

Исследование генерации диссипативных ВКР-солитонов во внешних волоконных резонаторах различного типа

Волоси Виталий Михайлович

аспирант НГУ, инженер-исследователь тем. группы 17-1 ИАиЭ СО РАН

Харенко Денис Сергеевич

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник тем. группы 17-1 ИАиЭ СО РАН

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИАиЭ СО РАН (проект № FWNG-2024-0015).

Аннотация

Посредством численного моделирования была детально исследована генерация диссипативных ВКР-солитонов вблизи 1,7 мкм во внешнем волоконном резонаторе с синхронной накачкой импульсами различного типа. Дополнительно было сделано численное моделирование лазеров с синхронизацией мод на основе нелинейного вращения поляризации: генератора сильночирпованных диссипативных солитонов и лазера на основе чирпованной волоконной брэгговской решётки с аподизацией, которые являлись накачкой внешнего резонатора в экспериментах. Численно продемонстрированы конфигурации внешнего резонатора, в которых энергия диссипативных ВКР-солитонов может достигать 8 нДж.

1. Постановка задачи

Численное моделирование генератора диссипативных ВКР-солитонов, а также двух лазеров накачки: генератора сильночирпованных диссипативных солитонов (СЧДС) и генератора классических солитонов близких к спектрально-ограниченным. Реализация модели с использованием пакета PyOFSS на языке программирования Python. Планируется исследование влияния параметров импульсов накачки внешнего резонатора, а именно: пиковой мощности, длительности, параметра чирпа и временной задержки, с другой стороны, исследовалось влияние характеристик самого резонатора: длины оптических волокон с нормальной и аномальной дисперсией, доли выводимого излучения, суммарной дисперсии и длины.

2. Современное состояние проблемы

Волоконные генераторы ультракоротких импульсов активно применяются для анализа строения биологических объектов и изучения внутренних процессов. Это обусловлено тем фактором, что они позволяют реализовать неинвазивные методы исследований, в частности, многофотонную флуоресцентную микроскопию и спектроскопию вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [1]. В связи с особенностями исследуемых объектов, важным является условие генерации излучения в так называемых «окнах прозрачности воды»: 1,3 и 1,7 мкм. На сегодняшний день продемонстрированы источники, способные излучать в этих спектральных диапазонах посредством прямой генерации импульсов, а также за счёт применения нелинейных эффектов. При этом отдельно следует выделить методику генерации диссипативных ВКР-солитонов, которая зарекомендовала себя как эффективный инструмент для исследований в области 1,3 мкм, и лишь недавно была продемонстрирована в области 1,7 мкм [2]. Данная работа является продолжением нашего исследования в данной области. Мы провели экспериментальное и численное исследование зависимости параметров диссипативных ВКР-солитонов в области длин волн 1,6-1,7 мкм от пиковой мощности импульсов накачки и коэффициента обратной связи внешнего резонатора, результаты которого опубликованы в статье [3].

3. Описание численной модели

Численное моделирование эволюции импульсов в оптическом волокне осуществлялось с использованием библиотеки Python-based optical fibre system simulator (PyOFSS). Также производилось численное решение обобщенного нелинейного уравнения Шрёдингера методом Рунге-Кутты 4 порядка в представлении взаимодействий [4], при учёте функции ВКР-отклика, основанной на модели множественных колебаний мод для кварцевых световодов [5].

Схема генератора диссипативных ВКР-солитонов включает в себя три основных блока: задающий генератор, усилитель и внешний резонатор. В качестве задающего генератора использовались стандартные модельные импульсы в форме диссипативного солитона и гиперболического секанса, а также численно смоделированные импульсы близкие к экспериментальным от лазеров с синхронизацией мод на основе нелинейного вращения поляризации (НВП): генератор сильночирпованных диссипативных солитонов (СЧДС) и лазер на основе чирпованной волоконной брэгговской решётки с аподизацией (АЧВБР), которые имели суммарную нормальную и аномальную дисперсию резонаторов, соответственно.

Варьируемыми параметрами внешнего резонатора, влияющими на генерацию диссипативных ВКР-солитонов, являлись: доля выводимого ответвителем излучения, временная задержка, длины оптических волокон PM Raman и PM 1550, а именно сумма и соотношение этих длин. Особое внимание в работе уделялось изучению влияния пиковой мощности, длительности, энергии, чирпа и типа импульсов накачки на характеристики генерируемых диссипативных ВКР-солитонов.

