

PACS 42.55.Wd, 42.55.Xi; 42.60.Fc; 42.60.Gd

Лазер на волокне, легированном Er^{3+} , с модуляцией добротности и синхронизацией мод при использовании волоконного фильтра Single-Multi-Single и пьезоэлектрика*

Ди Ван, Юньдзинь Чжан, Аото Дун, Сяосинь Сю, Ёулунь Дзю, Баотюань Яо

Представлен полностью волоконный лазер на световоде, легированном Er^{3+} , с активной модуляцией добротности и пассивной синхронизацией мод. Центральная длина волны лазера расположена на 1563 нм и определяется изготовленным в лаборатории линейным волоконным фильтром Single-Multi-Single (SMS). Ширина лазерного спектра составляет почти 0.1 нм. Механизм активной модуляции добротности основан на управлении состоянием поляризации с помощью пьезоэлектрика, предназначенного для сжатия сегмента пассивного волокна в кольцевом резонаторе. Для реализации самостартующего режима пассивной синхронизации мод используется нелинейное вращение поляризации. В режимах пассивной синхронизации мод средняя выходная мощность излучения составляет 2.1 мВт, частота следования импульсов – 11.96 МГц и, соответственно, энергия одиночного импульса – 0.18 нДж. При работе в режиме модуляции добротности с частотой 100 Гц средняя выходная мощность равна 1.5 мВт. Полная длительность импульса в режиме модуляции добротности составляет 15 мкс, и каждый такой импульс составлен из нескольких десятков пиков, обусловленных синхронизацией мод. Расчетная энергия выходного импульса волоконного лазера с модуляцией добротности равна около 15 мкДж, а энергия каждого импульса с синхронизованными модами составляет около 64–68 нДж при учете доли мощности импульса с модулированной добротностью, локализованной между такими импульсами.

Ключевые слова: волоконный лазер, синхронизация мод и модуляция добротности, многомодовый интерференционный фильтр.

1. Введение

Интерес к самостартующим волоконным лазерам с синхронизацией мод, достигаемой в результате нелинейного вращения поляризации, обусловлен теми преимуществами, которые дает им их линейная полностью волоконная структура, а также низкая частота следования импульсов, сверхширокополосный спектр и высокая энергия [1–3]. Волоконный нелинейный эффект Керра и формирование диссипативных солитонов являются внутренними механизмами для самостартующих лазеров с синхронизацией мод на основе нелинейного вращения поляризации [4, 5]. По сравнению с волоконными лазерами с синхронизацией мод волоконные лазеры с модуляцией добротности имеют не только большую энергию, но и большую ширину оптических импульсов [6–8]. Сочетая в себе преимущества методов модуляции добротности и синхронизации мод (QML), волоконный лазер может иметь превосходные эксплуатационные качества – более высокую энергию и меньшую длительность импульса, чем у обычных волоконных QML-лазеров [9, 10]. Волоконный многомодовый интерференционный фильтр, основанный на переносе изображения при многомодовой интерференции, имеет простую линейную Single-Multi-Single (SMS) полностью волоконную структуру и легко изготавливается [11, 12].

* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

Ji Wang, Yunjun Zhang, Aotuo Dong, Xiaoxin Xu, Youlun Ju, Baoquan Yao. National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 150001; e-mail: yunjunzhang@126.com

Поступила в редакцию 11 декабря 2012 г., после доработки – 9 апреля 2013 г.

SMS-фильтр уже успешно применялся в волоконном лазере для достижения малой ширины линии [13, 14].

Нами представлен полностью волоконный лазер на световоде, легированном Er^{3+} , с активной модуляцией добротности и пассивной синхронизацией мод. Энергия импульса при синхронизации мод увеличивается в сотни раз в случае использования метода модуляции добротности. Волоконный лазер имеет кольцевой резонатор, а синхронизация мод обеспечивается нелинейным вращением поляризации. Для модуляции добротности используется быстрый отклик пьезоэлектрика, вызывающий изменение состояния поляризации при нажатии на сегмент волокна. В кольцевом резонаторе имеется изготовленный нами многомодовый интерференционный фильтр, определяющий центральную длину волны волоконного лазера.

