

ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГУ

1. Тема работы

Оптимизация параметров волоконного осциллятора Мамышева для получения импульсов мегаваттной мощности.

2. Аннотация

Осциллятор Мамышева является перспективной схемой импульсного волоконного лазера, способного генерировать сверхкороткие импульсы рекордно высокой мощности и широкого спектра. В данной работе была впервые проведена оптимизация параметров волоконного осциллятора Мамышева с целью нахождения режимов генерации диссипативных солитонов с максимальной пиковой мощностью после сжатия. Для этого был разработан программный комплекс для моделирования и оптимизации кольцевых волоконных лазеров. Для моделирования распространения светового импульса вдоль волокна численно решалось обобщенное нелинейное уравнение Шредингера, остальные элементы резонатора воздействовали на импульс точечным образом. Для оптимизации был реализован алгоритм роя частиц, адаптированный для параллельных расчетов на вычислительном кластере НГУ.

Данный алгоритм был применен к численной модели осциллятора Мамышева, и в результате оптимизации были найдены режимы одноимпульсной генерации диссипативных солитонов, имеющих энергию 145 нДж, длительность на полувысоте 36 фс, ширину спектра 48 нм и пиковую мощность после сжатия 2.43 МВт. Было показано, что эффект вынужденного комбинационного рассеяния оказывает большое влияние на форму импульса и возможность оптимального сжатия, и его учет в численной модели существенно необходим. Сравнение с экспериментом в данной работе не проводилось.

3. Состав коллектива

- Перепелов Александр Евгеньевич, 1 курс магистратуры Сколтеха, исполнитель
- Куприков Евгений Александрович, м.н.с. ЛНФ НГУ, руководитель
- Кохановский Алексей Юрьевич, Университет ИТМО, руководитель

4. Информация о гранте

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 17-72-30006-П).

5. Научное содержание работы

5.1 Постановка задачи и современное состояние проблемы

Наиболее эффективным способом генерации сверхкоротких импульсов является пассивная синхронизация мод, при которой основным элементом лазерного резонатора является насыщающийся поглотитель, подавляющий фоновый шум и слабый сигнал, позволяя распространяться лишь излучению высокой интенсивности. В настоящее время в волоконных лазерах применяются как естественные насыщающиеся поглотители, так и искусственные, основанные на различных нелинейных эффектах в волокне.

Среди естественных наиболее распространены полупроводниковые зеркала и углеродные нанотрубки [1, 2]. Однако, основной недостаток естественных насыщающихся

поглотителей – их повреждение при высоких мощностях и деградация со временем, уменьшающая срок службы.

В качестве искусственных насыщающихся поглотителей используются схемы с использованием нелинейного вращения поляризации (НВП), нелинейные петлевые зеркала и нелинейные усиливающие петлевые зеркала [3-5]. Недостаток этих типов в том, что у них зависимость коэффициента пропускания от интенсивности падающего излучения имеет немонотонный характер, что приводит к эффекту обратного насыщающегося поглощения и ограничивает максимальную мощность. Наилучшие результаты показывают НВП-лазеры: импульсы с энергией ~ 20 нДж, длительностью ~ 100 фс [6]. Однако, НВП-лазеры крайне чувствительны к вибрациям, колебаниям температуры и т.д., что сильно затрудняет их использование.

Принципиально новый тип искусственного насыщающегося поглотителя был описан Regelskis *et. al.* [7]. В данной работе был продемонстрирован волоконный лазер, использующий механизм синхронизации мод, основанный на взаимодействии чередующейся спектральной фильтрации на двух существенно различных длинах волн и уширения спектра из-за фазовой самомодуляции. Этот механизм базируется на предложенном ранее Мамышевым [8] способе восстановления сигнала в системах телекоммуникаций, поэтому вышеупомянутый тип лазера известен как осциллятор Мамышева.

Осциллятор Мамышева активно исследуется в последние годы [9-15], он показал себя как устойчивый к внешним воздействиям источник сверхкоротких импульсов, пиковая мощность которых после сжатия внешним компрессором на порядок превышает таковую в других волоконных лазерах. Так, в 2017 году в работе [9] впервые продемонстрирован осциллятор Мамышева, с помощью которого можно получить сжатые импульсы длительностью ~ 40 фс с энергией ~ 50 нДж, что соответствовало пиковой мощности ~ 1 МВт. Двумя годами позже другая группа добилась уже 13-мегаваттных импульсов [11], а в 2021 году Lin *et al.* [13] получили фемтосекундные мегаваттные вихревые пучки непосредственно из осциллятора Мамышева (после сжатия).

Однако, на данный момент в литературе не описано способов нахождения режимов генерации импульсов такой большой мощности, поэтому проектирование и оптимизация архитектуры осциллятора Мамышева представляются актуальной задачей.

