

- Тема работы. **Генерация рамановских диссипативных солитонов в волоконном лазере.**
- Состав коллектива. М.П. Федорук, С.А. Бабин (ИАиЭ СО РАН), Е.В. Подивиллов (ИАиЭ СО РАН), Д.С. Харенко (ИАиЭ СО РАН), А.Е. Беднякова
- Научное содержание работы:

Понятие "диссипативный солитон" появилось в 1990-х годах для обозначения устойчивых импульсов или пространственно локализованных волн в системах с усилением и потерями. Для генерации диссипативных солитонов в лазерах с пассивной синхронизацией мод необходимо соблюдение равновесия между усилением и потерями. Если говорить о полной дисперсии резонатора, то для устойчивой генерации диссипативных солитонов дисперсия, как правило, должна быть нормальной (положительной). На настоящий момент генерация диссипативных солитонов (ДС) является одним из наиболее эффективных способов получения масштабируемых по энергии фемтосекундных импульсов в волоконных лазерах с синхронизацией мод. С увеличением длины резонатора растёт длительность импульса при той же пиковой мощности, таким образом увеличивается и энергия сигнала. Если импульс является когерентным и обладает линейной частотной модуляцией, то становится возможным его сжатие внешним компрессором в десятки-сотни раз.

Однако в длинном волоконном резонаторе в результате эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) часть энергии диссипативного солитона преобразуется в шумовой импульс на длине волны стоксовой компоненты (стоксов импульс). Таким образом, рост энергии ДС ограничен потерями на генерацию шумового стоксова импульса. В работе [1] была продемонстрирована новая схема волоконного фемтосекундного лазера, позволяющая генерировать стабильные импульсы с линейной частотной модуляцией ) длительностью до ~100 пс, которые сжимаются внешним компрессором до 250-300 фс. Распространение столь мощных импульсов в резонаторе происходило в присутствии сильного ВКР. Для более детального исследования процесса формирования импульса ВКР и его влияния на исходный диссипативный солитона было выполнено численное моделирование волоконного лазера. С помощью моделирования лазерной системы в работе [2] показано, что шумовой Стоксов импульс повышает стабильность диссипативного солитона, выполняя роль спектрального и временного фильтров. Энергия ДС, достигнутая в рассмотренном лазере, превышает энергию ДС в других полностью-волоконных лазерах, в которых эффект ВКР является несущественным. С другой стороны, потери энергии в результате генерации Стоксова импульса ограничивают дальнейший рост энергии ДС с увеличением длины резонатора, сам импульс является стохастическим и не подходит для практических применений. Поэтому актуальной задачей и целью проведения дальнейших исследований являлся поиск способов генерации когерентного ВКР-импульса.

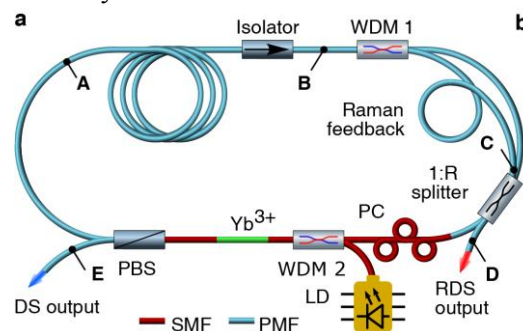


Рисунок 1. Схема эксперимента.

С помощью численного моделирования волоконного лазера, в котором реализуется слабая обратная связь для стоксова импульса, удалось продемонстрировать возможность генерации

когерентного импульса ВКР. На Рисунке 1 изображена схема полностью волоконного иттербиевого лазера с кольцевым резонатором. Резонатор состоит из двух функциональных частей: длинный (30-120 м) участок РМ-световода и короткий (1.5 м) участок SM-световода. На участке световода с сохранением поляризации происходит формирование диссипативного солитона, синхронизация мод на основе эффекта нелинейного вращения поляризации осуществляется на коротком участке стандартного одномодового световода. Ключевым элементом в схеме лазера - линия задержки для ВКР-сигнала. С помощью линии задержки осуществляется слабая обратная связь для стокового импульса, формирование которого на каждом обходе резонатора осуществляется теперь не из шума усилителя, а с затравочного импульса малой амплитуды. Диссипативный солитон служит источником накачки для стокового импульса при их совместном распространении в волоконном световоде. Из-за дисперсии в световоде ДС и стоков импульс приобретает различные групповые скорости, равные  $v_s$  и  $v_r$  соответственно. Стоков импульс распространяется в световоде быстрее ДС, поэтому его усиление происходит в течение ограниченного времени, равного длительности ДС. После прохождения области взаимодействия ДС продолжает распространяться без потерь энергии, а стоков импульс начинает затухать. В результате импульс ВКР оказывается сдвинутым относительно импульса накачки примерно на  $\sim 50$  пс. Линия задержки компенсирует временную расстройку между импульсами, равную  $\Delta t \approx 50$  пс, так как стоков импульс проходит дополнительный путь в световоде длиной  $L_r = v_r \Delta t$ .