2. Экспериментальная установка

Волоконный лазер с активной модуляцией добротности и пассивной синхронизацией мод показан на рис.1. Он состоит из легированного Er^{3+} отрезка одномодового волокна длиной 6 м, двух контроллеров поляризации (КП), волоконного SMS-фильтра, поляризационно-чувствительного изолятора (ПЧИ), одномодового лазерного диода (ЛД) (973 нм) в качестве источника накачки и пьезоэлектрика с быстрым откликом. Волоконный SMS-фильтр является самодельным, в нем используется многомодовое волокно 62.5/125 мкм (длина 12 мм) и одномодовое волокно SMF-28. Максимальная выходная мощность ЛД составляет 150 мВт. Активное волокно имеет поглощение 5 дБ/м на 973 нм. Система пьезоэлектрического привода включает в себя генератор сигналов и усилитель, который выдает пиковое напряжение до 200 В, а сам пьезоэлектрик (его размеры 3×3×15 мм) способен создать переменное

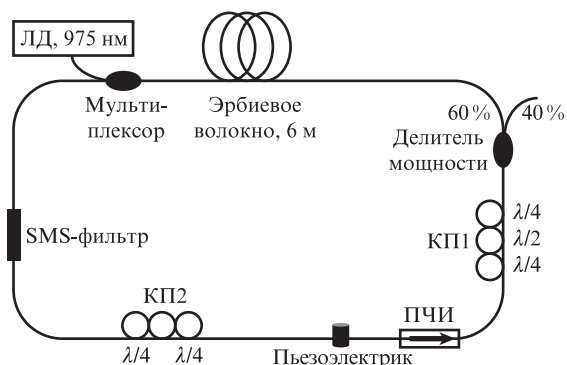


Рис.1. Экспериментальная установка узкополосного лазера на волокне, легированном Er³⁺, с модуляцией добротности и синхронизацией мод.

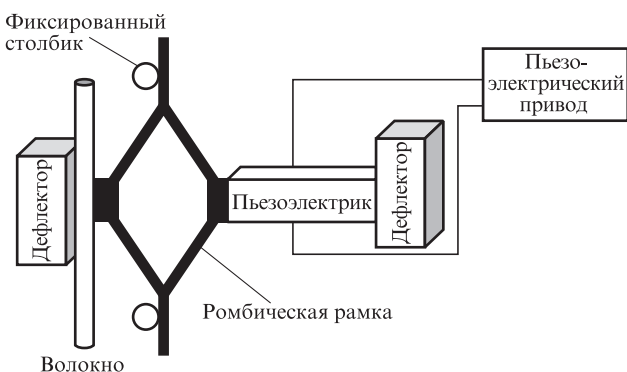


Рис.2. Схема модуляции добротности волоконного лазера с использованием пьезоэлектрика.

растяжение до 11 мкм. За исключением активного волокна, все оставшиеся пассивные волокна изготовлены из SMF-28.

Схема модуляции добротности показана на рис.2. Перед началом работы пьезоэлектрика сжимаемый сегмент волокна SMF-28 поляризован, но ориентация его поляризации отличается от ориентации поляризации излучения лазера с синхронизацией мод, поэтому сегмент сжимаемого волокна вносит высокие потери и волоконный лазер не генерирует. При быстром удлинении пьезоэлектрика сжимаемый сегмент волокна SMF-28 восстанавливает первоначальную форму, потери исчезают и волоконный лазер излучает гигантский импульс.

