

- **Тема работы. Генерация диссипативных солитонов в телекоммуникационном спектральном диапазоне.**
- Состав коллектива. М.П. Федорук, С.А. Бабин (ИАиЭ СО РАН), Е.В. Подвильов (ИАиЭ СО РАН), Д.С. Харенко (ИАиЭ СО РАН), А.Е. Беднякова, И.С. Жданов
- Научное содержание работы:

Недавний прогресс в разработке мощных фемтосекундных волоконных лазеров, работающих в области 1 мкм, принцип действия которых основан на генерации сильно-чирпованных (с большим значением параметра фазовой модуляции) диссипативных солитонов (ДС) в волоконном резонаторе с полностью нормальной дисперсией [1-3], открывает возможности для переноса данной технологии в другие спектральные регионы. Первым кандидатом является телекоммуникационный спектральный диапазон, где данный тип лазеров имеет большое число практических применений: от когерентной антистоксовой микроскопии комбинационного рассеяния (CARS) и синтеза импульсов предельно короткой длительности до волоконно-оптических линий связи. Поскольку волоконные лазеры являются многопараметрическими нелинейными физическими системами, наиболее эффективным способом их исследования на этапе создания и оптимизации является использование методов математического моделирования.

В случае, когда изменение параметров диссипативного солитона внутри резонатора не является малым, необходимо применять дискретный подход к моделированию волоконного лазера, основой которого является численное решение нелинейного уравнения Шрёдингера. Примером такой системы является рассмотренный нами полностью волоконный лазер, генерирующий сигнал в области 1.5 мкм [5]. В подобных лазерах основным фундаментальным ограничением энергии сигнала является влияние эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР, рамановское рассеяние). Для учёта эффекта ВКР в волоконном световоде требуется использование более сложной модели – обобщённого нелинейного уравнения Шрёдингера, включающего запаздывающий отклик среды. Ранее нами была продемонстрирована генерация диссипативного солитона в волоконном лазере в присутствии сильного ВКР [6]. Энергия сигнала достигала 25 нДж. Также впервые была получена генерация рамановского диссипативного солитона (РДС) и каскадная генерация РДС в данной спектральной области [7,8]. На следующем этапе работы основные принципы генерации мощных импульсов были перенесены в область 1.5 мкм. Основной принцип стабильной генерации мощных импульсов в волоконном лазере с синхронизацией мод на основе эффекта нелинейного вращения поляризации заключается в разделении эффектов амплитудной самомодуляции и формирования диссипативного солитона – использовании световодов с сохранением поляризации для стабильной синхронизации мод и участка световода без сохранения поляризации, в котором происходит вращение поляризационного эллипса. Параметры резонатора были подобраны таким образом, чтобы удовлетворить необходимым условиям генерации ДС, при этом все компоненты резонатора являлись коммерчески доступными с расчётом на последующую экспериментальную реализацию модельной схемы лазера. Для генерации сильно-чирпованных ДС необходимо выполнение нескольких условий: нормальная дисперсия резонатора, наличие спектральной фильтрации и достаточно высокий коэффициент усиления в активном световоде. Поскольку нам не удалось найти коммерчески доступный световод, сохраняющий состояние поляризации и обладающий нормальной дисперсией в области 1.5 мкм, была предпринята попытка использования световода DCF-38 без сохранения поляризации для достижения нормальной дисперсии резонатора и световода с сохранением поляризации PM-SMF, но аномальной дисперсией. Данный выбор световодов может существенно ограничивать энергию сигнала и требует дальнейшего исследования режимов лазерной генерации с помощью математического моделирования.

