

Усиление групп связанных солитонов в полностью волоконном эрбиевом двухкаскадном усилителе

С.Г. Сазонкин^{✉ 1}, А. Исмаил^{1,2}, И.О. Орехов¹, А.А. Крылов³, П.В. Платонов¹,
Д.А. Дворецкий¹, В.Е. Карасик¹

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, Россия, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, sazstas@bmstu.ru

² Московский физико-технический институт МФТИ
141701, Долгопрудный, Россия, Институтский переулок, 9

³ Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова РАН
Научный Центр Волоконной Оптики им. Е.М. Дианова
119333, Москва, Россия, ул. Вавилова, 38.

Работа посвящена экспериментальному исследованию процесса усиления групп связанных солитонов (солитонных молекул) в полностью волоконном эрбиевом усилителе. Усиление 10-импульсного режима (с длительностью импульса 509 фемтосекунд и временным разделением импульсов 2,64 пс), генерируемого кольцевым волоконным лазером с пассивной синхронизацией мод на основе нелинейной эволюции поляризации (НЭП) до значений средней мощности 152 мВт. Процесс усиления не сопровождался нарушением порядка связанного состояния, однако продемонстрировал существенное уширение спектра, что привело к генерации когерентного суперконтинуума. Спектр с гребенчатой структурой в диапазоне от 1400 нм до 1700 нм был получен без изменения таких характеристик солитонных молекул как количество импульсов (при увеличении длительности импульсов в молекуле до 1,13 пс) и без изменения временного разделения между импульсами. Работа также демонстрирует возможность использования волоконного лазера с усилением солитонных молекул в качестве источника импульсного излучения с высокой средней мощностью, при сохранении низкой пиковой мощности за счет разделения энергии излучения на группу импульсов.

Ключевые слова: волоконные лазеры, фемтосекундные лазеры, солитонные молекулы, эрбиевые лазеры; Fiber lasers, femtosecond lasers, soliton molecules, erbium-doped fiber lasers.

Введение

На сегодняшний день генерация солитонных молекул (СМ) в волоконных эрбиевых лазерах привлекает все большее внимание из-за их уникальных характеристик как режима генерации ультракоротких импульсов (УКИ). В таком режиме стабильное связанное состояние между числом (порядком) солитонов образует группу импульсов, основные характеристики которой обычно определяются длительностью импульсов их временным разделением импульсов и разностью фаз между импульсами (равной $\pm \pi/2$ в случае асимметричных импульсов). Однако, сравнивая характеристики усиленных СМ с усиленным одноимпульсным режимом (рис. 1), можно отметить существенное преимущество использования СМ в системах усиления лазерного

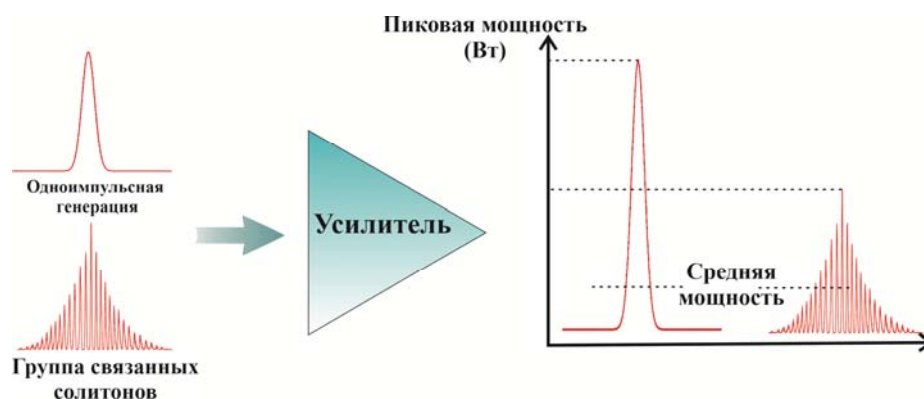


Рис. 1. Иллюстрация эволюции амплитудных характеристик одноимпульсного режима и режима связанных солитонов после усиления

излучения. При том же уровне средней мощности усиленного СМ и одноимпульсного режима пиковая мощность СМ намного ниже. Усиленная СМ представляет собой группу импульсов с периодом в несколько пикосекунд (частоты повторения импульсов в молекуле составляют сотни ГГц) с высокой средней мощностью и низкой пиковой мощностью по сравнению с одноимпульсными режимами. Хотя высокоэнергетические им-

пульсы (с высокой пиковой мощностью) широко используются в различных областях, особенно в обработке материалов [1]. Для других задач, например в медицине, высокая пиковая мощность является негативным фактором. Результаты в работе [2] показали, что производительность литотрипсии увеличивается при увеличении средней и уменьшении пиковой мощностей. Этот результат может стимулировать применение СМ в таких областях. Более того, усиленное излучение с высокой пиковой мощностью не может быть доставлено стандартными волокнами из-за влияния нелинейных факторов на качество импульса. Таким образом, использование СМ может упростить задачу доставки УКИ с высокой средней мощностью.

