

УДК 53.082.532

*И. И. Корель<sup>1,2</sup>, В. И. Денисов<sup>1</sup>, Б. Н. Ньюшков<sup>1,3</sup>, В. С. Пивцов<sup>1</sup>*<sup>1</sup>Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет

## Прецизионные лазерные системы на основе оптических волокон\*

Рассматриваются вопросы разработки и исследования основных функциональных блоков мобильных фемтосекундных оптических часов на основе малогабаритного Nd:YAG/I<sub>2</sub> оптического стандарта частоты и цельноволоконной лазерной системы. Представлены результаты экспериментов по уширению фемтосекундной гребенки частот до октавы (1÷2 мкм) и численные результаты моделирования генерации суперконтинуума в высоконелинейных волокнах со сложным дисперсионным профилем.

**Ключевые слова:** фемтосекундные оптические часы, генерация суперконтинуума, высоконелинейные оптические волокна, вычислительный эксперимент.

Современные стандарты частоты, реализующие эталон одной из основных единиц системы СИ – секунду, являются на 4–5 порядков более точными по сравнению с эталонами остальных физических величин. Первичным стандартом частоты в настоящее время является стандарт в микроволновом диапазоне, на основе стабильного перехода между подуровнями сверхтонкой структуры атома Cs. На основе этого стандарта реализуется международная атомная шкала времени. Дальнейшее увеличение точности стандартов частоты связывается с переходом из микроволнового в оптический диапазон с использованием оптических стандартов частоты (ОСЧ). Важным достижением в этой области явилось использование особенностей излучения фемтосекундного лазера, стабилизированного по оптическому стандарту частоты [1]. Работа посвящена созданию фемтосекундных оптических часов (ФОЧ) [2] на основе волоконных эрбиевых лазеров. Такие часы состоят в основном из стандартных волоконных телекоммуникационных элементов, используют высокоэффективную прямую накачку диодными лазерами. Спектральный диапазон излучения (1000–2000 нм) перекрывает все телекоммуникационные окна оптоволоконных линий связи. Главным преимуществом волоконных ФОЧ является возможность их исполнения в полностью волоконном виде, что позволяет создавать портативную и фактически неразъюстируемую аппаратуру. Подобные ФОЧ имеют множество применений в наземных и бортовых навигационных системах, дальномерных измерениях, высокоточной аттестации частот радио- и оптических систем.

В работе представлены промежуточные результаты разработки мобильных ФОЧ на основе малогабаритного оптического стандарта частоты Nd:YAG/I<sub>2</sub> [3] и волоконно-оптического фемтосекундного синтезатора частот. Важной особенностью предложенной схемы ФОЧ является реализация переноса стабильности оптического стандарта частоты в радиодиапазон без непосредственной стабилизации межмодового частотного интервала [4]. Это осуществляется только за счет непосредственной привязки компоненты фемтосекундной гребенки оптических частот на 1064 нм к оптическому стандарту и стабилизации частоты смещения гребенки (рис. 1). Для генерации гребенки оптических частот в ФОЧ используется неюстируемый цельноволоконный эрбиевый фемтосекундный лазер с пассивной синхронизацией мод и линейной двухвыводной схемой резонатора с компенсацией поляризационной нестабильности.

Для реализации не требующей настройки предельно компактного и надежного лазера было использовано миниатюрное полупроводниковое насыщающееся зеркало (SESAM), закрепленное непосредственно на торце волоконного световода. Конструкция лазера даже в условиях сильных вибраций обеспечивает самостарт и высокую устойчивость режима

синхронизации мод. Лазер генерирует импульсы длительностью  $\sim 550$  фс с частотой повторения  $\sim 17$  МГц на длине волны  $\sim 1560$  нм. Лазер имеет высокую энергоэффективность — суммарная средняя мощность лазера с обоих выходов достигает  $\sim 40$  мВт при мощности излучения накачки  $\sim 200$  мВт. Длина волны накачки составляет  $\sim 1480$  нм.



