

## Численное моделирование короткоимпульсной генерации в волоконных и гибридных лазерах

- Беднякова Анастасия Евгеньевна, к.ф.-м.н., с.н.с. ЛНФ НГУ;
- Иваненко Алексей Владимирович, к.ф.-м.н., с.н.с. ЛНФ НГУ;
- Ньюшков Борис Николаевич, к.ф.-м.н., доцент каф. лазерных систем НГТУ;
- Подивилов Евгений Вадимович, д.ф.-м.н., проф. каф. квантовой оптики ФФ НГУ;
- Рыбак Алина Анатольевна, к.ф.-м.н., м.н.с. ЛНФ НГУ;
- Смирнов Сергей Валерьевич, к.ф.-м.н., в.н.с. ЛНФ НГУ.

Исследования выполнены в рамках проекта РФФ N 24-12-00314 «Неустойчивость лазерного усиления как новый эффективный механизм стационарной импульсной генерации» (рук. к. ф.-м. н. А. Е. Беднякова, 2024-2026 гг).

Новые эффективные физические механизмы генерации коротких и сверхкоротких импульсов в лазерах представляют интерес как для фундаментальной физики, так и для лазерных технологий, что делает актуальной разработку и исследование новых методов генерации оптических импульсов. Коллективом исполнителей проекта в отчётном периоде были предложены и впервые реализованы два новых метода генерации коротких лазерных импульсов, основанных на неустойчивости лазерного усиления различной природы. Для экспериментальной демонстрации новых методов были использованы волоконные и гибридные лазеры, которые, являясь сверхбыстрыми динамическими нелинейными оптическими системами, идеально подходят для изучения оптических неустойчивостей и разработки на их основе новых эффективных способов генерации когерентного импульсного излучения. Выполненное в ходе работ численное моделирование позволило лучше понять и проиллюстрировать физику соответствующих процессов генерации, а также оптимизировать параметры экспериментальных схем и установок.

Для численного моделирования лазерной генерации в рамках проводимой работы использовались модели на основе скалярного нелинейного уравнения Шрёдингера (НУШ), уравнения переноса с учётом быстрой динамики электрического поля, а также более простые модели на основе балансных уравнений. 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

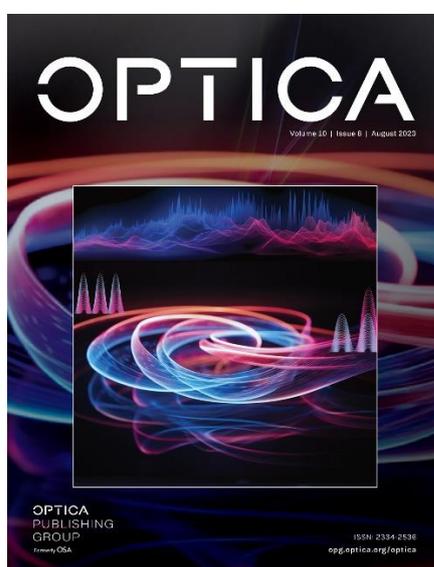
параметров; использование большого количества вычислительных ядер позволяло, таким образом, получить зависимость свойств лазерной генерации от физических параметров моделируемой лазерной системы, обеспечивая практически стопроцентную эффективность распараллеливания вычислений.

В работах [1, 2] предложен новый простой и эффективный метод генерации регулярных последовательностей импульсов с гигагерцовой частотой повторения в лазерах на основе полупроводниковых оптических усилителей (SOA). Этот метод позволяет формировать импульсы без активной модуляции и/или насыщающегося поглощения генерируемого излучения. Предложенный метод основан на самоподдерживающейся модуляции перекрестного усиления, которая достигается за счёт добавления отрицательной оптической обратной связи (ООС) к конфигурации кольцевого лазера. Показано, что результирующая модуляция усиления лазера ограничена частотами, которые соответствуют как расстоянию продольных лазерных мод, так и самым высоким пикам в спектре неустойчивости, обусловленной наличием ООС. Осуществимость метода была подтверждена экспериментально путем демонстрации стабильной генерации субнаносекундных импульсов с частотой повторения до 1.79 ГГц в лазере на основе полупроводникового оптического усилителя с волоконным резонатором.