3. Результаты экспериментов

Для самостарта лазера в режиме синхронизации мод требуется точная настройка двух поляризационных контроллеров. Цуг выходных импульсов самостартующего волоконного лазера с синхронизацией мод показан на рис.3. Импульсы в цуге имеют частоту следования 11.96 МГц при длительности отдельного импульса 7.4 нс. Частота их следования определяется временем полного обхода кольцевого резонатора лазера. Большая (7.4 нс) длительность импульса частично обусловлена вкладом относительно медленного InGaAs-детектора с относительно низкой скоростью отклика (100 МГц). Выходной лазерный спектр, измеренный лазерным волномером Co. EXFO 1500, показан на рис.4. Ширина спектра лазера составляет около 0.1 нм. Центральную длину волны лазера определяет SMS-фильтр. При мощности накачки 150 мВт на 973 нм средняя выходная мощность волокон-

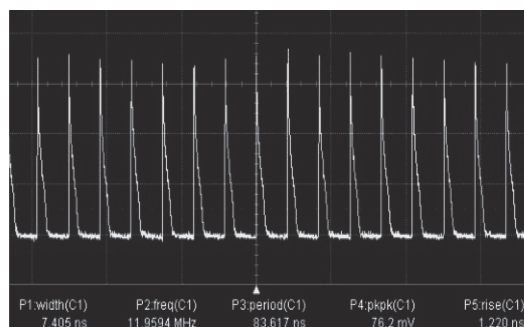


Рис.3. Последовательность выходных импульсов лазера на волокне, легированном Er³⁺, с синхронизацией мод.

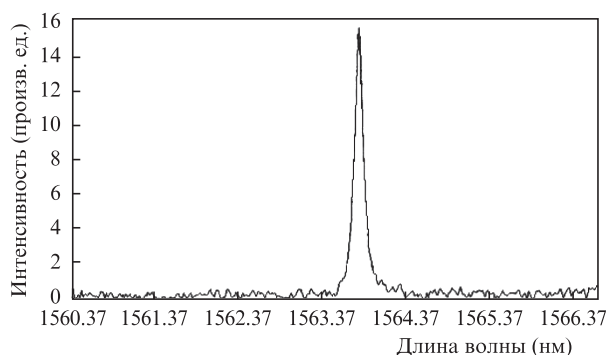


Рис.4. Выходной спектр лазера на волокне, легированном Er³⁺, с синхронизацией мод и использованием SMS-фильтра.

ного лазера с синхронизацией мод составляет около 2.1 мВт, так что энергия одиночного импульса должна быть равна 0.18 нДж. Относительно низкая эффективность обусловлена высокими потерями в SMS-фильтре.

Последовательность импульсов лазера в режиме модуляции добротности в результате быстрого отклика пьезо-

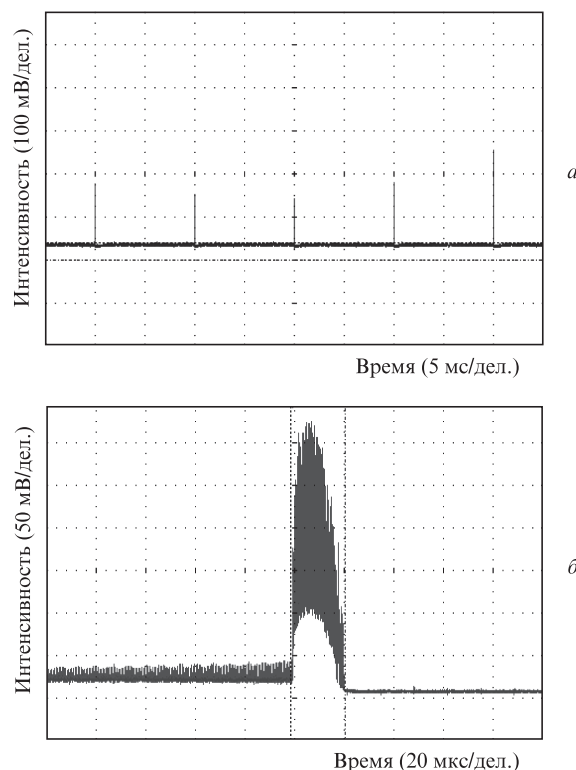


Рис.5. Последовательность импульсов волоконного QML-лазера (а) и форма импульса генерируемого им излучения (б).