Материалы и методы

На рис. 2 показана экспериментальная установка полностью волоконного кольцевого лазера, легированного эрбием, работающего в режиме генерации СМ. В качестве активной среды было использовано эрбиевое волокно (EDF) длиной 4,65 м с положительной ДГС до $+22,2 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$. Относительно длинное эрбиевое волокно обеспечивало высокую эффективность, компенсируя аномальную дисперсию пассивной части резонатора и увеличивая нелинейность (диаметр модового поля 5,3 мкм при 1560 нм) [3]. Поглощение сигнала на длине волны 980 нм составляло 12 дБ/м. Другим преимуществом используемого EDF являлось то, что он имел отрицательную дисперсию третьего порядка (ДТП), которая компенсировала положительную дисперсию третьего порядка пассивной части резонатора [4,5]. В таблице 1 приведены дисперсионные характеристики всех используемых волокон. Кроме того, Нелинейная эволюция поляризации (НЭП) осуществлялась благодаря использованию изолятора с сохранением поляризации (polarization-maintaining isolator, PM-ISO) и двух контроллеров поляризации (КП). Активная среда накачивалась с помощью диодного лазера с длиной волны 980 нм, через волоконный мультиплексор (wavelength division multiplexor, WDM). Для вывода излучения из лазерного резонатора использовался волоконный сварной разветвитель с коэффициентом деления 0,5.

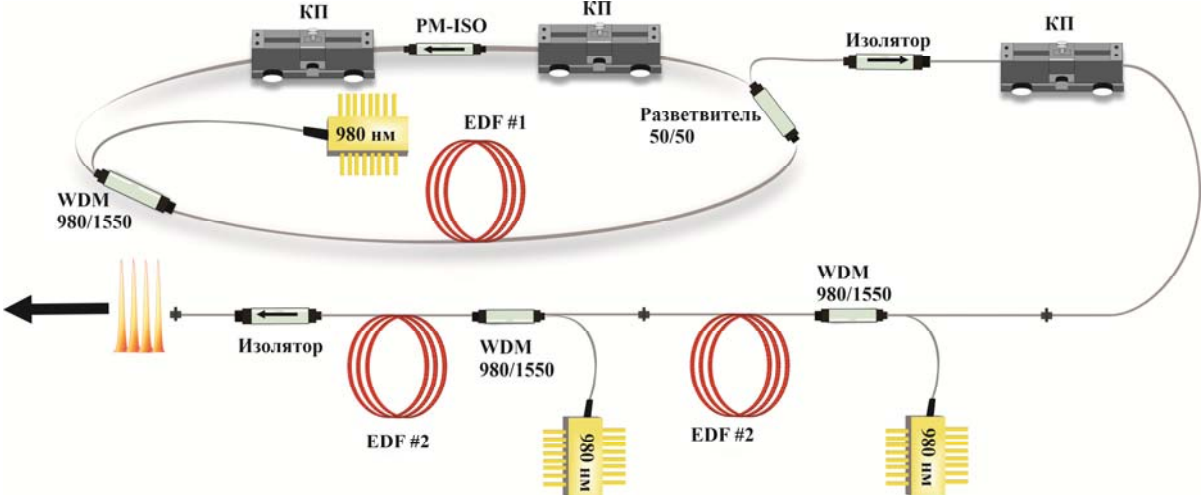


Рис. 2. Экспериментальная установка полностью волоконного эрбиевого генератора с двухкаскадным усилителем

Двухкаскадный полностью волоконный усилитель использовался для исследования возможностей усиления СМ. При построении усилителя солитонных молекул для предотвращения нарушения режима генерации были приняты во внимание следующие факты: в качестве активной среды мы использовали самодельный EDF с 43 дБ/м усиления с малой длиной (1,5 м в первом каскаде и 1 м во втором), низким значением положительного параметра дисперсии второго порядка $+6,6 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$ и диаметром поля моды 4,5 мкм, что приводит к усилению нелинейности во время усиления. Такая дисперсия и нелинейные характеристики EDF гарантируют, что импульсы не будут приобретать большой чирп при распространении в нормальной дисперсионной среде. Увеличение нелинейности привело к уширению спектра [4], вызванному в основном фазовой самомодуляцией (ФСМ) при усилении импульсов. Точное взаимодействие дисперсии и нелинейности повысило устойчивость режима СМ к нарушению синхронизации мод.