Для описания распространения солитона в световоде применялась скалярная модель - обобщённое нелинейное уравнение Шрёдингера (ОНУШ). Численное решение уравнения было найдено с помощью симметричного Фурье-метода с расщеплением по физическим процессам.

Формирование и эволюция ДС в волоконном лазере происходит на длинном участке РМ-световода, в то время как синхронизация мод, усиление и фильтрация осуществляются на коротком участке стандартного одномодового световода. Поэтому воздействие на фазу и амплитуду сигнала волоконных внутрирезонаторных компонент, таких как активный световод, поляризационный светоделитель и спектрально-селективный разветвитель (wavelength division multiplexer - WDM), реализуется в модели точно на одном шаге вдоль эволюционной переменной.

На Рисунке 2 показана эволюция сигнала в волоконном резонаторе. В модифицированной схеме происходит формирование устойчивого, незашумлённого ВКР-импульса. Устойчивый режим генерации реализуется при значениях коэффициента обратной связи из интервала  $R = P_{seed} / P = 10^{-2} - 10^{-7}$ , где  $P$  - мощность ВКР-импульса в резонаторе перед линией задержки,  $P_{seed}$  - мощность ВКР-импульса, возвращаемого в резонатор после линии задержки. Максимальная энергия сигнала логарифмически зависит от коэффициента обратной связи  $E_{cr} \approx \ln(1/R) \delta v^{-1} / g_R$ , где  $\delta v^{-1} = v_s^{-1} - v_r^{-1}$  - разность групповых скоростей диссипативного солитона и стокового импульса,  $g_R$  - коэффициент ВКР-усиления.

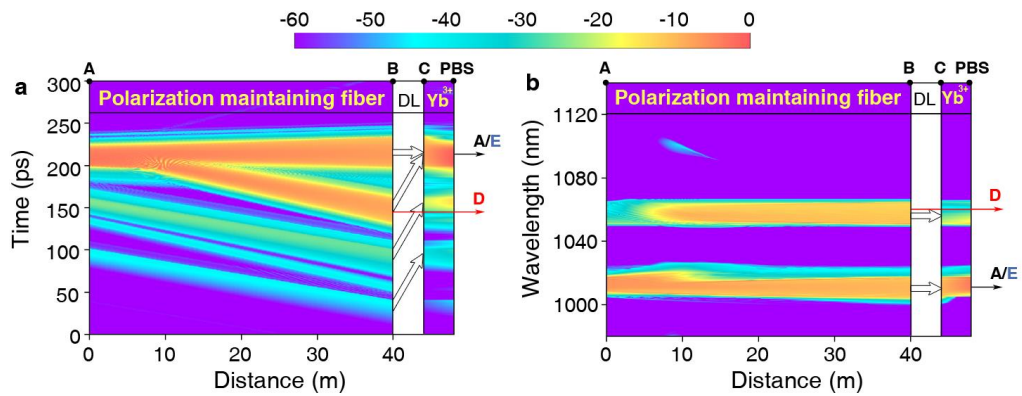


Рисунок 2. Эволюция комплекса диссипативных солитонов в волоконном лазерном резонаторе.

На основании результатов численного моделирования были реализованы натурные эксперименты, в которых подтвердилось существование нового теоретически предсказанного класса диссипативных солитонов - рамановского диссипативного солитона. Спектры излучения на выходе из резонатора в расчёте и эксперименте приведены на Рисунке 3. Анализ формы и спектра стоксова импульса свидетельствует о том, что импульс является рамановским диссипативным солитоном (РДС). Об этом свидетельствует линейная частотная модуляция импульса и прямоугольная форма. ДС и РДС образуют устойчивый двухволновой комплекс, совместно распространяясь в световоде. Важно отметить, что РДС не принадлежит к классу классических рамановских солитонов, которые являются фундаментальными солитонами и формируются в результате стоксова сдвига частоты в световоде с аномальной (отрицательной) дисперсией, например, в линиях связи.

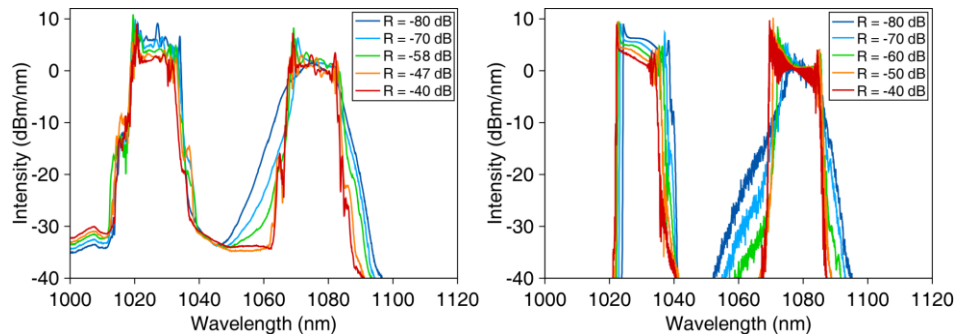


Рисунок 3. Расчётные (слева) и экспериментальные спектры диссипативных солитонов при различных значениях коэффициента обратной связи.

