

Управление шириной спектра фемтосекундного континуума, генерируемого в световоде малого диаметра

С.М.Кобцев, С.В.Кукарин, Н.В.Фатеев

Впервые экспериментально продемонстрирована возможность управления шириной спектра континуума, генерируемого в сужающемся германосиликатном световоде с диаметром перетяжки ~ 3 мкм. Управление осуществлялось изменением длины волны излучения частотно-модулированных фемтосекундных импульсов накачки вблизи точки нулевой дисперсии групповой скорости световода. При перестройке центральной длины волны спектра входных импульсов длительностью 80 фс (энергия 0.6 нДж) от 789 до 847 нм ширина спектра континуума по уровню -20 дБ варьировалась от 98 до 790 нм.

Ключевые слова: сужающийся световод, генерация континуума, фемтосекундные импульсы

При прохождении фемтосекундных импульсов в оптических волноводах диаметром несколько микрометров с сердцевинной, частично или полностью граничащей с воздухом (ниже – микросветоводы), которые реализованы на основе дырчатых световодов [1, 2] или световодов с уменьшающимся по длине поперечным сечением, спектр импульсов может существенным образом трансформироваться. Это проявляется как в возникновении отдельных спектральных составляющих, центральная длина волны которых может быть больше [3] или меньше [4] длины волны исходных импульсов, так и в уширении спектра [5], вплоть до генерации суперконтинуума [6–8].

Микросветоводы отличаются сдвигом длины волны нулевой дисперсии групповых скоростей (ДГС) λ_d в видимый диапазон спектра и малой эффективной площадью моды, приводящей к увеличению нелинейного преломления. Это позволяет реализовать генерацию суперконтинуума за счет фазовой самомодуляции (ФСМ) распространяющихся внутри микросветовода УКИ неусиленного излучения Ti:сапфирового лазера с энергией несколько наноджоулей [8]. Наблюдаемая в [8] генерация суперконтинуума получена при накачке сужающихся германосиликатных световодов с диаметром перетяжки $\sim 1.5 - 2.5$ мкм в области аномальной ДГС (длина волны накачки 850 нм больше λ_d), при этом ширина спектра континуума по уровню -20 дБ составляла от ~ 450 до 1175 нм в зависимости от мощности импульсов накачки.

В настоящей работе экспериментально исследуется эволюция спектра континуума, генерируемого в микросветоводе, при изменении длины волны фемтосекундных импульсов накачки с начальной частотной модуляцией в области перехода ДГС световода от аномальной к нормальной. Предполагалось, что компенсация или увеличение начальной частотной модуляции импульсов при

смене знака ДГС будет приводить к модификации спектра континуума. Кроме того, большой интерес представляло выяснение возможности изготовления в лабораторных условиях микросветоводов с диаметром несколько микрометров из стандартного одномодового оптоволокна. Ко времени выполнения данной работы возможность создания подобных световодов была продемонстрирована только одной исследовательской группой [8].

Для изготовления микросветоводов с сердцевинной, полностью граничащей с воздухом, мы использовали оптоволокно SMF-28 фирмы Corning. Вытяжка исходного оптоволокна с диаметром оболочки 125 мкм осуществлялась в пламени водородной горелки. Вытяжка могла производиться в несколько этапов, в каждом из которых диаметр вытягиваемой части уменьшался в $\sim 3 - 5$ раз. Для наиболее тонких микросветоводов диаметр уменьшался относительно исходного в $\sim 40 - 60$ раз, до $2 - 3$ мкм, размер перетяжки определялся расчетным путем с погрешностью до 0.2 мкм. Образцы микросветоводов имели длину перетяжки 70 – 140 мм и длину переходных участков (от большого диаметра к малому) 20–25 мм. После размещения в пылеизолированных корпусах микросветоводы были достаточно устойчивы к механическим и акустическим возмущениям, сохранялись в течение длительного времени (месяц и более).