электрика показана на рис.5,а. Полная ширина импульса чуть меньше 15 мкс (рис.5,б), и каждый импульс с модуляцией добротности содержит несколько десятков пиков с синхронизацией мод. Частота следования импульсов при модуляции добротности составляет всего 100 Гц, и на этой частоте последовательность выходных импульсов имеет относительно стабильную амплитуду. Средняя выходная мощность при модуляции добротности составляет 1.5 мВт. Таким образом, энергия импульса с модуляцией добротности равна 15 мДж. Если предположить, что пики с синхронизованными модами в импульсе с модулированной добротностью совпадают, энергия одиночного пика должна составлять 64–68 нДж при доле мощности между импульсами 20%–25%. Во время QML-импульса средний пикок с синхронизованными модами имеет гораздо более высокую энергию, чем крайние пики.

4. Заключение

В статье демонстрируется полностью волоконный QML-лазер на волокне, легированном Er^{3+} . Метод синхронизации мод путем нелинейного вращения поляризации, метод модуляции добротности за счет пьезоэлектрического нажатия и фильтр на базе SMS-структуры реализованы в последовательно расположенных полностью волоконных элементах, что делает такой волоконный лазер простым, компактным и дешевым. В результате модуляции добротности энергия импульса с синхронизованными модами увеличивается почти в 350 раз, а частота следования импульсов уменьшается. Поскольку наша лаборатория не имеет анализатора автокорреляционной

функции на длину волны 1.5 мкм, длительность импульса была измерена InGaAs-детектором. В результате реальная длительность импульса может быть равна измеренной или быть меньше нее. Волновой профиль импульса с синхронизованными модами при модуляции добротности похож на цуг коротких импульсов. Если путем увеличения длины кольцевого резонатора снизить частоту следования импульсов при синхронизации мод до 100 кГц [3], можно осуществить вывод одиночного импульса, используя конфигурацию этого волоконного QML-лазера.

Работа поддержана «Фондами фундаментальных исследований Центральных университетов» (грант № НИТ. KLOF.2010034).

1. Zhao L.M., Tang D.Y., Wu J. *Opt. Lett.*, **31** (12), 1788 (2004).
2. Wang L.R., Liu X.M., Gong Y.K., et al. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 376 (2011).
3. Denisov V.I., Nyushkov B.N., Pivtsov V.S. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7580**, 75802U (2010).
4. Liu X.M. *Opt. Express*, **17**, 9549 (2009).
5. Wu X., Tang D.Y., Zhang H., et al. *Opt. Express*, **17**, 5580 (2009).
6. Chandonnet L., Larose G. *Opt. Eng.*, **32**, 2031 (1993).
7. Pérez-Millán P., Díez A., Andrés M.V., et al. *Opt. Express*, **13**, 5046 (2005).
8. Geng J.H., Wang Q., Smith J., et al. *Opt. Lett.*, **34**, 3713 (2009).
9. Cuadrado-Laborde Ch., Díez A., Cruz J.L., et al. *Opt. Lett.*, **34**, 2709 (2009).
10. Cuadrado-Laborde C., Díez A., Cruz J.L., et al. *Laser Phys. Lett.*, **7**, 870 (2010).
11. Mohammed W.S., Smith P., Gu X.J. *Opt. Lett.*, **31**, 2547 (2006).
12. Wang Q., Farrell G., Yan W. *J. Lightwave Technol.*, **26**, 512 (2008).
13. Walbaum T., Fallnich C. *Opt. Lett.*, **36**, 2459 (2011).
14. Castillo-Guzman A., Antonio-Lopez J.E., Selvas-Aguilar R., et al. *Opt. Express*, **18**, 591 (2010).