

Генерация суперконтинуума ближнего ИК диапазона, полученная на телекоммуникационном одномодовом волокне в полностью волоконном формате, и объединение его мощности

Жумао Тхао, Сяолин Ван, Ху Сяо, Пху Чжоу, Цзин Хоу

Генерация суперконтинуума (СК) ближнего ИК диапазона осуществлена на стандартном телекоммуникационном одномодовом волокне в полностью волоконном формате. Наблюдаемый спектр охватывает диапазон 1050–1700 нм. Впервые продемонстрировано высокоэффективное объединение мощности СК и показано, что его спектральные свойства сохраняются после объединения мощности. Результаты могут найти полезные применения в задачах зондирования, спектроскопии, медицине.

Ключевые слова: генерация суперконтинуума, объединение мощности, волоконные лазеры.

1. Введение

Благодаря широким применениям в нелинейной оптике генерация суперконтинуума (СК) в разнообразных кварцевых волокнах в последние годы привлекает интерес исследователей [1–6]. Среди всех опубликованных работ, посвященных этому вопросу, основные результаты были получены при использовании микроструктурированного волокна и ультракоротких оптических импульсов [7–10]. Меньшее внимание было уделено генерации СК в стандартном телекоммуникационном волокне [11–14]. В 2011 г. А.С.Курков с соавторами впервые продемонстрировали СК в среднем ИК диапазоне при использовании многомодового телекоммуникационного волокна [14], а В.А.Камынин с соавторами также продемонстрировали СК, покрывающий диапазон 1.55–2.4 мкм, в случае стандартного волокна [15]. В то же время применение волоконных лазеров с синхронизацией мод в сочетании со стандартным телекоммуникационным волокном позволяет упростить схему для построения практически устройства низкой стоимости.

Масштабирование мощности лазерного излучения является желанной целью для многих приложений. Однако выходная мощность одиночного волокна в конечном счете будет ограничена яркостью источника накачки, разрушением граней и тепловой линзы [16]. Объединение (суммирование) мощности является альтернативным решением для получения сверхвысоких уровней мощности. Вопросы объединения мощности волоконных лазеров освещались достаточно широко [17, 18], тогда как задача объединения высокоомощного СК [12, 19, 6.20, насколько нам известно, ранее решена не была.

* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

Rumao Tao, Xiaolin Wang, Hu Xiao, Pu Zhou, Jing Hou. College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, Hunan, China; e-mail: zhoupu203@163.com

Поступила в редакцию 14 июля 2013 г.; после доработки – 11 ноября 2013 г.

В настоящей работе СК ближнего ИК диапазона генерируется в полностью волоконном формате в телекоммуникационном одномодовом волокне и впервые изучено объединение его мощности. В отличие от стандартного подхода, коммерчески доступное телекоммуникационное одномодовое волокно (ОВ) используется в качестве нелинейной среды и накачивается с помощью полностью волоконного лазера с синхронизацией мод, что представляет практический интерес.

2. Экспериментальная установка

Полностью волоконная схема генерации СК показана на рис.1. Она сконструирована в конфигурации двухступенчатого МОРА: с предварительным и главным усилителями. Пикосекундный импульсный волоконный лазер с синхронизацией мод на длине волны 1064 нм с шириной линии на полувысоте ~ 1.9 ГГц и средней выходной мощностью ~ 15 мВт при частоте следования импульсов 21 МГц генерировал в линейном резонаторе, построенном с использованием отрезка легированного Yb волокна (ИВ) длиной 1.5 м. Типичная длительность на полувысоте импульса лазера составляла 452.7 пс. Осциллограмма импульсов лазера в режиме синхронизации мод показана на рис.2, из которого видно, что частота следования импульсов равна 21 МГц.

Хорошо известно, что генерация СК в волокне вызывается нелинейными эффектами, такими как ВКР, которые требуют высокую пиковую мощность. В предположении равномерного распределения сигнала вдоль волокна пороговая мощность ВКР может быть оценена как $16A_{\text{eff}}/(g_R L)$ [21, 22]. В нашем эксперименте используется телекоммуникационное ОВ длиной $L = 1$ км. Пусть рамановский коэффициент $g_R = 1 \times 10^{-13}$ м/Вт, тогда пиковая мощность, требуемая для возбуждения ВКР, при площади моды A_{eff} около 30 мкм^2 составляет примерно 4.5 Вт. Однако в нашем эксперименте средняя мощность и пиковая мощность импульсного лазера были только 9.6 мВт и 1 Вт, что далеко до достижения порога ВКР. Для эффективной генерации СК нами реализованы два усилителя, способные обеспечить достаточную мощность для стимулирования нелинейных эффектов в телекоммуникацион-



Рис.1. Волоконная система генерации СК.