Лазер состоит из участков волоконного световода и дискретных элементов. Решается задача распространения импульса в световоде из шума малой амплитуды, моделью для которого служит “белый” гауссовский шум. Моделирование последовательных проходов сигнала вдоль резонатора выполняется до установления решения. Распространение сигнала в световоде описывает обобщённое нелинейное уравнение Шрёдингера на медленно-меняющуюся огибающую электромагнитного поля. Модель описывает все основные эффекты в волоконном лазере, а именно: дисперсию групповых скоростей, которая приводит к уширению волнового пакета, дисперсию высоких порядков, нелинейные эффекты, включая керовскую нелинейность и вынужденное комбинационное рассеяние. Функция электромагнитного отклика среды и содержит мгновенный электронный и запаздывающий рамановский отклик. Функция рамановского отклика определяет спектр ВКР-усиления (мнимая часть фурье-образа функции отклика). Для аппроксимации экспериментально измеренной рамановского отклика в численном счёте используется аналитическая модель (multiple-vibrational-mode model). Приближённое решение уравнения Шрёдингера было найдено с помощью симметричного Фурье-метода с расщеплением по физическим процессам. В качестве активной среды использовался световод, легированный эрбием. Модельный спектр усиления эрбиевого световода имел две вершины с максимумами на 1530 и 1550 нм и соответствовал экспериментально измеренному спектру усиления активного эрбиевого световода. Пассивная синхронизация мод основана на механизме нелинейного вращения поляризации (НВП) в световоде DCF-38. Спектральная фильтрация была реализована численно как умножение оптического поля на функцию пропускания в частотной области. Спектр пропускания фильтра Лио был аппроксимирован синусом с периодом и коэффициентом максимального пропускания, соответствующим экспериментально измеренным значениям. Для оптимизации режима генерации импульсов было выполнено математическое моделирование волоконного лазера, при этом длины световодов DCF и PM-SMF, положение вершины и ширина спектрального фильтра являлись оптимизационными параметрами. Были получены зависимости основных параметров импульса на выходе из резонатора от мощности накачки, параметров фильтра и длин световодов. Продемонстрировано, что увеличение длины DCF требует использования более узкого фильтра для устойчивого формирования импульсов. Оптимальная длина DCF, найденная численно, составила 6 метров при длине PMF, равной 5.4 метра. Стоит отметить, к потере стабильности лазерной генерации приводило чрезмерное действие НВП (NPE overdriving), а не ВКР, как предполагалось в начале работы. Чрезмерный поворот эллипса поляризации в резонаторе не позволил увеличить длину DCF более пяти метров для достижения максимальной возможной энергии сигнала. При этом порог ВКР-генерации не был достигнут. Максимальная энергия, полученная численно, не превышает 2.5 Дж. Спектр сигнала на выходе из резонатора имеет типичную для ДС форму с резкими краями. Длительность импульса равна 6 пс без сжатия и 150 фс после компенсации chirpa. На основе результатов моделирования были проведены натурные эксперименты и продемонстрировано качественное согласие численных и экспериментальных результатов. Полученная в расчётах и эксперименте энергия сигнала является рекордной для полностью волоконных лазеров, генерирующих фемтосекундные импульсы (~ 100 фс) в области 1.5 мкм (рис.1).

Для лучшего понимания внутррезонаторной эволюции импульса, было выполнено теоретическое исследование изменения спектральной и временной формы импульса вдоль резонатора (рис.1). Чирпованный импульс длительностью 10 пс сжимается при распространении в ПМ световоде с аномальной дисперсией, ширина спектра при этом практически не изменяется и равна 40 нм. Далее, при прохождении фильтра Лио, обрезаются края импульса во временной и частотной областях, длительность уменьшается в два раза – до 4 пс. Ширина спектра при этом достигает своего минимума, равного 29 нм. Форма импульса также существенно изменяется. Далее импульс продолжает самоподобное распространение в

PM световоде без изменения своей формы. После усиления в эрбиевом световоде сигнал распространяется в DCF с большой нормальной дисперсией, где он приобретает линейный чирп, а спектр сигнала приобретает резкие края, характерные для сильно-чирпованного ДС. Ширина спектра увеличивается от 30 до 38 нм. В заключение, на поляризационном светоделителе происходит разделение ортогональных поляризаций сигнала, одна из которых идёт на выход из лазера, а другая продолжает своё распространение на следующем обходе резонатора. Формирование импульса происходит благодаря суммарному влиянию нелинейности, дисперсии, потерь и усиления. Спектральная фильтрация осуществляется фильтром Лио, амплитудная модуляция – совместным влиянием НВП и поляризационного светоделителя. В DCF происходит формирование симиляритона. Таким образом, был сделан вывод о том, что рассмотренный лазер генерирует самоподобные импульсы (симиляритоны). Однако, рассмотренная эволюция импульса ближе к режиму генерации ДС, чем режиму генерации симиляритонов в активном световоде с локальным нелинейным аттрактором [9], поскольку изменения длительности и спектральной ширины в резонаторе не превосходят 50% относительно их средних значений. Доказательством также служит тот факт, что в рассмотренном лазере нелинейный и дисперсионный набег фаз равны, что характерно для сильно-чирпованных ДС.

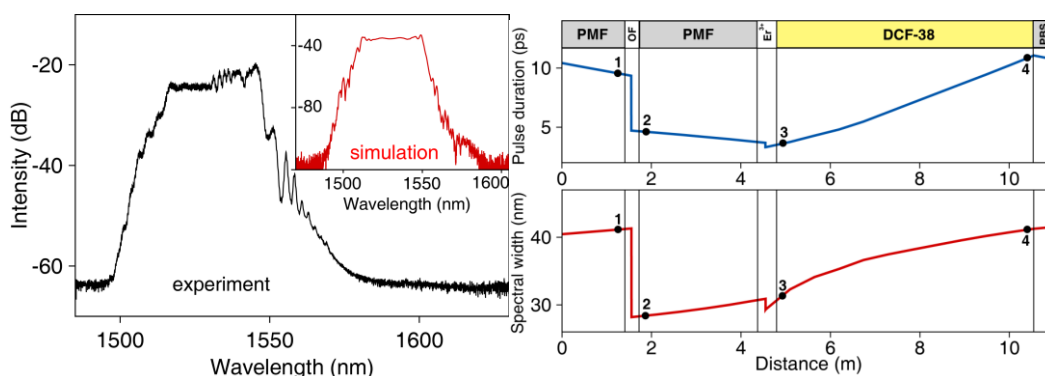


Рисунок 1. (Слева) Спектры выходного излучения в расчёте и эксперименте. (Справа) Эволюция ширины спектра и временной длительности сигнала вдоль резонатора.