Рис. 1. Схема мобильных ФОЧ

Динамическая подстройка фазочастотных характеристик лазера производится с помощью пьезокерамического стретчера волокна (ПСВ) в резонаторе и изменения мощности накачки (модуляцией тока лазерного диода накачки). Быстродействие таких механизмов сервоуправления составляет  $\sim 0,1$  мс. Уширение фемтосекундной гребенки оптических частот до октавы ( $1 \div 2$  мкм) осуществляется с помощью высоконелинейного волокна с изменяющимися по длине дисперсионными характеристиками. Подобное волокно позволяет получить оптимальное распределение интенсивности в спектральном суперконтинууме (рис. 2). Радиочастотный сигнал биений между длинноволновым репером Nd:YAG/I<sub>2</sub> стандарта частоты и ближайшей коротковолновой линией гребенки оптических частот стабилизируется первым контуром системы фазовой автоподстройки частоты лазера (ЧФД-1 на рис. 1). Второй контур (ЧФД-2) предполагается использовать для стабилизации частоты смещения гребенки оптических частот [5].

Одним из важнейших элементов ФОЧ является система генерации спектрального суперконтинуума шириной в октаву, состоящего из дискретных спектральных компонент (гребенки частот) — так называемого *фемтосекундного комба* [7]. Фемтосекундный комб — спектр излучения фемтосекундных лазеров — представляет собой детерминированную решетку частот, характеристики которой зависят от частоты повторений импульсов. Фемтосекундный комб предоставляет уникальные возможности по синтезу и измерению частот от радио- до УФ-диапазонов. Образование спектрального суперконтинуума, как правило, ассоциируют с прохождением импульсов в среде с сильными нелинейными характеристиками. К таким средам относятся и оптические волокна с высокой нелинейностью. Процесс формирования спектральной огибающей импульса (и соответственно — комба) в волокне связан с действием целого ряда нелинейных и дисперсионных эффектов, среди которых: фазовая самомодуляция, образование ударной волны, рамановское рассеяние и хроматическая дисперсия [6]. Ключевыми факторами, влияющими на ширину спектра, являются фазовая самомодуляция и хроматическая дисперсия. Фазовая самомодуляция фактически ответственна за спектральное суживание, в то время как хроматическая дисперсия ему препятствует. Степень спектрального уширения импульса в нелинейном оптическом волокне в первую очередь определяется его пиковой интенсивностью, фактически — мощностью лазера. Для мобильных ФОЧ важно оптимизировать параметры волокна так, чтобы мощности лазера было достаточно для генерации спектрального суперконтинуума требуемой ширины.