1. Saraceno C. J. et al. SESAMs for high-power oscillators: design guidelines and damage thresholds //IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2011. – Т. 18. – №. 1. – С. 29-41.
2. Viskontas K., Regelskis K., Rusteika N. Slow and fast optical degradation of the SESAM for fiber laser mode-locking at $1 \mu\text{m}$ //Lithuanian Journal of Physics. – 2014. – Т. 54. – №. 3.
3. Stolen R. H., Botineau J., Ashkin A. Intensity discrimination of optical pulses with birefringent fibers //Optics Letters. – 1982. – Т. 7. – №. 10. – С. 512-514.
4. Doran N. J., Wood D. Nonlinear-optical loop mirror //Optics letters. – 1988. – Т. 13. – №. 1. – С. 56-58.
5. Fermann M. E. et al. Nonlinear amplifying loop mirror //Optics Letters. – 1990. – Т. 15. – №. 13. – С. 752-754.
6. Chong A., Renninger W. H., Wise F. W. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser with pulse energy above 20nJ //Optics letters. – 2007. – Т. 32. – №. 16. – С. 2408-2410.
7. Regelskis K. et al. Ytterbium-doped fiber ultrashort pulse generator based on self-phase modulation and alternating spectral filtering //Optics letters. – 2015. – Т. 40. – №. 22. – С. 5255-5258.
8. Mamyshev P. V. All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect //24th European Conference on Optical Communication. ECOC'98 (IEEE Cat. No. 98TH8398). – IEEE, 1998. – Т. 1. – С. 475-476.
9. Liu Z. et al. Megawatt peak power from a Mamyshev oscillator //Optica. – 2017. – Т. 4. – №. 6. – С. 649-654.

10. Sidorenko P. et al. Self-seeded, multi-megawatt, Mamyshev oscillator //Optics Letters. – 2018. – Т. 43. – №. 11. – С. 2672-2675.
11. Liu W. et al. Femtosecond Mamyshev oscillator with 10-MW-level peak power //Optica. – 2019. – Т. 6. – №. 2. – С. 194-197.
12. Bednyakova A. et al. Influence of spectral filtration on pulse dynamics in ring-cavity Mamyshev oscillator //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 21. – С. 10398.
13. Lin D. et al. The generation of femtosecond optical vortex beams with megawatt powers directly from a fiber based Mamyshev oscillator //Nanophotonics. – 2021. – Т. 11. – №. 4. – С. 847-854.
14. Haig H. et al. Megawatt pulses from an all-fiber and self-starting femtosecond oscillator //Optics Letters. – 2022. – Т. 47. – №. 4. – С. 762-765.
15. Li Y. Y. et al. Generation of High-Peak-Power Femtosecond Pulses in Mamyshev Oscillators: Recent Advances and Future Challenges //Laser & Photonics Reviews. – 2023. – С. 2200596.

5.2 Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

В ходе работы был разработан комплекс программ для моделирования произвольных кольцевых волоконных лазеров. Математически элементы лазера можно представить как набор операторов, действующих на электрическое поле импульса, а процесс формирования импульса и лазерную генерацию -- как цикл, в котором к полю последовательно применяются эти операторы до выполнения некоторого условия выхода. Моделирование распространения излучения по волокну осуществлялось с помощью численного интегрирования обобщенного нелинейного уравнения Шредингера с учетом рамановского рассеяния:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = i \sum_{n=2}^3 \frac{i^n \beta_n}{n!} \frac{\partial^n A}{\partial t^n} - \frac{\alpha}{2} A + i\gamma \left(1 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(A(z, t) \int_0^{\infty} R(t') |A(z, t - t')|^2 dt' \right),$$

$$R(t) = (1 - f_R) \delta(t) + f_R h_R(t),$$

где $A(z, t)$ – медленно меняющаяся амплитуда электрического поля импульса, β_i – коэффициенты хроматической дисперсии волокна, α – коэффициент линейных потерь, γ – коэффициент керровской нелинейности, $f_R = 0.18$ – коэффициент, определяющий рамановский вклад в нелинейный отклик, $h_R(t)$ – функция рамановского отклика. Численное интегрирование осуществлялось симметричным методом расщепления по физическим процессам. Другие элементы резонатора – спектральные фильтры и ответвители – моделировались точно. Схема моделируемого лазера приведена на Рис. 1.

