

Усиление диссипативных солитонов тейперным волоконным усилителем с сохранением поляризации

А.Г.Кузнецов, Д.С.Харенко, С.А.Бабин

Генерация сильно chirпированных диссипативных солитонов открывает большие возможности для получения мощных лазерных импульсов короткой длительности. Нами продемонстрирована возможность усиления таких импульсов в тейперном волокне с сохранением поляризации с диаметром моды на выходном конце 32 мкм. Сильно chirпированные импульсы с частотой следования 14.3 МГц и длительностью 10 пс с центральной длиной волны 1055 нм были усилены в полностью волоконной схеме до энергии 2.11 мкДж и сжаты дифракционными решетками до длительности ~297 фс. Уменьшение частоты следования импульсов до 1 МГц позволяет достичь выходной энергии импульса 16.5 мкДж без проявления в спектре эффектов ВКР и фазовой самомодуляции.

Ключевые слова: синхронизация мод, диссипативный солитон, фемтосекундный лазер, тейпер, оптическое волокно, иттербиевый усилитель.

1. Введение

В настоящее время фемтосекундные лазеры с большой частотой следования импульсов (ЧСИ) и высокой пиковой мощностью востребованы в таких прикладных областях, как микрообработка и фотомодификация материалов, гравировка и т. д. Использование дисковых лазеров позволяет генерировать непосредственно в резонаторе лазера фемтосекундные импульсы со средней мощностью в несколько десятков ватт [1, 2]. Альтернативный подход – это использование волоконного задающего генератора ультракоротких импульсов относительно небольшой мощности и одного или нескольких каскадов усилителей для достижения высоких пиковых мощностей.

Одним из перспективных методов генерации стабильных ультракоротких импульсов является использование полностью волоконной схемы резонатора на основе короткого одномодового волокна, где происходит нелинейное вращение поляризации, и длинного волокна с сохранением поляризации, в котором формируется диссипативный солитон. Такой подход позволяет генерировать импульсы с большим chirпом и высокой энергией [3]. Энергия импульса в лазерах на основе стандартных волокон ограничена уровнем ~20 нДж, при превышении которого формируется шумовой импульс в другой спектральной области за счет эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [3].

Для увеличения энергии импульса часто применяют усилители, построенные на основе оптических световодов с большой площадью моды (LMA), что позволяет существенно повысить пороги появления различных нели-

нейных эффектов (ВКР, фазовой самомодуляции и т. д.). Например, авторы [4], используя три каскада усиления, с помощью LMA-волокон усилили chirпированный импульс длительностью 120 пс до энергии 1.85 мкДж, однако дальнейшее увеличение энергии импульса сопровождалось сильными нелинейными эффектами. Применение микроструктурированных фотонно-кристаллических волокон (PCF) позволяет достичь еще больших пиковых мощностей, вплоть до нескольких гигаватт после сжатия импульса [5]. Однако применение таких волокон осложняется тем, что сборка оптических схем на их основе очень трудоемкая и в большинстве случаев требует использования объемной оптики для ввода и вывода излучения. Кроме того, PCF чувствительны к всевозможным изгибам, кручениям и другим деформациям, поэтому их обычно укладывают вдоль прямой линии, что делает проблематичным создание компактных устройств. Активные тейперные волокна с плавно изменяющимся диаметром сердцевин по длине [5, 6] являются относительно новым видом усилителей, позволяющих достигать высоких пиковых мощностей сигнала без возникновения различных нелинейных эффектов и с сохранением при этом высокого качества выходного пучка [7, 8].

Цель настоящей работы – исследование возможности усиления сильно chirпированных диссипативных солитонов иттербиевым волоконным усилителем на основе сохраняющего поляризацию тейперного волокна с последующим их сжатием.

2. Экспериментальная установка

На рис.1 приведена схема генератора chirпированных диссипативных солитонов. Задающий генератор выполнен в виде кольцевой схемы, содержащей короткий (~1.5 м) участок стандартного одномодового волокна (SM) (Nufern XP1060), в котором происходит синхронизация мод за счет нелинейного вращающего поляризации, и длинного (~10 м) участка волокна с сохранением поляризации (PM), в котором формируется диссипативный солитон [3]. PM-участок включает в себя: активное волокно с двойной обо-

А.Г.Кузнецов. Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, 1; leks.kuznecov@gmail.com

Д.С.Харенко, С.А.Бабин. Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, 1; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Поступила в редакцию 9 октября 2018 г.