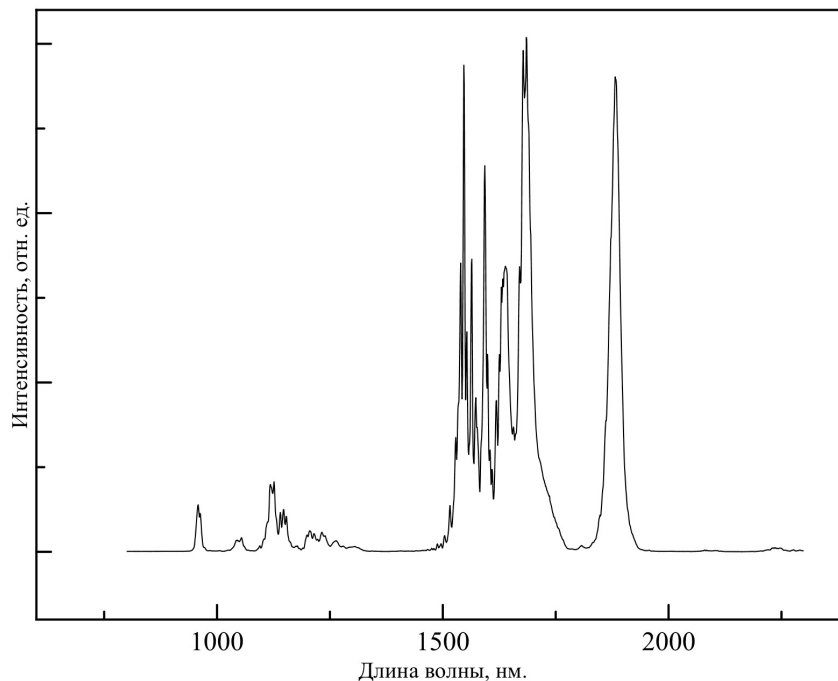


Рис. 2. Спектральный суперконтинуум

В рамках исследований по разработке теоретической и численной моделей прохождения фемтосекундных импульсов в волокнах со сложными дисперсионными профилями и постоянным диаметром проводились исследования влияния параметров волокна на форму уширенного спектра. Эволюция импульса в нелинейном волокне описывалась численным решением модифицированного нелинейного уравнения Шрёдингера (НУШ):

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2(z)\frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_3(z)\frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma(z)\left[|A|^2 A + \frac{2i}{\omega_0}\frac{\partial}{\partial T}(|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial}{\partial T}|A|^2\right],$$

где  $A$  — амплитуда поля,  $\beta_{2,3}$  — дисперсия групповых скоростей соответствующего порядка,  $\gamma$  — параметр нелинейности, зависящий от пиковой интенсивности импульса и эффективной площади моды волокна,  $\omega_0$  — центральная частота излучения,  $T_R$  — параметр, связанный с наклоном линии вынужденного комбинационного рассеяния,  $T$  — время,  $z$  — пространственная координата.

Отличием от традиционного вида НУШ является учет зависимости дисперсионных и нелинейного параметров от пространственной координаты, численное решение построено на базе фурье-метода с расщеплением по физическим параметрам [8].

Расчеты показывают особенно высокие степени спектрального уширения для некоторых волокон со ступенчатым профилем дисперсии. Так, если дисперсионный профиль нелинейного волокна имеет две точки нулевой дисперсии, положение которых меняется по длине волокна, можно подобрать параметры такого пространственного профиля с оптимальным уширением. Самый широкий спектральный суперконтинуум, полученный в численной модели (рис. 3), занимает диапазон  $0.9 \div 2.3$  мкм, для центральной длины волны — 1560 нм. Это случай, когда на входе в волокно центральная длина волны совпадает с точкой нулевой дисперсии, а по мере движения в волокне у профиля дисперсии появляются две нулевые точки в крыльях спектра. Таким образом, в крыльях спектра минимизируется влияние дисперсии групповых скоростей, усиливается влияние нелинейных эффектов, что приводит к заметному дополнительному, по сравнению со случаем постоянного по длине волокна дисперсионного профиля, спектральному уширению.