Полученные образцы накачивались излучением Ti:сапфирового лазера FEMoS (разработан в лаборатории лазерных систем Новосибирского государственного университета) через микрообъектив $8\times/0.2$. Импульсы излучения на входе в световод имели длительность 80 фс (частота повторения 80 МГц) и пиковую мощность 14 кВт (средняя мощность излучения 90 мВт). Ширина спектра импульсов накачки на полувысоте для используемых длин волн равнялась 21–27 нм. Расчетный параметр частотной модуляции выходных импульсов лазера длительностью 40 фс после прохождения элементов оптической развязки, микрообъектива и начального (невывянутого) участка световода длиной 5–6 см составлял примерно 2. Выходящее из микросветовода излучение коллимировалось линзой и направлялось в анализа-

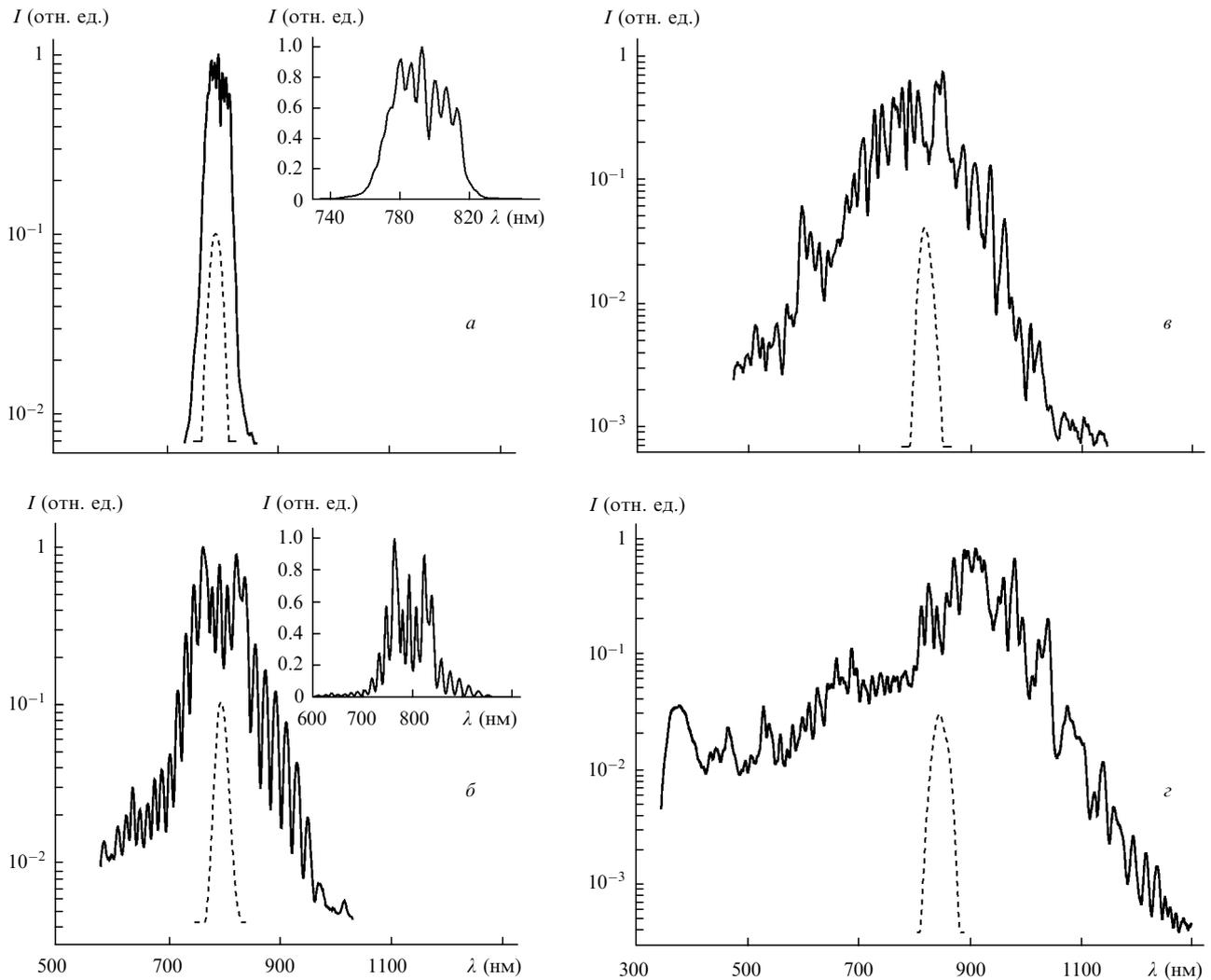


Рис.1. Спектральное распределение излучения на выходе из микросветовода диаметром 2.8 мкм при накачке фемтосекундными импульсами с длиной волны 789 (а), 797 (б), 819 (в) и 847 нм (г) (сплошные линии) и спектры импульсов входного излучения (штриховые линии). На вставках спектры приведены в линейном масштабе.