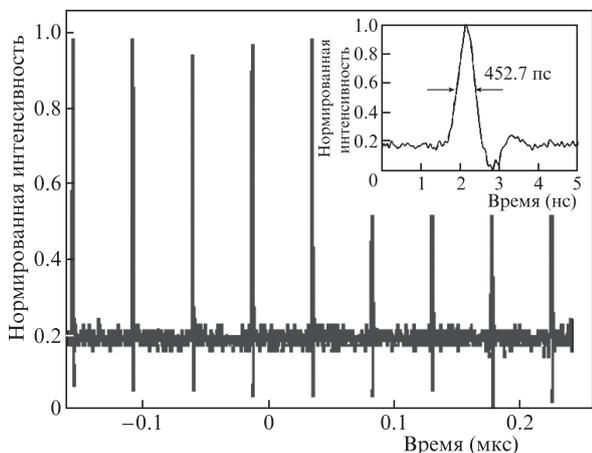


Рис.2. Форма импульсов задающего лазера с синхронизацией мод.

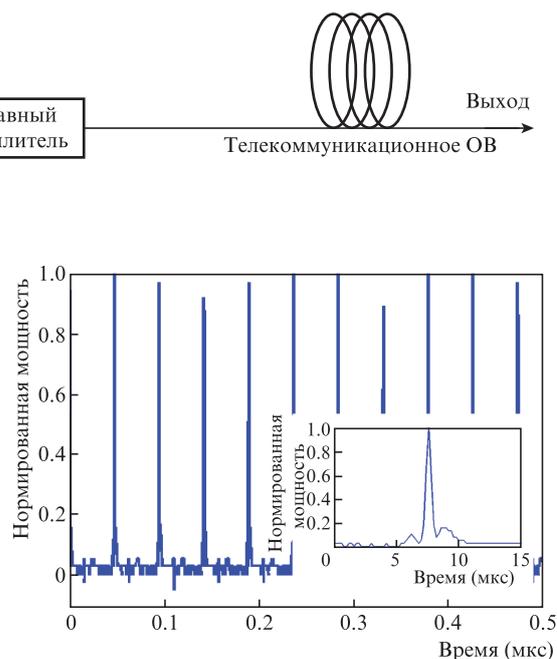


Рис.4. Усиленные импульсы задающего лазера при мощности накачки 12 Вт.

ном ОВ. Импульсы сначала усиливаются до уровня, соответствующего примерно 75 мВт средней мощности. Иттербиевое ОВ накачивается в сердцевину излучением (976 нм) лазерного диода (ЛД) через спектральный мультиплексор (WDM). Каскад основного усилителя использует ИВ-усилитель с двойной оболочкой и большой площадью моды, накачиваемый в оболочку двумя ЛД (976 нм) через входные отрезки волокна с двумя оболочками, и объединитель (2 + 1) × 1 сигнал/накачка. Диаметр сердцевины основного усилителя составляет 6 мкм. В этом каскаде лазерная мощность может быть увеличена до 7 Вт. Непоглощенная мощность накачки сбрасывалась.

На рис.3 показан оптический спектр лазера при частоте следования импульсов 21 МГц после основного усилителя, зарегистрированный анализатором спектра (на вставке показан спектр задающего лазера). Оптические спектры измерялись с помощью оптического анализатора спектра 86142В (Agilent) с разрешением 0.06 нм. Как видно из рис.3, при мощности накачки основного усилителя 6 Вт (выходная мощность основного усилителя 4 Вт)

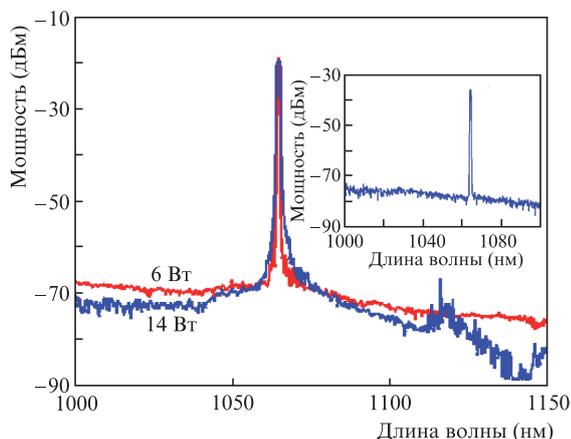


Рис.3. Спектры импульсного лазера при мощности накачки 6 и 14 Вт.