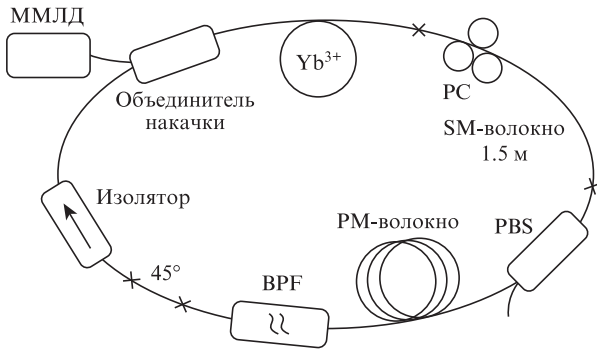


Рис.1. Схема лазерного источника диссипативных солитонов.

лочкой, легированное Yb^{3+} (Nufern PM-YB-5/130); объединитель накачки, с помощью которого во внешнюю оболочку активного волокна вводится излучение многомодовых лазерных диодов (ММЛД) накачки мощностью около 3 Вт на длине волны 980 нм; делитель поляризации (PBS); волоконный спектральный фильтр Лео, реализованный привариванием отрезка PM-волокна под углом 45°; контроллер поляризации (PC); дополнительный спектральный фильтр (BPF) с полосой пропускания 8 нм, фиксирующий центральную длину волны излучения на 1055 нм. Направление распространения излучения по волокну задается поляризующим оптическим изолятором с выводами из PM-волокна.

Для уменьшения проявления из-за высокой пиковой мощности нелинейных эффектов импульсы перед усилением предварительно растягивались волоконным стретчером, выполненным в виде катушки PM-волокна длиной ~200 м. Растянутые chirпированные импульсы направлялись на вход тейперного усилителя, принципиальная схема которого аналогична описанной в [8] (приведена на рис.2). Легированное ионами Yb^{3+} тейперное PM-волокно, изготовленное в НЦВО РАН (Москва), представляет собой конусообразный световод с двойной оболочкой длиной 2.5 м с диаметром сердцевины 9 мкм на входе и

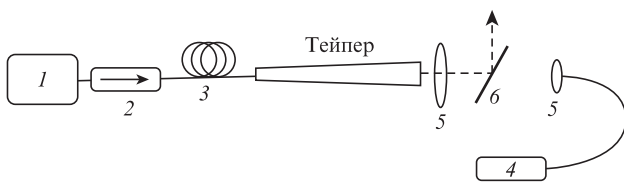


Рис.2. Схема усиления: 1 – генератор chirпированных импульсов; 2 – изолятор; 3 – стретчер; 4 – многомодовый лазерный диод накачки на 976 нм мощностью до 60 Вт; 5 – коллиматор; 6 – дихроичное зеркало.

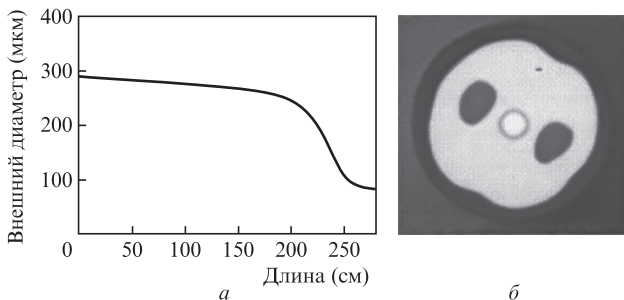


Рис.3. Изменение по длине диаметра внешней оболочки (а) и поперечный срез тейперного PM-волокна (б).

32 мкм на выходе (рис.3). Поглощение излучения накачки на длине волны 976 нм в оболочке тейперного волокна составляло ~23 дБ/м. Для накачки использовался многомодовый лазерный диод мощностью 60 Вт, коллимированное излучение которого вводилось в световодящую оболочку тейпера через его выходной торец.