Характеристики активных волокон, используемых в экспериментальной установке

Параметр	EDF (№ 1)	EDF (№ 2)
$\beta_2, \text{ps}^2/\text{km}$	22,2	6,6
Диаметр модового поля, μm	5,3	4,5
Поглощение слабого сигнала на 980 нм, дБ/м	14	43
Длина волны отсечки, нм	1000	900
Поглощение полоса усиления (на 1560 нм), дБ/м	25	27

Результаты эксперимента

Рис. 2. показывает характеристики полученной генерации СМ при мощности накачки 377 мВт, период импульса составил 52 нс, что соответствует повторению импульсов 19,34 МГц, выходная мощность от генератора составляет 52 мВт. Интерференционные полосы оптического спектра, созданные связью когерентных солитонов с периодом модуляции $\Delta\lambda \approx 2,87$ нм. На рис. 3, в показана автокорреляция при мощности накачки 377 мВт когерентная генерация 10 солитонов с длительностью импульса 509 фс (с аппроксимацией гауссовского профиля) и разделением между солитонами 2,64 пс. Пятикратное соотношение между длительностью импульса и разделением указывает на низкое прямое солитон-солитон взаимодействие [6].

Оптический спектр и автокорреляция усиленного СМ во втором каскаде показаны на рис. 3, б, г при мощности накачки 405 мВт в первом каскаде и 365 мВт во втором каскаде максимальная выходная мощность составила 152 мВт. Как можно было видеть, расширение спектра после усиления позволило генерировать суперконтинуум без деления импульса; автокорреляция после усиления указала на когерентность между солитонами без изменения количества импульсов и с увеличением длительности импульса до 1,129 пс.

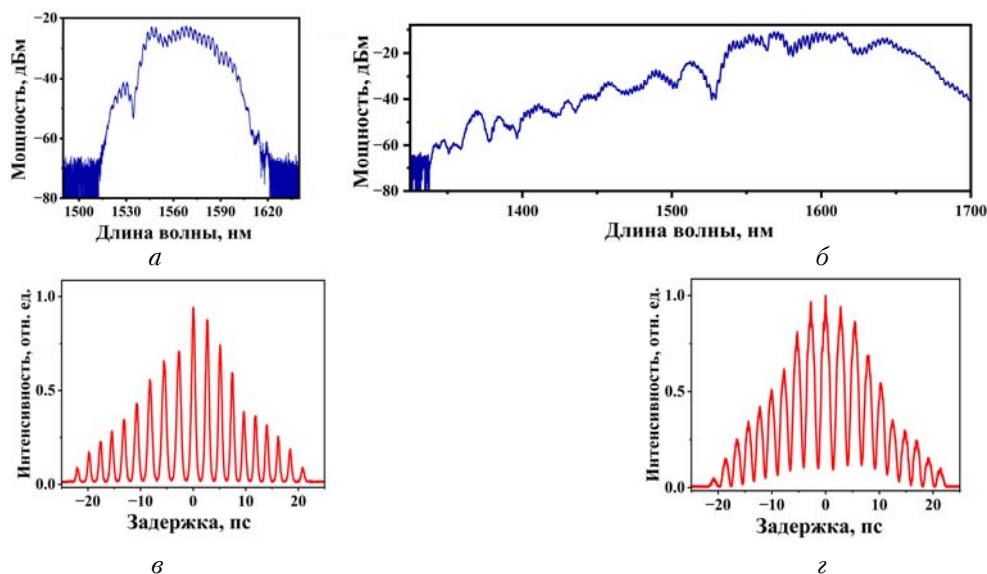


Рис. 3. Оптический спектр и автокорреляция группы связанных солитонов до (а, в) и после (б, г) усиления

Пиковая мощность СМ может быть рассчитана по формуле $P_{\text{peak}} = 0,94E/\tau N$, где E — энергия импульсов, τ — длительность импульса, а N — количество солитонов [7], этот расчет учитывает гауссово приближение импульсов и предполагает, что распределение энергии во всех солитонах одинаково. Можно отметить, что даже если средняя мощность увеличилась в 3 раза после усиления, пиковая мощность увеличилась только на 23%. Этот результат представляет режим СМ высокого порядка как потенциальный источник сверхкоротких импульсов с высокой средней мощностью без резкого увеличения пиковой мощности.