усиленное спонтанное излучение (УСИ) не наблюдается. Слабое УСИ появляется, когда мощность накачки достигает 12 Вт, при выходной мощности 7 Вт. Форма импульса волоконного лазера с синхронизацией мод после основного усилителя приведена на рис.4 для мощности накачки 12 Вт. На вставке показана типичная осциллограмма лазерного импульса, длительность на полувысоте которого после усиления слегка увеличена (примерно до 589 пс). Пиковая мощность в этом случае составляет 565.9 Вт.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Выходной порт основного усилителя был сращен с телекоммуникационным стандартным ОВ длиной 1 км. Спектр излучения на выходе телекоммуникационного ОВ показан на рис.5. Средняя выходная мощность излучения СК составляет 2.5 Вт при 4 Вт вводимой мощности накачки и 4.5 Вт при 7 Вт соответственно. Видно, что спектры охватывают диапазон от 1050 до 1700 нм и более. Вариации мощности на длинах волн ниже 1300 нм со-

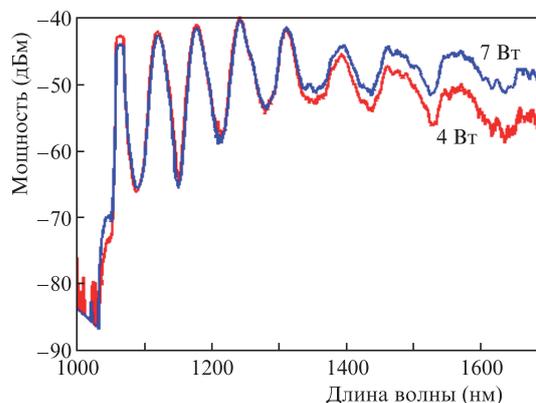


Рис.5. Выходные спектры генерируемого СК при введенной мощности накачки 4 и 7 Вт.

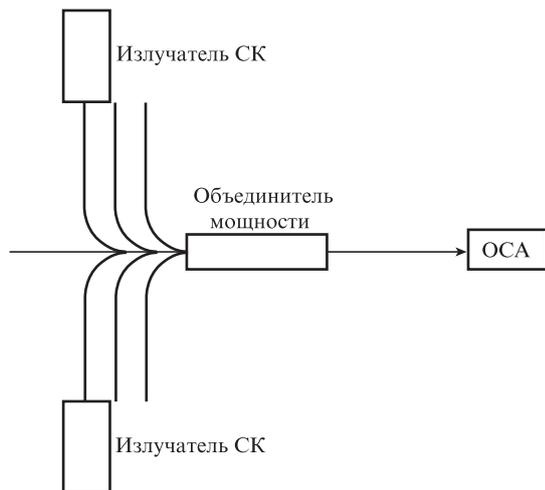


Рис.6. Конфигурация объединителя мощности СК на основе телекоммуникационного ОВ.

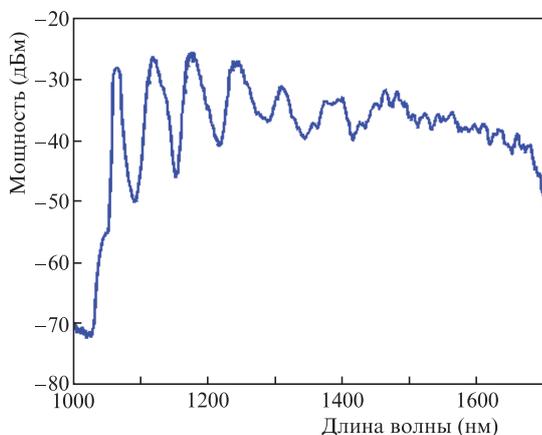


Рис.7. Выходной спектр СК после объединения мощности.

ставляют менее 25 дБ, а выше 1300 нм – 10 дБ. При увеличении мощности накачки телекоммуникационного ОВ спектр излучения, начиная с 1350 нм, становится более плоским. Ясно различимы несколько компонент, соответствующих ВКР. Это указывает на то, что генерация СК в основном вызвана каскадным рамановским рассеянием в области аномальной дисперсии и сглажена спектральным уширением импульсов накачки в волоконном усилителе [23].

