

**ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ
И НЕЛИНЕЙНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ**

УДК 535.530.182

**СПЕКТРАЛЬНОЕ УШИРЕНИЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ
В НЕЛИНЕЙНОМ ОПТОВОЛОКОННОМ УСИЛИТЕЛЕ**

© 2009 г. С. М. Кобцев, С. В. Кукарин

Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

E-mail: kobtsev@lab.nsu.ru

Поступила в редакцию 22.01.2009 г.

Рассмотрен перспективный метод генерации суперконтинуума с высокой спектральной плотностью мощности, основанный на спектральном уширении сверхкоротких импульсов в волоконном усилителе. Преимуществом исследуемого метода по сравнению с традиционной техникой генерации суперконтинуума в микроструктурном волокне является более низкая скорость спектрального уширения импульсов, что и позволяет достичь более высокой спектральной плотности мощности суперконтинуума. Экспериментально исследован начальный этап генерации суперконтинуума в иттербиевом волоконном усилителе (диаметр сердцевины волокна 7 мкм) с боковой накачкой от линейки лазерных диодов общей мощностью 8 Вт на длине волны 976 нм. На вход усилителя подавались импульсы Yb:KYW-лазера длительностью 250 фс, центральной длиной волны 1046 нм и средней мощностью 150 мВт. При этом было получено спектрально-уширенное излучение со средней спектральной плотностью мощности более 65 мВт/нм при ширине спектра 50 нм.

PACS: 42.81.Qb, 42.65.Wi, 42.65.-k

ВВЕДЕНИЕ

Распространение ультракоротких световых импульсов в нелинейных оптических волокнах может приводить к значительному уширению их спектра или генерации континуума (или суперконтинуума) в спектральной области, превышающей 1–3 октавы по спектру [1–5]. На начальном этапе уширения спектра спектральная плотность мощности излучения на выходе нелинейного волокна зависит практически линейно от пиковой мощности излучения импульсов накачки, однако при дальнейшем увеличении пиковой мощности излучения импульсов накачки спектральная плотность мощности излучения на выходе нелинейного волокна существенно замедляет рост из-за потерь излучения в УФ и ИК областях спектра, вызванных повышенным поглощением излучения в волокне, а также из-за вынужденного комбинационного рассеяния. В связи с этим для достижения повышенной спектральной плотности мощности широкополосного излучения представляют интерес методы относительно медленного уширения спектра излучения ультракоротких импульсов накачки при увеличении пиковой мощности их излучения. Как показано в данной работе, одним из таких перспективных методов является спектральное уширение фемтосекундных импульсов в нелинейном оптоволоконном усилителе. Подобный нелинейный режим усиления импульсов излучения длительностью 20–40 нс наблюдался в работе [6].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве источника излучения накачки использовался фемтосекундный Yb:KYW-лазер Femto-Star производства компании Техноскан. Средняя выходная мощность излучения лазера составляла 400 мВт на длине волны 1046 нм, длительность импульсов не превышала 250 фс при ширине спектра излучения 8.5 нм (рис. 2) и частоте следования ~100 МГц.

Для усиления излучения лазера был применен волоконный усилитель на основе сдвоенного волокна (технология GTWave [7]). Этот усилитель состоит из двух волокон, находящихся в оптическом контакте по всей длине. Одно из волокон является активным (в данном случае это было волокно, легированное иттербием), а второе волокно является пассивным (обычное кварцевое волокно, например SMF-28). Диаметр светопроводящей жилы активного волокна составлял 7 мкм, диаметр оболочки – 125 мкм. Длина волоконного усилителя составляла 12 м.

Излучение лазера заводилось в волоконный усилитель через фарадеевский изолятор, микробъектив и вспомогательный световод SMF-28 длиной 0.5 м, сваренный с активным волокном усилителя. Средняя мощность излучения на входе в световод SMF-28 составляла 150 мВт. Накачка усилителя осуществлялась через пассивный световод диодным лазером с мощностью излучения 8 Вт на длине волны 976 нм. Накачка произ-