Также было выполнено исследование и оптимизация комплекса диссипативных солитонов в зависимости от коэффициента обратной связи. Если коэффициент обратной связи  $R < 10^{-7}$ , мощность затравочного импульса в резонаторе оказывается недостаточной для преодоления шумового порога усилителя ( $P_{seed} \ll P_{sp}$ ), формирования рамановского диссипативного солитона не происходит. С ростом коэффициента обратной связи происходит генерация РДС с характерным прямоугольным спектром излучения. Дальнейшее увеличение  $10^{-4} < R < 10^{-2}$  приводит к возникновению многоимпульсных режимов генерации. При  $R > 10^{-2}$  комплекс солитонов становится неустойчивым и разрушается под влиянием шумов в резонаторе. Внутрирезонаторная энергия РДС логарифмически растёт с ростом коэффициента обратной связи, при этом энергия ДС монотонно уменьшается. Несмотря на уменьшение

внутрирезонаторной энергии ДС при увеличении коэффициента обратной связи, суммарная энергия комплекса диссипативных солитонов ДС + РДС становится выше.

Важным для практических применений является тот факт, что при определённых условиях комплекс РС+РДС может быть сжат в одиночный импульс. С помощью математического моделирования лазерной системы было найдено оптимальное значение коэффициента обратной связи ( $R = -50$  дБ), при котором возможно когерентное сложение диссипативных солитонов с наибольшей интенсивностью результирующего сигнала. Когерентное сложение также было реализовано в эксперименте. Амплитуда сигнала после сложения возрастает в 4 раза по сравнению с амплитудами импульсов ДС и РДС. Длительность результирующего импульса равна 300 фс. Вид функции автокорреляции свидетельствует о наличии амплитудной модуляции с шириной пика 40 фс и расстоянием между пиками – 75 фс, что является доказательством высокой степени когерентности ДС и РДС.

Таким образом, с помощью математического моделирования лазерной системы было теоретически предсказано существование нового способа генерации диссипативных солитонов — рамановский диссипативный солитон (РДС). По результатам численного моделирования реализованы эксперименты, которые подтвердили существование нового теоретически предсказанного класса диссипативных солитонов. В работе были найдены параметры волоконного резонатора, при которых возможна генерация устойчивого РДС; были описаны свойства РДС, который распространяется в резонаторе совместно с диссипативным солитоном и образует с ним когерентный двухволновой комплекс. В численном счёте также наблюдалось появление в спектре излучения стоксовой компоненты второго порядка и антистоксовой компоненты, что свидетельствует о возможности формирования комплексов ДС+РДС более высоких порядков и энергий (многоцветных комплексов связанных солитонов). Помимо фундаментальной значимости полученного результата, важна его практическая составляющая. Потенциальными областями применения многоцветных комплексов связанных солитонов являются спектроскопия методом оптической гребёнки, линии связи, расширенные резонаторы и многофотонная флуоресцентная микроскопия. Также предложенный подход, при котором в резонатор добавляются линии задержки для различных спектральных компонент, может быть применён к дизайну волоконных лазеров для получения мощных импульсов с широким спектром излучения.

[1] D. S. Kharenko, E. V. Podivilov, A. A. Apolonski, and S. A. Babin, “20 nJ 200 fs all-fiber highly-chirped dissipative soliton oscillator,” *Optics Letters* 37, 4104–4106 (2012).

[2] A. E. Bednyakova, S. A. Babin, D. S. Kharenko, E. V. Podivilov, M. P. Fedoruk, V. L. Kalashnikov, and A. Apolonski, “Evolution of dissipative solitons in a fiber laser oscillator in the presence of strong Raman scattering,” *Optics Express* 21, 20556 (2013).

- 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 нового класса диссипативных солитонов. Также были исследованы характеристики сигнала в зависимости от параметров резонатора.

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

A. E. Bednyakova, S. A. Babin, D. S. Kharenko, E. V. Podivilov, M. P. Fedoruk, V. L. Kalashnikov, and A. Apolonski, “Evolution of dissipative solitons in a fiber laser oscillator in the presence of strong Raman scattering,” *Optics Express* 21, 20556 (2013). **2013 Impact Factor: 3.525**

Babin S.A., Podivilov E.V., Kharenko D.S., Bednyakova A.E., Fedoruk M.P., Kalashnikov V.L., Apolonski A.A. Multicolour nonlinearly bound chirped dissipative solitons // Nature Communications 01/2014; 5:4653 **2013 Impact Factor: 10.742**

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

Впечатления положительные, постоянно использую вычислительный кластер НГУ в своей работе.