

## Фемтосекундный волоконный лазер с комбинированной линейно-кольцевой схемой резонатора

В.И.Денисов, А.В.Иваненко, Б.Н.Нюшков, В.С.Пивцов

*Предложен и реализован новый тип фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера с самосинхронизацией мод. Оригинальная комбинированная схема резонатора лазера, объединяющая преимущества схем лазеров кольцевого и линейного типов, позволяет осуществлять плавную перестройку частоты следования импульсов в широком диапазоне (более 30 кГц) и обеспечивает высокую надежность режима самосинхронизации.*

**Ключевые слова:** самосинхронизация, волоконный фемтосекундный лазер.

Волоконные фемтосекундные лазеры могут успешно применяться для решения многих фундаментальных и прикладных задач [1, 2]. По сравнению с традиционными лазерами на объемных элементах они более компактны, надежны и имеют высокий КПД. Особенно привлекательны цельноволокonné фемтосекундные лазеры без прецизионных оптомеханических элементов, поскольку резонаторы таких лазеров не подвержены разъюстировке из-за вибраций, механических и термических релаксационных процессов. Режим синхронизации мод в цельноволокonné фемтосекундных эрбиевых лазерах очень устойчив. К сожалению, такие лазеры технологически сложно изготовить с высокой точностью для заранее заданной частоты следования импульсов, диапазон перестройки которой (осуществляется растяжением волокна) очень мал (обычно несколько сотен герц) [3]. Если необходим больший диапазон перестройки, волоконный резонатор должен иметь разрыв регулируемой длины, однако такой разрыв ухудшает стабильность и снижает надежность конструкции. К недостаткам большинства конструкций волоконных лазеров с самосинхронизацией мод и регулируемой длиной резонатора можно отнести также неволоконный вывод излучения из резонатора [4, 5].

Целью настоящей работы является разработка конструкции стабильного высоконадежного фемтосекундного волоконного лазера с самосинхронизацией мод, имеющего большой диапазон плавной перестройки частоты следования импульсов, волоконный выход излучения и минимальное количество объемных оптических элементов в резонаторе. Предлагаемая конструкция основана на комбинации лазеров кольцевого и линейного типов, которая позволила объединить их преимущества (режим бегущей волны, возможность получения высокой частоты следования импульсов, простота настройки).

Схема реализованного фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера показана на рис.1,а. Резонатор сос-

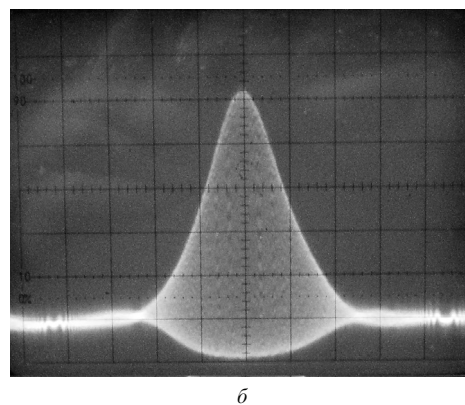
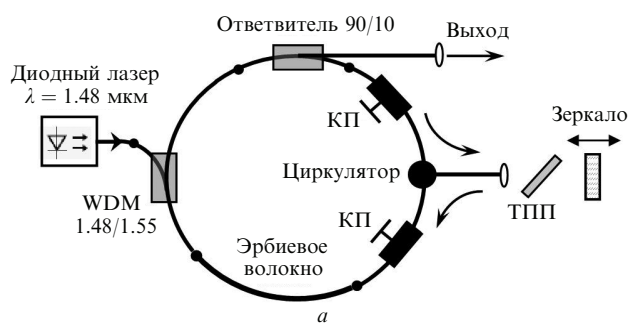


Рис.1. Схема резонатора лазера (WDM – спектральный мультиплексор; КП – контроллеры поляризации; ТПП – тонкопленочный поляризатор) (а) и автокорреляционная функция импульсов (б).

тоит из двух частей: цельноволокonné кольцевой части и короткого линейного участка всего с двумя объемными элементами. Обе части резонатора связаны между собой посредством волоконно-оптического циркулятора, который для кольцевой части играет также роль оптического диода, обеспечивая в ней однонаправленный режим генерации. Глухое зеркало, ограничивающее линейную часть резонатора, приклеено к пьезокерамическому транслятору, в свою очередь закрепленному на прецизионной подвижке. Перемещение зеркала позволяет изменять длину резонатора и тем самым плавно перестраивать частоту следования импульсов.