4. Результаты и обсуждение

Было сделано численное моделирование лазеров с синхронизацией мод, а именно: генератора СЧДС и лазера на основе АЧВБР. При численном моделировании явно выраженного влияния ширины фильтра на параметры генерируемых импульсов не наблюдалось и ключевую роль играла именно вносимая АЧВБР дисперсия. Режимы генерации наблюдались во всех исследуемых конфигурациях и как итог оптимальными параметрами были выбраны: ширина фильтра 1 нм и дисперсия 25, 50 и 100 пс².

Также было сделано детальное исследование зависимости характеристик диссипативных ВКР-солитонов от параметров самого резонатора и импульсов накачки. Показано, что для получения генерации диссипативных ВКР солитонов в качестве накачки подходят как диссипативные солитоны, так и классические солитоны близкие к спектрально ограниченному, с шириной оптического спектра от 0,1 до 24 нм. Определены параметры импульсов накачки для различных длин внешнего резонатора (15, 30 и 60 м) для достижения максимальной энергии импульсов в 8 нДж. Также определено, что чем больше длина оптического волокна с нормальной дисперсией во внешнем резонаторе, тем более длинные импульсы можно использовать для его накачки. Выявлено, что использование ответвителя с коэффициентом вывода излучения 90-95% позволяет максимально расширить область генерации диссипативных ВКР солитонов и снизить влияние фазовой само модуляции. Показано, что область генерации диссипативных ВКР солитонов схлопывается вблизи нуля суммарной дисперсии внешнего резонатора при длинах OFS PM Raman 10 м и более. Численно воссоздана полная схема генератора диссипативных ВКР-солитонов с использованием в качестве накачки как сильночирпованных диссипативных солитонов, так и классических солитонов близких к спектрально-ограниченному.

Как итог, проведенное численное моделирование позволило детально изучить влияние всех параметров как накачки, так и самого резонатора, на генерацию импульсов и их характеристики. Все результаты описанные в данном разделе были представлены в очном докладе на 10 Всероссийской Диановской конференции по волоконной оптике "ВКВО 2025" [6].

5. Эффект от использования кластера

Многие параметры, которые исследовались в представленной работе подбирались вручную, в частности, крайне трудоёмко подбирать временную задержку и параметры импульса накачки необходимые для генерации диссипативных ВКР-солитонов. Именно благодаря использованию графических ускорителей NVIDIA Tesla V100 удалось проанализировать области стабильной генерации импульсов и изучить влияние буквально всех параметров, которые есть в данной системе.

6. Список литературы

- [1] Fan S. et al. Advances of Mode-Locking Fiber Lasers in Neural Imaging //Advanced Optical Materials. – 2023. – Т. 11. – №. 15. – С. 2202945.
- [2] Qin Y. et al. All-fiber high-power 1700 nm femtosecond laser based on optical parametric chirped-pulse amplification //Optics express. – 2020. – Т. 28. – №. 2. – С. 2317-2325.
- [3] Zhdanov I. et al. Raman dissipative soliton source of ultrashort pulses in NIR-III spectral window //Optics Express. – 2023. – Т. 31. – №. 21. – С. 35156-35163.
- [4] Zhang Z., Chen L., Bao X. A fourth-order Runge-Kutta in the interaction picture method for numerically solving the coupled nonlinear Schrödinger equation // Optics Express. —2010. —Vol. 18, no. 8. —P. 8261–8276.
- [5] Hollenbeck D., Cantrell C. D. Multiple-vibrational-mode model for fiberoptic Raman gain spectrum and response function // JOSA B. — 2002. — Vol. 19, no. 12. —P. 2886–2892.
- [6] Волоси В. М., Елизарова П. А., Мункуева Ж. Э., Голиков Е. В., Достовалов А. В., Коляда Н.А., Харенко Д. С. Генерация диссипативных ВКР-солитонов во внешнем волоконном резонаторе с накачкой импульсами пикосекундной длительности близкими к спектрально-ограниченным // 10 Всероссийская Диановская конференция по волоконной оптике (ВКВО-2025), 2025. - С. 405-407.