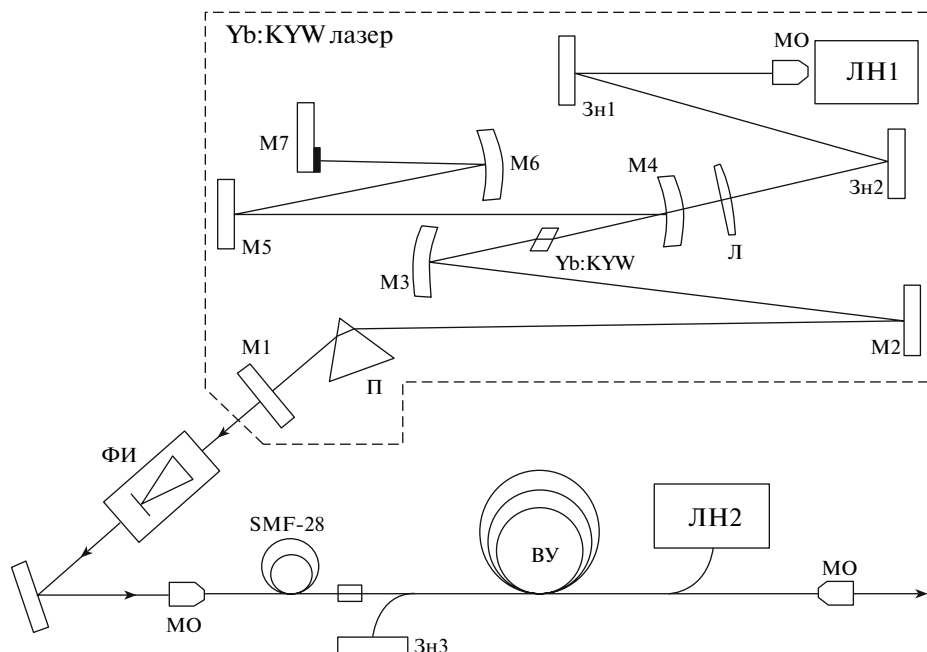


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: ЛН1, 2 – диодные лазеры накачки, Zn1–Zn3 – зеркала, отражающие излучение накачки, M1–M7 – зеркала Yb:KYW-лазера, Л – фокусирующая линза, П – призма, МО – микрообъектив, ФИ – фарадеевский изолятор, ВУ – волоконный усилитель, SMF-28 – кварцевое волокно.

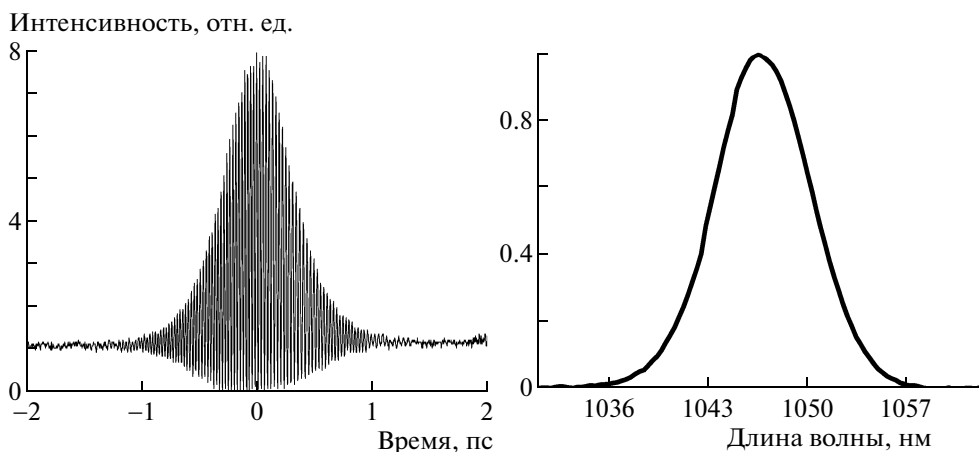


Рис. 2. Интерференционная автокорреляционная функция импульсов излучения лазера (слева) и спектр излучения лазера (справа).

водилась по встречной схеме, т.е. направление распространения излучения накачки в волокне было встречным по отношению к усиливаемому излучению. Непоглощенное излучение накачки (~1.5 Вт), выходящее из пассивного волокна, возвращалось назад в волокно с помощью отражающего зеркала (Zn3 на рис. 1). Отражающее зеркало подводилось вплотную к торцу пассивного световода с зазором 0.1–0.05 мм. Максимальная средняя мощность усиленного излучения достигала 3.4 Вт. Необходимо отметить, что в нашем эксперименте усилитель работал, по сути, на коротковолновом крыле спектральной полосы усиления, так как максимум усиления достигался на

длинах волн вблизи 1075–1080 нм [8]. Этим объясняется не очень высокая (42.5%) эффективность используемого волоконного усилителя.

При использовании линейного оптоволоконного усилителя спектр усиленного излучения повторяет спектр задающего излучения. В нашем эксперименте в силу относительно малого поперечного размера сердцевинки усиливающего волокна (диаметр 7 мкм) волоконный усилитель работал в нелинейном режиме, так как не только усиливал задающее излучение, но и уширял его спектр. Спектры выходного излучения в зависимости от средней мощности приведены на рис. 3. При увеличении средней мощности выходного