Усиленный полезный сигнал с выхода тейпера направлялся дихроичным зеркалом на двухпроходный компрессор с парой дифракционных решеток (1500 штр./мм), и сжатый импульс анализировался с помощью системы FROG (аналогично схеме, описанной в [3, 9]).

3. Результаты и их обсуждение

Задающий генератор, схема которого представлена на рис.1, излучал цуг chirпированных импульсов с оптическим спектром с максимумом на длине волны 1055 нм (рис.4) длительностью 10 пс при частоте следования импульсов (ЧСИ) 14.3 МГц. Средняя мощность задающего лазера составила 20 мВт, что соответствует энергии импульса 1.4 нДж. Мощность накачки и длина резонатора были выбраны так, чтобы обеспечить максимальную стабильность излучения при отсутствии генерации импульсов ВКР.

После волоконного стретчера импульсы растягивались до 130 пс и вводились в усиливающее тейперное во-

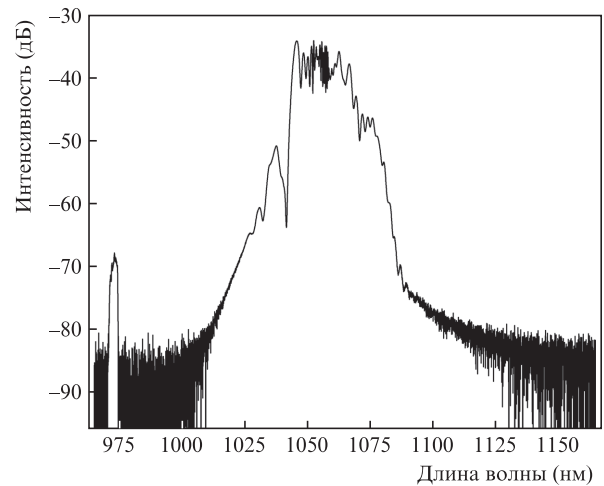


Рис.4. Спектр излучения задающего генератора.

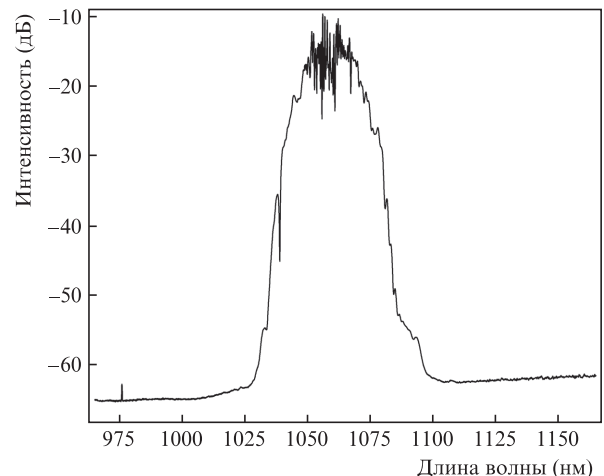


Рис.5. Спектр усиленного излучения. Выходная мощность 26.7 Вт.

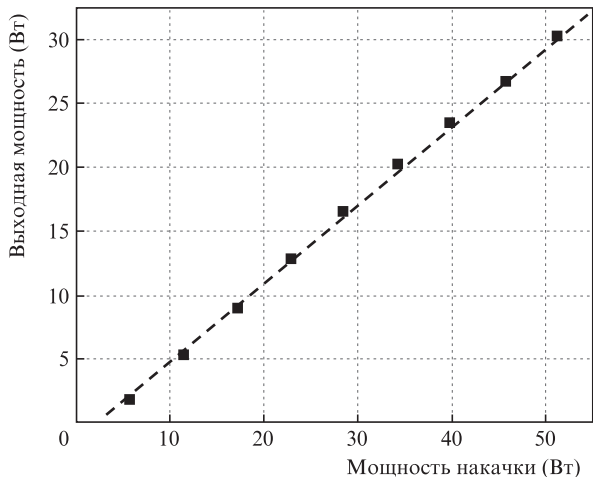


Рис.6. Зависимость выходной мощности сигнала от мощности накачки при ЧСИ 14.3 МГц.

локно. При мощности накачки 51 Вт выходная мощность полезного сигнала составила 30.2 Вт, что соответствует энергии импульса 2.11 мкДж; его спектр приведен на рис.5. На рис.6 представлена зависимость мощности на выходе усилителя от мощности диодной накачки, вводимой со стороны широкого конца тейпера.