В работе [3], посвящённой дальнейшему исследованию того же метода, впервые продемонстрирована возможность спектральной перестройки генерации высокочастотных импульсов в широком диапазоне длин волн путем регулировки центральной длины волны пропускания внутрирезонаторного фильтра. Предложенная лазерная система позволила осуществить перестройку длины волны в диапазоне шириной 76 нм (от 1480 нм до 1556 нм) при сохранении импульсного режима генерации. Максимальный контраст импульсов, превышающий 85%, был достигнут в диапазоне перестройки шириной 43 нм (от 1505.7 нм до 1548.7 нм); на любой длине волны в указанном диапазоне стабильно достигался самостарт импульсного режима генерации импульсов с частотой повторения 1.3 ГГц.

В работе [4] был предложен и исследован новый метод синхронной генерации двухцветных импульсов (одновременно на двух длинах волн) с высокой частотой повторения, основанный на использовании стимулированного излучения редкоземельных ионов Yb и комбинационного рассеяния в общем полностью волоконном лазерном резонаторе без использования насыщающихся поглотителей или модуляторов. Предложенный новый механизм импульсной генерации аналогичен оптическому регистру сдвига, в котором две последовательности импульсов смещаются относительно друг друга на один период после каждого кругового обхода. Предложенный подход естественным образом решает критическую проблему компенсации дифференциальной задержки бихроматических

импульсов, обусловленную дисперсией групповых скоростей при распространении бихроматических импульсов вдоль волоконного лазерного резонатора; это существенно упрощает конструкцию лазера, повышает технологичность его сборки и, как следствие, снижает себестоимость. Механизм оптического сдвигового регистра обеспечивает стационарную генерацию бихроматических импульсов с общей относительно высокой частотой повторения, обратно пропорциональной величине дифференциальной задержки. В работе продемонстрирована осуществимость предложенного метода: получена стабильная лазерная генерация субнаносекундных бихроматических (на длинах волн 1066 нм и 1241 нм) импульсов с частотой повторения, превышающей 166 МГц. Предлагаемый подход является достаточно общим и может быть использован для генерации бихроматических импульсов в различных лазерных системах.



Обложка журнала Optica (импакт-фактор 8.4) с визуализацией к работе [4], см. <https://opg.optica.org/optica/aboutthecover.cfm?volume=10&issue=8>.

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 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, B. Nyushkov, A. Ivanenko, A. Bednyakova High-repetition-rate pulse generation via self-sustaining cross-gain modulation in a semiconductor-based laser. *Optics Letters*, v.48, No.23, 6084-6087 (2023). Импакт-фактор (WoS/JCR): 3.1.

<https://doi.org/10.1364/OL.506902>

[2] A.V. Ivanenko, A.E. Bednyakova, S.V. Smirnov, B.N. Nyushkov. Multi-GHz repetition-rate pulse generation by gain instability in a semiconductor-based all-fiber laser. 2024 International Conference Laser Optics (ICLO), p. 601-601.

<https://doi.org/10.1109/ICLO59702.2024.10624132>

[3] A.V. Ivanenko, A.E. Bednyakova, S.V. Smirnov, A.A. Rybak. Wavelength-tunable high-repetition-rate pulse generation in a SOA-based fiber laser with gain instability. *Laser Physics Letters*, v.21, No.12, 125005 (2024). Импакт-фактор (WoS/JCR): 1.4.

<https://doi.org/10.1088/1612-202X/ad8cc3>

[4] B. Nyushkov, A. Ivanenko, S. Smirnov, S. Turitsyn. Transient light shift register mechanism of bi-chromatic pulse generation. *Optica*, v.10, No.8, 1029-1036 (2023). Импакт-фактор (WoS/JCR): 8.4.

<https://doi.org/10.1364/OPTICA.495460>

[5] B.N. Nyushkov, S.V. Smirnov, A.V. Ivanenko, D.A. Khudozhitkova, A.E. Bednyakova. Fiber laser cavity with dynamically transformable topology for switchable bidirectional pulse generation. *Laser Physics Letters*, v.20, No.10, 105101 (2023). Импакт-фактор (WoS/JCR): 1.4.

<https://doi.org/10.1088/1612-202X/acf044>

[6] B. Nyushkov, A. Ivanenko, N. Koliada, S. Smirnov. Stationary high-energy pulse generation in Er-based fiber lasers via quasi-synchronous gain modulation. *Photonics*, v.11, No.1. (2023) Импакт-фактор (WoS/JCR): 2.1.

<https://doi.org/10.3390/photonics11010037>

[7] S. Smirnov, E. Podivilov, B. Sturman. Electrostatic conductive disc singularity resolved. *Journal of Applied Physics*, v.135, 124301 (2024). Импакт-фактор (WoS/JCR): 5.528.

<https://doi.org/10.1063/5.0190593>