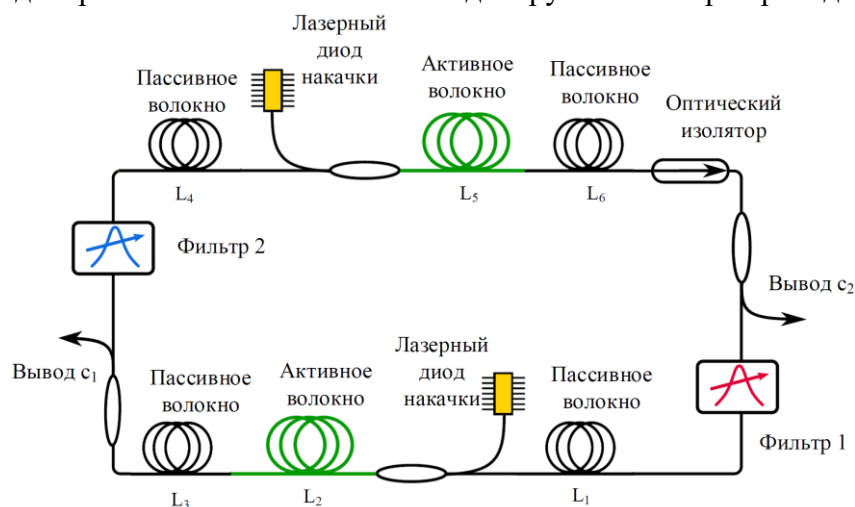


Рис. 1. Схема волоконного осциллятора Мамышева

Целевой функцией при оптимизации архитектуры была выбрана пиковая мощность генерируемых импульсов после сжатия вне резонатора. Для сжатия использовалась волоконная дисперсионная линия. В качестве алгоритма оптимизации был использован алгоритм роя частиц. Алгоритм начинается со случайной инициализации 70 частиц с координатами в пространстве параметров резонатора. Затем, на каждой итерации каждая частица запускает численную модель лазера с соответствующей архитектурой и вычисляет значение целевой функции. После этого все частицы пересчитывают свои координаты по определенному закону так, чтобы рой находил глобальный максимум целевой функции в заданной области поиска.

5.3 Результаты

На Рис. 2. показана эволюция целевой функции алгоритма. На Рис. 3. приведен наилучший найденный импульс, имеющий энергию 145 нДж, длительность 36 фс и пиковую мощность после сжатия 2.43 МВт.

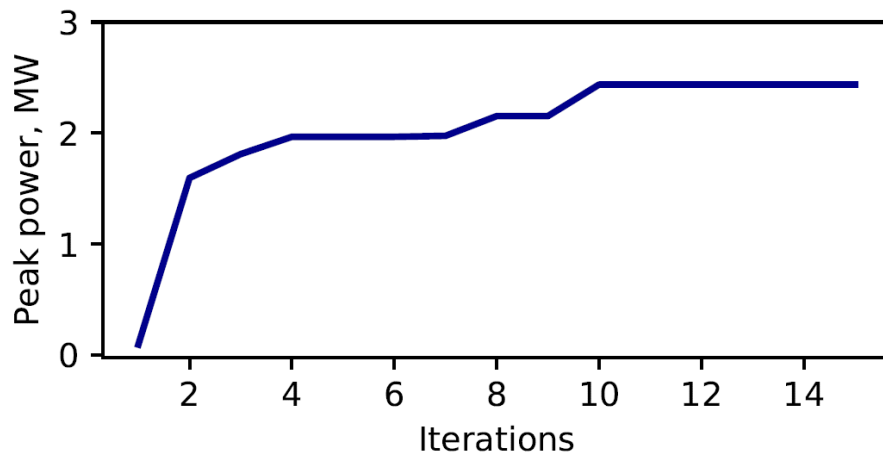


Рис. 3. Эволюция целевой функции – пиковой мощности после сжатия.

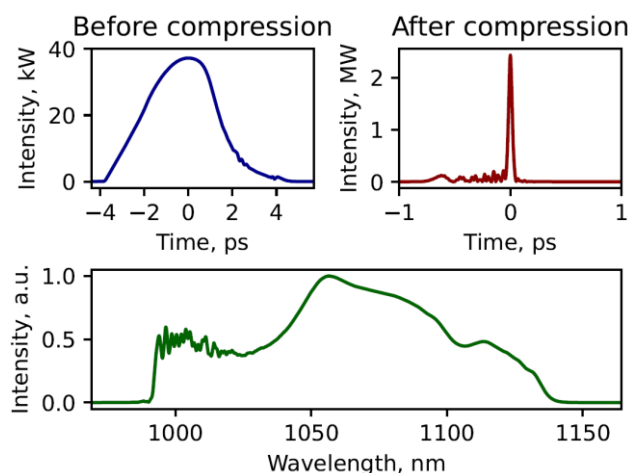


Рис. 3. Импульс с наибольшей пиковой мощностью после сжатия (2.43 МВт)

6. Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Поскольку точность и стабильность работы алгоритма роя частиц напрямую зависит от количества используемых частиц-агентов, использование ресурсов кластера является жизненно необходимым. Сама численная модель лазера не распараллеливается, однако, кластер позволяет рассчитывать все частицы роя на одной итерации параллельно.

7. Перечень публикаций, содержащих результаты работы

1. Kuprikov E. *et al.* Designing Mamyshev oscillator cavity by particle swarm optimization algorithm //2022 International Conference Laser Optics (ICLO). – IEEE, 2022
2. Perepelov A. *et al.* Inverse design of a Mamyshev Oscillator with MW peak power by particle swarm optimization algorithm// JOSA B, 2024 (принята к публикации)