2, 499-502 (2020). Импакт-фактор (WoS/JCR): 3.714. <https://www.osapublishing.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-45-2-499>

[8] B.Nyushkov, A.Ivanenko, S.Smirnov, O.Shtyrina, S.Kobtsev. Triggering of different pulsed regimes in fiber cavity laser by a waveguide electro-optic switch. Opt. Express, v. 28, No. 10, 14922-14932 (2020). Импакт-фактор (WoS/JCR): 3.669.

<https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-28-10-14922>

[9] S.Smirnov, B.Sturman, E.Podivilov, T.Breunig. Walk-off controlled self-starting frequency combs in chi-squared optical microresonators. Opt. Express, v. 28, No. 12, 18006-18017 (2020). Импакт-фактор (WoS/JCR): 3.669.

<https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-28-12-18006>

[10] A.Kokhanovskiy, S.Smirnov, S.Kobtsev. Raman converter of noisy double-scale pulses into coherent pulses. J. Opt. Soc. Am. B, v. 37, No. 8, 2523-2527 (2020).

Импакт-фактор (WoS/JCR): 2.18.

<https://www.osapublishing.org/josab/abstract.cfm?uri=josab-37-8-2523>

[11] S. Smirnov, B. Nyushkov, A. Ivanenko, D. Kolker, S. Kobtsev. Shaping of nanosecond pulses in ytterbium fiber lasers by synchronous sine-wave pump modulation. JOSA B, v. 37, No. 10, 3068-3076 (2020). Импакт-фактор (WoS/JCR): 2.18.

<https://www.osapublishing.org/josab/abstract.cfm?uri=josab-37-10-3068>