

Экспериментальные исследования влияния оптического волокна с перетяжкой на стабильность межмодовой частоты высокостабильных фемтосекундных импульсов

С.Н.Багаев*, **А.М.Гончаренко***, **В.Ф.Захарьяш***, **В.М.Клементьев***, **Д.Б.Колкер***,
С.А.Кузнецов*, **Ю.А.Матюгин***, **В.С.Пивцов***, **С.В.Чепуров***, **Т.А.Биркс****, **В.Дж.Уодсуорт****,
Ф.Ст.Дж.Расселл**

Описана методика проведения и результаты высокоточных измерений межмодовой частоты фемтосекундного Ti:сапфирового лазера на выходе оптического волокна с перетяжкой. Показано, что в процессе преобразования мод происходит ухудшение стабильности межмодовой частоты примерно в 2 раза при малых временах усреднения (10 с) и в 1.1 раза – при больших временах усреднения (1000 с).

Ключевые слова: фемтосекундный лазер, оптическое волокно, стабильность частоты.

С созданием оптоволоконных систем уширения спектра мод фемтосекундного лазера на основе дырчатых волокон (holey fiber) [1, 2] и волокон с перетяжкой (tapered fiber) [3, 4] открываются уникальные возможности синтеза и измерения частот, простирающихся от радио- до УФ диапазона. При прохождении фемтосекундного импульса через упомянутые волокна спектр мод может расширяться более чем на октаву. При воздействии импульса высокой интенсивности из-за нелинейных свойств материала волокна происходит взаимная фазовая модуляция мод, приводящая к образованию боковых компонент, точно удаленных на межмодовый частотный интервал, и возникает, таким образом, уширенный спектр. При этом его огибающая интенсивности может иметь сложный вид.

В настоящее время значительные усилия направлены на изучение физических основ преобразования частоты в оптоволоконных системах, и прежде всего – природы нелинейности, определяющей уширение спектра, а также свойства и характеристики полученного на выходе волокна излучения. Важнейшим является вопрос о том, сохраняется ли стабильность межмодовой частоты последовательности высокостабильных фемтосекундных импульсов после прохождения через оптоволоконную систему. Другой вопрос – каковы амплитудно-частотные характеристики выходного излучения и каким образом происходит перераспределение энергии между компонентами преобразованного излучения.

В данной работе проведены экспериментальные исследования стабильности межмодовой частоты высокостабильного фемтосекундного Ti:сапфирового лазера на выходе волокна с перетяжкой. Методика эксперимента состояла в измерении стабильности межмодовой частоты Ti:сапфирового лазера (частота повторения им-

пульсов 100 МГц) на входе и выходе волокна. Кроме того, с помощью светофильтров выделялись две спектральные области выходного излучения, в которых измерялась стабильность межмодовых биений.

Для осуществления этих высокоточных измерений было разработано и создано устройство, в котором межмодовая частота переносилась путем преобразования в низкочастотную область и затем производились высокоточные измерения выбранной частоты (200 Гц). Подробное описание устройства будет дано в последующей публикации.

Эксперимент состоял из двух этапов. На первом этапе исследовались собственные частотные шумы устройства в собственной базе времени, т. е. вместо межмодовой частоты лазера использовался сигнал от водородного стандарта частоты. Исследования показали, что за времена усреднения $10^2 - 10^3$ с устройство позволяет производить измерения с относительной точностью $10^{-14} - 10^{-15}$.

На втором этапе исследовалась стабильность межмодовой частоты f_m высокостабильного фемтосекундного Ti:сапфирового лазера, описанного нами в [5]. (Нестабильный лазер имеет стабильность на несколько порядков хуже, что не позволяет проводить указанные исследования.) Волокно с перетяжкой было изготовлено в Университете г. Бат (Великобритания) из серийного телекоммуникационного волоконного световода Corning SMF-28 с диаметром сердцевинки 9 мкм. Длина волны отсечки второй моды световода равнялась 1250 нм. Мы использовали волокно с диаметром и длиной перетяжки 2.5 мкм и 60 мм соответственно. Мощность введенного в волокно излучения составляла примерно 170 мВт, спектральный диапазон излучения на выходе волокна простирался от 400 до 1200 нм. Была проведена серия измерений стабильности межмодовой частоты лазера за разные времена усреднения на входе излучения в волокно и на его выходе. Полученные результаты исследований сведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что стабильность частоты f_m хуже примерно на порядок по сравнению с предельными возможностями нашей измерительной системы. После про-

*Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: clock@laser.nsc.ru

**Department of Physics, University of Bath, Bath BA2 7AY, United Kingdom

Табл.1.