Для подтверждения возможности объединения мощности СК нами создан второй комплект полностью волоконной системы СК в конфигурации, показанной на рис.1. Средняя мощность второго излучателя СК составляла 4.2 Вт. Схема объединения мощности двух СК ближнего ИК диапазона приведена на рис.6. Для объединения сигналов СК используется объединитель мощности (ОМ) 7×1 , причем задействованы только два порта накачки. На входе ОМ имеются семь ОВ 9/125, которые могут быть без потерь соединены сваркой с выходным портом телекоммуникационного ОВ; выходным волокном служит многомодовый световод 105/125. Потери, вносимые ОМ, составляют менее 0.5 дБ.

Спектры на выходе ОМ представлены на рис.7. Видно, что характер спектра СК хорошо сохраняется после объе-

динения мощности. Максимальная вариация мощности СК составляет менее 22 дБ. Когда полная мощность на входе ОМ составляет 8.7 Вт, мощность на его выходе равна 8 Вт, т.е. эффективность объединения мощности достигает 92%.

4. Выводы

Таким образом, в работе экспериментально продемонстрирована генерация СК ближнего ИК диапазона с помощью телекоммуникационного одномодового волокна в полностью волоконном формате и осуществлено объединение мощности двух СК. Получен широкополосный спектр, покрывающий диапазон 1050–1700 нм с максимальным отклонением мощности менее чем 25 дБ. Объединение мощности СК осуществлено впервые с эффективностью до 92%. Спектральные свойства СК хорошо сохраняются после объединения. Полученные результаты могут найти многочисленные приложения в оптической когерентной томографии, частотной метрологии и спектроскопии вследствие своей полностью волоконной структуры, широкой полосы и низкой стоимости.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Инновационного фонда для отличившихся выпускников Национального университета оборонных технологий (грант № В120704) и Инновационного фонда поддержки выпускников провинции Хунань (грант № СХ2012В035).

1. Song R., Hou J., Chen S., Yang W., Lu Q. *Opt. Lett.*, **37**, 1529 (2012).
2. Ycas G., Osterman S., Diddams S.A. *Opt. Lett.*, **37**, 2199 (2012).
3. Liao M., Gao W., Duan Z., Yan X., Suzuki T., Ohishi Y. *Opt. Lett.*, **37**, 2127 (2012).
4. Geng J., Wang Q., Jiang S. *Appl. Opt.*, **51**, 834 (2012).
5. Fang X., Hu M., Huang L., Chai L., Dai N., Li J., Tashchilina A.Y., Zheltikov A.M., Wang C. *Opt. Lett.*, **37**, 2292 (2012).
6. Gao W., Liao M., Yang L., Yan X., Suzuki T., Ohishi Y. *Appl. Opt.*, **51**, 1071 (2012).
7. Dudley J.M., Genty G., Coen S. *Rev. Mod. Phys.*, **78**, 1135 (2006).
8. Zheltikov A.M. *Phys. Usp.*, **50**, 705 (2007).
9. Gu Y., Zhan L., Deng D.-D., Wang Y.-X., Xia Y.-X. *Laser Phys.*, **20**, 1459 (2010).
10. Buczynski R., Pysz D., Martynkien T., Lorenc D., Kujawa I., Nasilowski T., Berghmans F., Thienpont H., Stepien R. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 575 (2009).
11. Fotiadi A.A., Megret P. *Opt. Lett.*, **31**, 1621 (2006).
12. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Smirnov S.V. *Laser Phys.*, **20**, 375 (2010).
13. Грux Д.А., Левченко А.Е., Курков А.С., Парамонов В.М. *Квантовая электроника*, **35**, 442 (2005).
14. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Sadovnikova Ya.E. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 598 (2011).
15. Камынин В.А., Курков А.С., Цветков В.Б. *Квантовая электроника*, **41**, 986 (2011).
16. Leger J.R., Nilsson J., Huignard J.P., Napartovich A.P., Shay T.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 237 (2009).
17. Shamir Y., Sintov Y., Shtai M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7580**, 75801R (2010).
18. Shamir Y., Zuitlin R., Sintov Y., Shtai M. *Opt. Lett.*, **37**, 1412 (2012).
19. Cumberland B.A., Travers J.C., Popov S.V., Taylor J.R. *Opt. Express*, **16**, 5954 (2008).
20. Song R., Hou J., Chen S.P., Wang Y.B., Lu Q.S. *Acta Phys. Sinica* (Chin. Ed.), **61**, 054217 (2012).
21. Su R., Zhou P., Xiao H., Wang X., Xu X. *Appl. Opt.*, **51**, 3655 (2012).
22. Liu A., Norsen M.A., Mead R.D. *Opt. Lett.*, **30**, 67 (2005).
23. Kobtsev S.M., Kukarin S.V. *Optics and Spectroscopy*, **107**, 344 (2009).