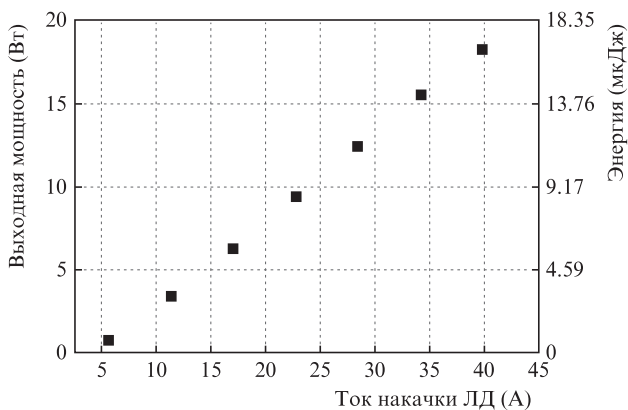


Рис.7. Зависимость выходной мощности сигнала от тока накачки ЛД при ЧСИ 1 МГц.

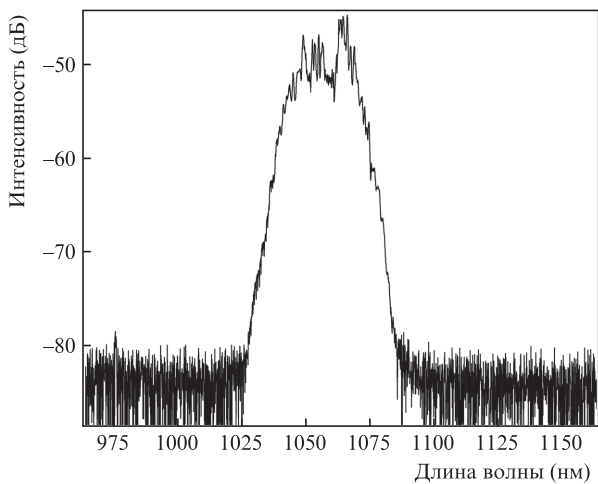


Рис.8. Спектр усиленного излучения при ЧСИ 1 МГц и выходной мощности 18.2 Вт.

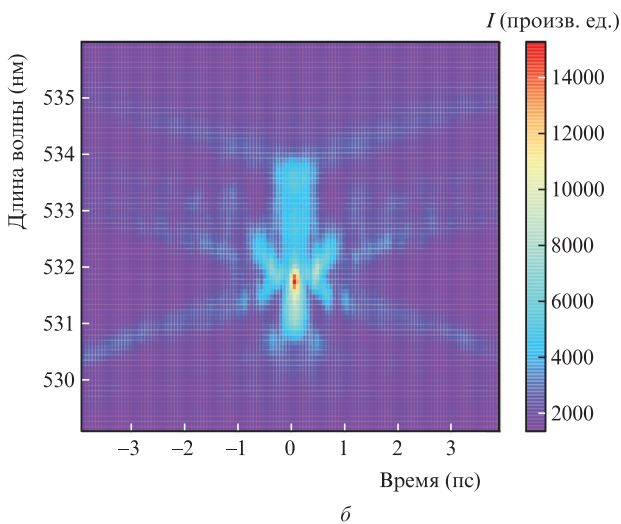
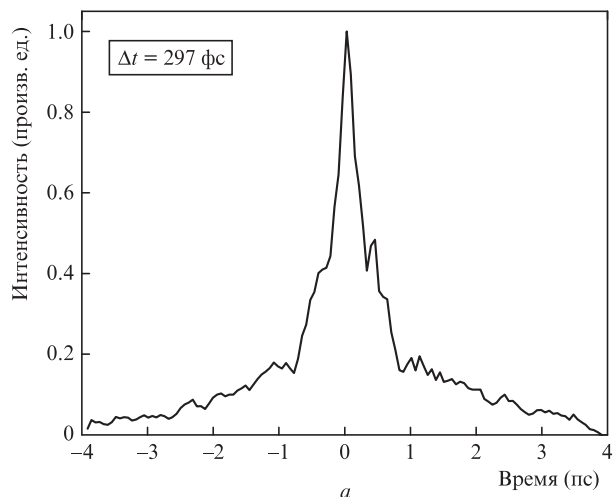


Рис.9. АКФ (а) и FROG-трейсы (б) сжатых после усилителя импульсов.