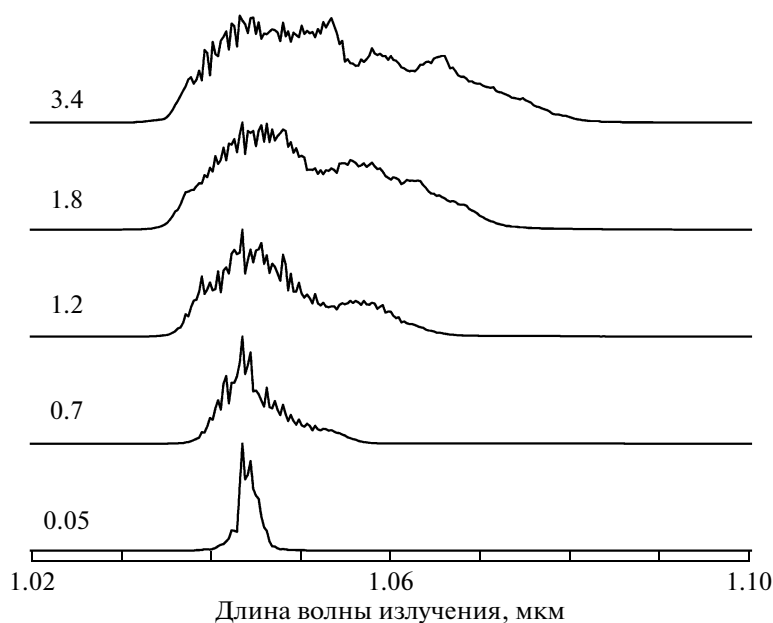


Рис. 3. Спектры излучения на выходе нелинейного оптоволоконного усилителя при средней мощности выходного излучения 0.05, 0.7, 1.2, 1.8, 3.4 Вт.

излучения от 50 мВт до максимального значения 3.4 Вт ширина спектра излучения на выходе усилителя возрастала с 8.5 нм (ширина спектра излучения задающего генератора) до 50 нм. Скорость уширения спектра усиленного излучения составила 12.4 нм/Вт. Полученная в данном эксперименте скорость уширения спектра излучения фемтосекундных импульсов в нелинейном оптоволоконном усилителе значительно (на 1–2 порядка) ниже, чем аналогичная скорость уширения спектра ультракоротких световых импульсов в микроструктурных или вытянутых волокнах. Относительно низкая скорость спектрального уширения излучения в нелинейном усилителе позволяет достичь высокой спектральной плотности излучения, существенно превосходящей спектральную плотность суперконтинуума на выходе микроструктурных или вытянутых волокон [9, 10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано спектральное уширение фемтосекундных импульсов Yb:KYW-лазера с центральной длиной волны 1046 нм в иттербиевом волоконном усилителе, работающем в нелинейном режиме. Скорость уширения спектра излучения импульсов накачки в зависимости от средней мощности усиленного излучения составила 12.4 нм/Вт. При максимальной средней мощности усиленного излучения 3.4 Вт ширина спектра усиленного излучения превышала 50 нм, а средняя спектральная плотность мощности излучения составила более 65 мВт/нм. Необходимо отметить, что средняя спектральная плотность мощности излучения на выходе нелинейного

оптоволоконного усилителя значительно превосходит аналогичный параметр суперконтинуума в микроструктурных или вытянутых волокнах, который обычно не превышает 4–5 мВт/нм. Таким образом, нелинейные оптоволоконные усилители весьма перспективны для получения спектрально-уширенного излучения с существенно более высокой спектральной плотностью мощности.

Данная работа проведена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (госконтракт № 02.513.11.3360), а также ведущей научной школы РФ чл.-корр. РАН А.М.Шалагина и чл.-корр. РАН С.Г. Раутиана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alfano R.R.* The Supercontinuum Laser Source: Fundamentals with Updated References. N.Y.: Springer-Verlag, 2005. 552 с.
2. *Желтиков А.М.* // УФН. 2006. Т. 176. № 6. С. 623.
3. *Dudley M.J., Genty G., Coen S.* // Rev. Mod. Phys. 2004. V. 78. P. 1135.
4. *Gaeta A.L.* // Opt. Lett. 2002. V. 27. P. 924.
5. *Nishizawa N., Takayanagi J.* // J. Opt. Soc. Am. B. 2007. V. 24. № 8. P. 1786.
6. *Pioger P.H., Couderc V., Leproux P., Champert P.A.* // Opt. Express. 2007. V. 15. № 18. P. 11358.
7. *Grudin A.B., Payne D.N., Turner P.W., Nilsson L.J.A., Zervas M.N., Ibsen M., Durkin M.K.* US Patent № 6826335, 30.11.2004.
8. *Кобцев С.М., Кукарин С.В.* // Квант. электрон. 2007. Т. 37. № 11. С. 993.
9. *Желтиков А.М.* // УФН. 2004. Т. 174. С. 73.
10. *Wadsworth W.J., Ortigosa-Blanch A., Knight J.C., Birks T.A., Man T.P.M., Russell P.St.J.* // J. Opt. Soc. Am. B. 2002. V. 19. P. 2148.