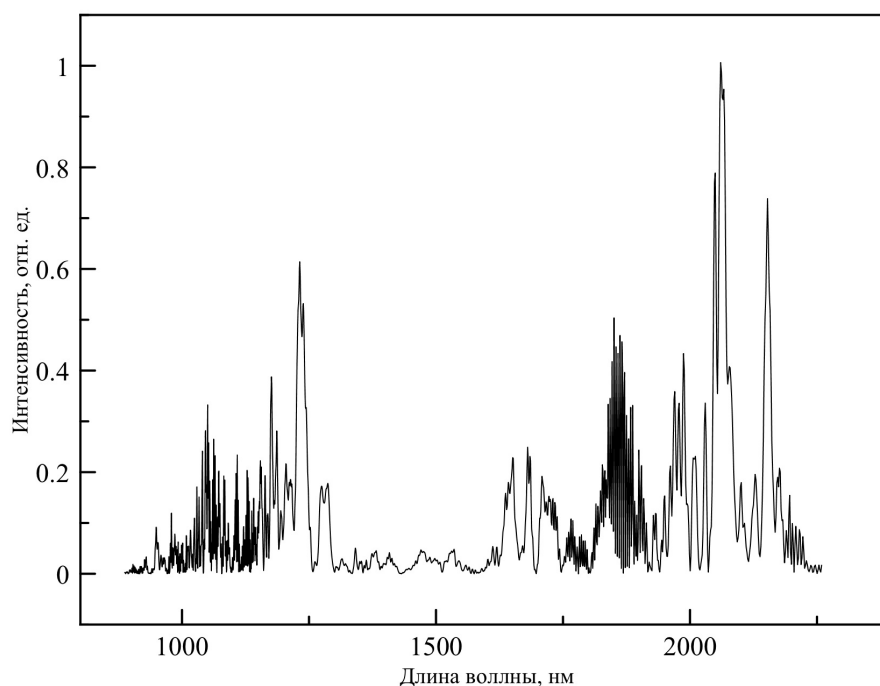


Рис. 3. Численный расчет спектрального суперконтинуума в нелинейном волокне со сложным дисперсионным профилем

В работе представлены предварительные результаты разработки мобильных ФОЧ с волоконно-оптическим фемтосекундным синтезатором частот: экспериментальная генерация спектрального суперконтинуума в диапазоне  $1\div 2$  мкм и численный эксперимент, который показывает принципиальную возможность получения уширенного спектра в диапазоне  $0.9\div 2.3$  мкм.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (рег. номера преков № 01201374304, № 01201266403) с использованием оборудования Центра Коллективного Пользования «Фемтосекундный лазерный комплекс».

\*Работа доложена на 5-й Всероссийской конференции молодых ученых «Микро-, нанотехнологии и их применение» им. Ю.В. Дубровского, ИПТМ РАН, Черноголовка, 19–22 ноября 2012 года.

## Литература

1. *Бакланов Е.В., Покасов П.В.* Оптические стандарты частоты и фемтосекундные лазеры // *Квантовая электроника*. — 2003. — Т. 33, № 5. — С. 383–399.
2. *Багаев С.Н., Денисов В.И., Захарьяш В.Ф., Каширский А.В., Клементьев В.М., Кузнецов С.А., Корель И.И., Пивцов В.С.* Фемтосекундные оптические часы // *Квантовая электроника*. — 2004. — Т. 34, № 12. — С. 1096–1100.
3. *Скворцов М.Н., Охажкин М.В., Невский А.Ю., Багаев С.Н.* Оптический стандарт частоты на основе Nd:YAG-лазера, стабилизированного по резонансам насыщенного поглощения в молекулярном иоде с использованием второй гармоники излучения // *Квантовая электроника*. — 2004. — Т. 34, № 12. — С. 1101–1106.

4. *Beverini N., Carelli G., De Michele A., Maccioni E., Nyushkov B., Sorrentino F., Moretti A.* Coherent multiwave heterodyne frequency measurement of a far-infrared laser by means of a femtosecond laser comb // *Optics Letters*. — 2005. — V. 30, N 1. — P. 32–34.
5. *Беверини Н., Пределли М., Соррентино Ф., Ньюшков Б., Руффини А.* Аналого-цифровой фазочастотный детектор для фазовой привязки мод диодного лазера к гребенке оптических частот // *Квантовая электроника*. — 2004. — Т. 34, № 6. — С. 559–564.
6. *Денисов В.И., Корель И.И., Кузнецов С.А., Ньюшков Б.Н., Пивцов В.С., Чепуров С.В.* Спектральное уширение излучения фемтосекундных лазеров в высоконелинейных оптических волокнах // *Фотонные кристаллы и нанокompозиты: структурообразование, оптические и диэлектрические свойства* / под ред. В.Ф. Шабанова, В.Я. Зырянова. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. Глава 8, С. 202–213.
7. *Желтиков А.М.* Да будет белый свет: генерация суперконтинуума сверхкороткими лазерными импульсами // *УФН*. — 2006. — Т. 176, № 6. — С. 623–649.
8. *Агравал Г.* Нелинейная волоконная оптика. — М. : Мир, 1996. — С. 83.

*Поступила в редакцию 22.11.2012.*