Поскольку увеличение длины световода DCF-38 в рассматриваемом лазере невозможно из-за потери устойчивости синхронизации мод, энергия сигнала может быть увеличена посредством увеличения его спектральной ширины. Здесь ограничивающим фактором будет являться дисперсия третьего порядка в резонаторе, которую необходимо компенсировать. Ещё одним способом увеличения энергии сигнала, который будет рассмотрен далее, является использование ПМ-световодов (световодов с сохранением состояния поляризации) с большой нормальной дисперсией в области 1.5 мкм.

- [1] A. Chong, J. R. Buckley, W. H. Renninger, and F. W. Wise, *Opt. Express* 14, 10095 (2006).
- [2] S. Lefrançois, K. Kieu, Y. Deng, J. D. Kafka, and F. W. Wise, *Opt. Lett.* 35, 1569 (2010).
- [3] D. S. Kharenko, V. A. Gonta, and S. A. Babin, *Laser Phys. Lett.* 13, 025107 (2016).
- [4] Shtyrina O.V., Podivilov E.V., Yarutkina I.A., Skidin A.S., Fedoruk M.P., “Theoretical optimization of pulse properties in ultra-Long fiber laser”, *Proceedings of OSA Advanced Photonics Congress 2017*, in print.
- [5] D.S. Kharenko, I.S. Zhdanov, A.E. Bednyakova, E.V. Podivilov, M.P. Fedoruk, A. Apolonski, S.K. Turitsyn, S. A. Babin, *Opt. Lett.* 42, 3221-3224 (2017).
- [6] A. E. Bednyakova, S. A. Babin, D. S. Kharenko, E. V. Podivilov, M. P. Fedoruk, V. L. Kalashnikov, and A. Apolonski, *Opt. Express* 21, 20556 (2013).

[7] Denis S. Kharenko, Anastasia E. Bednyakova, Evgeniy V. Podivilov, Mikhail P. Fedoruk, Alexander Apolonski, and Sergey A. Babin. Cascaded generation of coherent Raman dissipative solitons // *Opt. Lett.* 41, 175-178 (2016).

[8] Babin S.A., Podivilov E.V., Kharenko D.S., Bednyakova A.E., Fedoruk M.P., Kalashnikov V.L., Apolonski A.A, *Nature Communications* 5, p. 4653, 2014.

[9] A. Chong, L. G. Wright, and F. W. Wise, *Rep. Prog. Phys.* 78, 113901 (2015).

[10] D. S. Kharenko, A. E. Bednyakova, E. V. Podivilov, M. P. Fedoruk, A. A. Apolonski, and S. A. Babin, "Feedback-controlled Raman dissipative solitons in a fiber laser," *Optics Express* 23, pp. 1857-1862, 2015.

- Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Все численные результаты, представленные в высокорейтинговых журналах, были получены с использованием кластера НГУ. Использование кластера позволило найти параметры волоконного лазерного резонатора, при которых возможно генерация диссипативных солитонов с максимальной энергией. Также были исследованы характеристики сигнала в зависимости от параметров резонатора.

- Перечень публикаций, содержащих результаты работы (если есть). Указать импакт-фактор журнала (Thomson Reuters, РИНЦ,...).

Denis S. Kharenko, Anastasia E. Bednyakova, Evgeniy V. Podivilov, Mikhail P. Fedoruk, Alexander Apolonski, and Sergey A. Babin, "Feedback-controlled Raman dissipative solitons in a fiber laser," *Opt. Express* 23, 1857-1862 (2015). **2018 Impact Factor: 3.561**

Denis S. Kharenko, Anastasia E. Bednyakova, Evgeniy V. Podivilov, Mikhail P. Fedoruk, Alexander Apolonski, and Sergey A. Babin. "Cascaded generation of coherent Raman dissipative solitons" // *Opt. Lett.* 41, 175-178 (2016). **2018 Impact Factor: 3.589**

Denis S. Kharenko, Innokentiy S. Zhdanov, Anastasia E. Bednyakova, Evgeniy V. Podivilov, Mikhail P. Fedoruk, Alexander Apolonski, Sergei K. Turitsyn, and Sergey A. Babin, "All-fiber highly chirped dissipative soliton generation in the telecom range," *Opt. Lett.* 42, 3221-3224 (2017). **2018 Impact Factor: 3.589**

- Ваши впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также Ваши предложения по их совершенствованию.

Постоянно использую вычислительный кластер НГУ в своей работе. В последнее время испытываю некоторые неудобства из-за ограничения на количество ядер, которые может занять каждый пользователь.