Прореживание импульсов с помощью акустооптического модулятора до частоты их следования 1 МГц приводит к увеличению энергии в импульсе при том же уровне мощности накачки. На рис.7 и 8 приведены зависимость выходной мощности после усилителя от тока накачки ЛД и выходной спектр при ЧСИ 1 МГц. Максимальная энергия импульса в этом случае составила 16.5 мкДж, при этом в спектре не наблюдалось влияния ВКР и не было заметного уширения спектра вследствие фазовой само-модуляции.

Усиленные импульсы сжимались внешним компрессором на дифракционных решетках, их автокорреляционная функция (АКФ) и FROG-трейсы приведены на рис.9. Измеренная длительность сжатого импульса при выходной мощности 13 Вт и ЧСИ 14.3 МГц составила 297 фс.

В отличие от более ранних работ (см., напр., [6]) в настоящей работе использовалось тейперное волокно с сохранением поляризации, что делает лазер более стабильным и облегчает схему сжатия оптических импульсов. В работе [7] также использовался РМ-тейпер, однако наряду с ним применялась сложная схема задающего генератора с несколькими каскадами предусилителей, при этом полученная выходная энергия импульса составила ~1 мкДж.

4. Заключение

В работе продемонстрировано усиление тейперным волоконным усилителем сильно chirпированных импульсов длительностью 130 пс с частотой следования 14.3 МГц до энергии 2.11 мкДж в полностью волоконной схеме. При уменьшении частоты следования до 1 МГц энергия усиленных импульсов достигает 16.5 мкДж, при этом в спектре не обнаружено проявления эффекта ВКР. С помощью двухпроходного компрессора с парой дифракционных решеток импульсы были сжаты до длительности около 300 фс. Отметим, что при усилении сигнала происходит некоторое искажение спектра chirпированных импульсов и возрастание шумов, уже присутствующих на выходе задающего генератора; это приводит к увеличению пьедестала в АКФ сжатого импульса (см. рис.9). Тем не менее достигнутые характеристики лазера позволяют применять его для микрообработки, гравировки и фотомодификации материалов, например для записи волоконных брэгговских решеток в объеме кварцевого стекла [10] или периодических структур на поверхности металлов [11].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-32-00459).

1. Aus der Au J., Spühler G.J., Südmeyer T., et al. *Opt. Lett.*, **25**, 859 (2000).
2. Brunner F., Südmeyer T., Innerhofer E., et al. *Opt. Lett.*, **27**, 1162 (2002).
3. Kharenko D.S., Podivilov E.V., Apolonski A.A., Babin S.A. *Opt. Lett.*, **37** (19), 4104 (2012).
4. Qi X., Chen S.-P., Sun H.-Y., Yang B.-K., Hou J. *Opt. Express*, **24** (15), 16874 (2016).
5. Eidam T., Rothhardt J., Stutzki F., et al. *Opt. Express*, **19** (1), 255 (2011).
6. Filippov V., Chamorovskii Y., Kerttula J., Golant K., Pessa M., Okhotnikov O.G. *Opt. Express*, **16** (3), 1929 (2008).
7. Коптев М.Ю., Анашкина Е.А., Бобков К.К. и др. *Квантовая электроника*, **45** (5), 443 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (5), 443 (2015)].
8. Кузнецов А.Г., Харенко Д.С., Гонга В.А. *Прикладная фотоника*, **4** (3), 229 (2017).
9. Kharenko D.S., Bednyakova A.E., Podivilov E.V., Fedoruk M.P., Apolonski A., Babin S.A. *Opt. Express*, **23** (2), 1857 (2015).
10. Dostovalov A.V., Wolf A.A., Parygin A.V., Zyubin V.E., Babin S.A. *Opt. Express*, **24**, 16232 (2016).
11. Достовалов А.В., Корольков В.П., Голубцов С.К., Кондратьев В.И. *Квантовая электроника*, **44** (4), 330 (2014) [*Quantum Electron.*, **44** (4), 330 (2014)].