Заключение

В данной работе было продемонстрировано усиление солитонных молекул высокого порядка в эрбиевом волоконном усилителе. Полученные результаты указывают на возможность усиления СМ до 152 мВт средней мощности без изменения количества импульсов и без существенного роста пиковой мощности. Это достигается благодаря разделению энергии излучения между группой импульсов. Кроме того, наблюдалось уширение спектра в процессе усиления эрбиевого волокна, что позволяет генерировать суперконтинуум с высокой когерентностью без использования специальных высоконелинейных сред. Мы ожидаем, что разработанная система, представленная в этой работе, может найти потенциальное применение, особенно в медицинских областях, где требуются источники с высокой средней мощностью и контролируемой пиковой мощностью.

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзадания № FSFN-2024-0018.

Список литературы

1. Mizunami T., Ehara A. Femtosecond-pulsed laser micromachining and optical damage by an erbium-doped fiber-laser system // *Microelectron Eng.* 2011. V. 88, N 8. P. 2334–2337.
2. Orekhov O., Krivosheev A.V., Kudashov I.A., Bogomolov V.M., Shupenev A.E., Sazonkin S.G., Prosiannikov M.Y., Anokhin N.V., Shcherbachev A.V., Apolikhin O.I., Karasik V.E., Grigoryants A.G., Pavlov A.V. Study of the Effect of Laser Radiation Parameters on the Efficiency of Lithotripsy // *Applied Sciences*. 2023. V. 13, N 15. P. 8565.

3. Voropaev V., Donodin A., Voronets A., Lazarev V., Tarabrin M., Karasi V., Krylov A. Demonstration of two generation regimes in high power passively mode-locked thulium-doped all-fiber ring laser at fully negative intracavity dispersion. In *Advanced Solid State Lasers*, pp. AM6A-19. Optica Publishing Group, 2018.
4. Ismaeel A., Orekhov I.O., Sazonkin S.G., Dvoretzkiy D.A., Krylov A.A., Karasik V.E., Denisov L.K. Low-noise soliton molecule generation with an in-phase controllable pulse number by third- and second-order dispersion compensation in an all-fiber erbium-doped oscillator // *Applied Optics*. 2024. V. 63, Iss. 33. P. 8503–8509.
5. Ismaeel A., Krylov A. 17 fs environmentally stable erbium-doped all-fiber 23.76 MHz oscillator with extra-cavity nonlinearity and dispersion management // *Opt. Lett.* 2024. V. 49. P. 5977–5980.
6. Voropaev V., Xie Sh., Donodin A., Batov D., Tarabrin M., Troles J., Lazarev V. Octave-Spanning Supercontinuum Generation in As₂S₃-Silica Hybrid Waveguides Pumped by Thulium-Doped Fiber Laser // *Journal of Lightwave Technology*. 2023. V. 41, N 15. P. 5116–5122.
7. Ismaeel A., Orekhov I.O., Sazonkin S.G., Prudnikov A.O., Fedorenko A.Y., Dvoretzkiy D.A., Krylov A.A., Feifei Yan, Denisov L.K., Karasik V.E. Coherent supercontinuum generation by the high-order soliton molecules amplification // *Optics & Laser Technology*. 2025. V. 188. P. 112913.

S.G. Sazonkin, A. Ismaeel, I.O. Orekhov, A.A. Krylov, D.A. Dvoretzkiy, V.E. Karasik. Amplification of Soliton Molecules in an all-fiber erbium-doped two-cascade Amplifier.

This work is devoted to the experimental study of the amplification process of groups of bound pulses (soliton molecules) in an all-fiber erbium-doped amplifier. The amplification of a 10-pulse regime (with a pulse duration of 509 femtoseconds and temporal separation between pulses of 2.64 picoseconds), generated by a ring fiber laser with passive mode locking based on nonlinear polarization evolution (NPE), up to an average power of 152 mW, is demonstrated. The amplification process did not disrupt the order of the bound state but resulted in significant spectral broadening, leading to the generation of a coherent supercontinuum. A comb-like spectrum in the range from 1400 nm to 1700 nm was obtained without altering key characteristics of the soliton molecules, such as the number of pulses (while increasing the pulse duration within the molecule to 1.13 ps) and without changing the temporal separation between the pulses. This work also demonstrates the potential of using an all-fiber laser with soliton molecule amplification as a source of pulsed radiation with high average power while maintaining low peak power due to the energy distribution across a group of pulses.