тор спектра оптического излучения. Для анализа спектров в области 400–2000 нм применялся автосканируемый монохроматор МДР-4 с регистрацией излучения германиевым фотоприемником и системой записи спектров в персональный компьютер.

Наибольший диапазон вариации ширины спектра выходящего из микросветовода излучения при изменении длины волны импульсов накачки в области $\sim 790 - 850$ нм достигался для микросветоводов диаметром 2.6–2.8 мкм. Длина волны нулевой ДГС этих микросветоводов близка к 800 нм, а на краях области перестройки длины волны излучения лазера расчетная ДГС микросветоводов диаметром 2.6 и 2.8 мкм составляет соответственно 3.5 и 10.8 фс²/мм (790 нм) и –9.6 и –7.8 фс²/мм (850 нм). Спектры выходящего излучения для всех длин волн накачки имели характерные для генерации континуума, вызванного действием ФСМ, осциллирующие структуры с периодом 2–5 ТГц.

На рис.1 приведены спектры выходящего излучения для микросветовода диаметром 2.8 мкм (длина 14 см), полученные при разных длинах волн излучения Тi:сапфирового лазера. Для всех длин волн средняя мощность излучения на выходе из микросветовода была одинакова и равна 45 мВт, профиль поперечного распределения вы-

ходного излучения был близок к гауссову. При изменении длины волны импульсов накачки от 789 до 847 нм спектральное распределение излучения на выходе из микросветовода по уровню –20 дБ имело следующие границы: 742–840 нм (накачка на длине волны 789 нм), 580–958 нм (797 нм), 515–1010 нм (819 нм), 350–1140 нм (847 нм). С увеличением длины волны накачки ширина спектрального распределения излучения на выходе из микросветовода возрастала с 98 до 790 нм. При длине волны накачки 797 нм, близкой к λ_d микросветовода, в центральной части зарегистрированного спектра наблюдалась ожидаемая [9] частичная концентрация энергии излучения в двух спектральных областях с максимумами на длинах волн 762 и 823 нм (см. вставку на рис.1,б).

Полученные результаты качественно можно интерпретировать следующим образом: начальная положительная частотная модуляция импульсов уменьшается в области аномальной ДГС микросветовода (при длине волны накачки более 800 нм), что при фиксированной средней мощности выходного излучения эквивалентно росту пиковой мощности импульсов за счет их сжатия. Это приводит к увеличению степени спектрального уширения импульсов под действием ФСМ по мере уменьшения ДГС в диапазоне 790–850 нм.

Таким образом, достигнуто восьмикратное изменение ширины спектра континуума по уровню -20 дБ при перестройке длины волны частотно-модулированных УКИ накачки на ~ 60 нм в области смены знака ДГС германосиликатного световода с сердцевинной диаметром 2.8 мкм, полностью граничащей с воздухом. Средняя спектральная плотность излучения континуума составила 0.46–0.06 мВт/нм.

Работа выполнена при поддержке компании «UTAR Scientific» (Канада).

1. Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Atkin D.M. *Opt. Lett.*, **21**, 1547 (1996).
2. Желтиков А.М. *УФН*, **170**, 1203 (2000).
3. Liu X., Xu C., Knox W.H., Chandalia J.K., Eggleton B.J., Kosinski S.G., Windeler R.S. *Opt. Lett.*, **26**, 358 (2001).
4. Ranka J.K., Windeler R.S., Stentz A.J. *Opt. Lett.*, **25**, 796 (2000).
5. Федотов А.Б., Желтиков А.М., Мельников Л.А., Тарасевич А.П., Линде Д. *Письма в ЖЭТФ*, **71**, 281 (2000).
6. Ranka J.K., Windeler R.S., Stentz A.J. *Tech. Digest of CLEO'99* (Washington, OSA, 1999, CPD8); *Opt. Lett.*, **25**, 25 (2000).
7. Wadsworth W.J., Knight J.C., Ortigosa-Blanch A., Arriaga J., Silvestre E., Mangan B.J., Russell P.St.J. *Proc. of XIV LEOS Ann. Meet.* (N.Y., IEEE, 1999, PD1.5).
8. Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *Tech. Digest of V Optoelect. and Comm. Conf. OECC'2000* (Chiba, Japan, 2000, PD2-3, p. 20, 21); *Opt. Lett.*, **25**, 1415 (2000).
9. Г.Агравал. *Нелинейная волоконная оптика* (М., Мир, 1996).