В качестве активного световода в лазере используется высоколегированное эрбиевое волокно длиной 1.8 м

В.И.Денисов, А.В.Иваненко, Б.Н.Нюшков, В.С.Пивцов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13/31; e-mail: denisov@laser.nsc.ru

Поступило в редакцию 6 июня 2008 г., после доработки – 24 июля 2008 г.

(ЛЕККИ) с коэффициентом поглощения  $40 \pm 4$  дБ/м на длине волны 1530 нм. Вывод излучения генерации из резонатора осуществляется через 10 %-ный волоконный ответвитель. Самосинхронизация мод реализуется так же, как и в классических фемтосекундных волоконных лазерах, – за счет эффекта нелинейного двулучепреломления [6]. Поляризационным дискриминатором служит тонкопленочный поляризатор, установленный перед глухим зеркалом в линейной части резонатора. Для запуска режима синхронизации мод требуется легкое возмущение резонатора, например постукивание по оправе плотного зеркала. Реализован также запуск режима с помощью электрического импульса, подаваемого на пьезокерамический транслятор.

Основные параметры излучения лазера типичны для волоконных эрбиевых лазеров с самосинхронизацией мод. Средняя выходная мощность лазера составляет около 20 мВт при мощности накачки 350 мВт. Мощность излучения накачки, при которой наблюдался устойчивый режим самосинхронизации мод, лежит в диапазоне 250–350 мВт. Центральная длина волны излучения генерации равна 1565 нм. Ширина оптического спектра (на полувысоте) в режиме самосинхронизации мод составляет около 15 нм, без синхронизации – менее 1 нм. Оптический спектр имеет форму, характерную для генерации солитонов. Формирование оптического солитона в лазере объясняется отрицательной (аномальной) суммарной внутрирезонаторной дисперсией групповых скоростей на длине волны генерации ( $\sum \beta_2 \approx -0.04$  пс<sup>2</sup>) [6]. При имеющемся уровне внутрирезонаторной мощности солитоны высшего порядка не возникают, поэтому обеспечивается режим одного импульса на периоде резонатора и высокая стабильность частоты следования.

Длительность импульсов, измеренная с помощью интерференционного автокоррелятора, составляет около 200 фс (рис.1,б), фундаментальная частота следования импульсов данного лазера равна 30.4 МГц. Диапазон плавной перестройки частоты следования превышает 30 кГц и ограничивается полным ходом используемой прецизионной подвижки (5 мм). При плавной перестройке частоты следования импульсов режим синхронизации мод сохраняется. Точность механической перестройки частоты следования определяется ценой деления микро-

винта подвижки (10 мкм) и составляет  $\sim 60$  Гц. Более точная подстройка частоты может осуществляться посредством пьезокерамического транслятора (чувствительность  $\sim 30$  мГц/В), на который наклеено зеркало. Предложенный тип лазера из-за конструктивных ограничений (оптимальное соотношение длин световодов с дисперсией разного знака) и технологических ограничений (сварка коротких световодов) может иметь фундаментальную частоту следования импульсов примерно 20–100 МГц.

Исследование частотных характеристик лазера выявило хорошую спектральную чистоту и стабильность межмодовых биений: отношение сигнал/шум межмодовых биений превышает 70 дБ, кратковременная стабильность межмодовой частоты не хуже 1 Гц (разрешение анализатора), дрейф частоты (из-за отсутствия термостабилизации лазера) не более 30 Гц/ч. Лазер обладает высокой устойчивостью режима самосинхронизации: в лабораторных условиях непрерывная самосинхронизация наблюдалась в течение всего рабочего дня даже без использования какой-либо виброакустической изоляции лазера.

Таким образом, нами разработан и исследован новый тип фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера с самосинхронизацией мод, который благодаря оригинальной комбинированной схеме резонатора объединяет в себе преимущества кольцевого и линейного лазеров. К наиболее значимым достоинствам предложенной конструкции относится возможность плавной перестройки частоты следования импульсов в широком (более 30 кГц) диапазоне с высокой (субгерцовой) точностью, а также высокая надежность режима самосинхронизации и простота настройки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 06-02-16286-а).

1. Adler F. et al. *Opt. Express*, **12** (24), 5872 (2004).
2. Gubin M.A. et al. *Laser Phys.*, **17** (11), 1286 (2007).
3. Inaba H. et al. *Opt. Express*, **14** (12), 5223 (2006).
4. Fermann M.E. et al. *Opt. Lett.*, **19** (1), 43 (1994).
5. Nelson L.E. et al. *Appl. Phys. B*, **65**, 277 (1997).
6. Таусенев А.В., Крюков П.Г. *Квантовая электроника*, **34** (2), 106 (2004).