Время усреднения (с)	Среднее значение частоты (Гц)		Среднеквадратичное отклонение от среднего значения (Гц)		Число измерений		Относительная стабильность частоты $\Delta f_m/f_m$	
	на входе	на выходе	на входе	на выходе	на входе	на выходе	на входе	на выходе
1	199.999386	199.999268	2.901×10^{-3}	5.744×10^{-3}	1200	1183	2.9×10^{-11}	5.744×10^{-11}
10	199.999762	199.999184	4.280×10^{-4}	8.016×10^{-4}	180	198	4.280×10^{-12}	8.016×10^{-12}
100	199.999855	199.999876	5.738×10^{-5}	6.940×10^{-5}	98	92	5.738×10^{-13}	6.940×10^{-13}
1000	199.999949	199.999976	4.824×10^{-6}	5.411×10^{-6}	12	13	4.824×10^{-14}	5.411×10^{-14}

Табл.2.

Параметры излучения	Число измерений		
	На входе волокна	С фильтром СС4	С фильтром СЗС5
	98	83	92
Среднее значение измеряемой частоты (Гц)	199.999855	199.999846	199.999876
Среднеквадратичное отклонение от среднего значения (Гц)	5.738×10^{-5}	8.458×10^{-5}	6.940×10^{-5}

Примечание: время усреднения 100 с.

хождения волокна происходит небольшое ухудшение стабильности f_m , связанное, по-видимому, с возрастанием фазовых флуктуаций. Видно, что при малых временах усреднения стабильность f_m после прохождения волокна примерно в два раза хуже, чем на входе. При больших временах усреднения (1000 с) стабильность практически не изменяется.

В дальнейших исследованиях изучался вопрос о возможной зависимости стабильности от области спектра, где проводятся измерения. Для этого вся спектральная область была разделена с помощью светофильтров на две подобласти, в каждой из которых измерялось среднее значение частоты на выходе волокна (фильтр СС4 выделял область спектра 700–1200 нм, фильтр СЗС5 – об-

ласть 400–600 нм). Результаты измерений приведены в табл.2. Для сравнения даны результаты измерений стабильности частоты на входе волокна. Видно, что стабильности f_m различны в разных областях уширенного спектра.

В заключение отметим, что при прохождении последовательности высокостабильных фемтосекундных импульсов через волокно с перетяжкой в процессе нелинейного преобразования мод (взаимная фазовая модуляция) происходит некоторое ухудшение стабильности межмодовой частоты. Это объясняется наличием слабых амплитудно-частотных флуктуаций излучения в волокне и неполным их усреднением в процессе измерения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 01-02-16922) и INTAS (99-1366).

1. Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Atkin D.M. *Opt. Lett.*, **21**, 1547 (1996).
2. Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **25**, 1415 (2000).
3. Bagayev S.N., Dmitriyev A.K., Chepurov S.V., Dychkov A.S., Klementyev V.M., Kolker D.B., Kuznetsov S.A., Matyugin Yu.A., Okhapkin M.V., Pivtsov V.S., Skvortsov M.N., Zakharyash V.F., Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J., Zheltikov A. M. *Laser Phys.*, **11**, 1270 (2001).
4. Акимов Д.А., Алфимов М.В., Багаев С.Н., Биркс Т., Иванов А.А., Федотов А.Б., Уолдсуорт У.Дж., Расселл Ф.Ст.Дж., Пивцов В.С., Подшивалов А.А., Желтиков А.М. *Письма в ЖЭТФ*, **74**, 515 (2001).
5. Bagayev S.N., Chepurov S.V., Klementyev V.M., Kuznetsov S.A., Pivtsov V.S., Pokasov V.V., Zakharyash V.F. *Appl. Phys. B*, **70**, 375 (2000).