

Масштабирование мощности тулиевых волоконных лазеров с использованием полностью волоконного композитного резонатора в конфигурации майкельсоновского типа*

Чжу Ядун, Чжоу Пху, Тхао Жумао, Ван Сяолин, Го Шаофэн, Сю Сяодзюнь

Успешно запущен полностью волоконный тулиевый лазер мощностью 4 Вт, использующий композитный резонатор с центральной длиной волны 1952.02 нм. Резонатор состоит из двух интерферометрических лазерных плеч, которые эффективно объединены. Каждое плечо содержит одно работающее в непрерывном режиме легированное тулием кварцевое волокно с двойной оболочкой и накачкой лазерными диодами ($\lambda_p = 783$ нм) с волоконными выводами. Получены высокая эффективность объединения 93.9% и узкая ширина линии 0.1 нм. Выходная мощность лазера может быть масштабирована за счет повышения мощности накачки и оптимизации параметров компонентов на длине волны 2 мкм.

Ключевые слова: легированное тулием волокно, полностью волоконные лазеры, когерентное объединение лазеров, конфигурация майкельсоновского типа.

1. Введение

Лазер на волокне, легированном тулием, (ТВЛ) – одно из важнейших последних достижений в технологиях мощных волоконных лазеров из-за его широких применений в станках, лидарах, для обработки материалов и нелинейного преобразования частоты в области длин волн среднего ИК диапазона [1–4]. Однако из проведенного в работе [5] анализа масштабирования мощности следует, что существует максимальная извлекаемая мощность, ограниченная наличием тепловых эффектов, оптического повреждения, конечной яркости накачки и нелинейных эффектов (см. также [6]).

Когерентное объединение лазеров является решением, которое может увеличить выходную мощность и не ухудшить качество пучка. Эффективным методом когерентного объединения пучков является использование композитного резонатора в конфигурации майкельсоновского типа. Для этой конфигурации было предложено несколько подходов и продемонстрированы надежные массивы когерентно-объединенных волоконных лазеров с легированием Yb и Er [7–9]. На сегодняшний день исследования в области волоконных лазеров высокой мощности и технологий их когерентного объединения сосредоточены главным образом на легированных Yb волокнах, работающих в области 1 мкм, из-за их низкой дефектности и доступности источников накачки высокой яркости. Этот же подход был реализован в лазерах на волокнах, легированных Er, излучающих в окрестности 1.5 мкм [10, 11].

Наша задача заключается в изучении возможности создания ТВЛ-системы высокой мощности с применением

технологии композитного резонатора, что можно объяснить двумя причинами. Во-первых, двухмикронные волоконные лазерные системы высокой мощности привлекательны из-за более безопасных для глаз длин волн, что позволяет передавать на несколько порядков большую мощность, чем в случае 1 мкм. Кроме того, было отмечено свойство излучения ТВЛ отлично проходить через турбулентную атмосферу [12]. Во-вторых, ТВЛ из-за большей длины волны должны иметь более высокий порог ВРМБ, чем у лазеров на волокне, легированном Yb [4, 13], что позволяет лучше масштабировать мощность одиночного волоконного лазера. Из-за растущей потребности в ТВЛ высокой яркости для многих приложений использование композитного резонатора является ключевой технологией, заслуживающей быть исследованной.

Ранее сообщалось о нескольких исследованиях по использованию активного и пассивного объединения когерентных пучков нескольких ТВЛ, в которых выходная мощность была на милливаттном уровне [14]. В настоящей работе продемонстрировано полностью волоконное эффективное объединение двух ТВЛ высокой мощности с помощью композитного резонатора. Получена выходная мощность когерентного излучения 4 Вт при эффективности когерентного объединения 93.9%.

2. Результаты эксперимента

Схема ТВЛ с композитным резонатором в конфигурации майкельсоновского типа показана на рис.1. Каждое плечо резонатора ТВЛ накачивается с торца лазерными диодами (ЛД) с волоконным выходом и центральной длиной волны 793 нм. Каждый генератор состоит из отрезка волокна с двойной оболочкой, легированного Tm, лазерного диода ($\lambda = 793$ нм) с выводом излучения через 105-мкм волокно и волоконной брэгговской решетки, ВБР (HR), с коэффициентом отражения 99.5% и центральной длиной волны 1950 нм. Диаметр сердцевинки легированного Tm волокна составляет 10 мкм ($NA = 0.15$); сердцевина окружена внутренней гексагональной оболочкой диаметром 130 мкм ($NA = 0.46$), коэффициент поглощения которой на 793 нм равен 3 дБ/м. В одно из плеч

* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

Yadong Zhu, Pu Zhou, Rumao Tao, Xiaolin Wang, Shaofeng Guo, Xiaojun Xu. College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; e-mail: zhuyadong_2011@163.com

Поступила в редакцию 21 декабря 2012 г., после доработки – 25 апреля 2013 г.

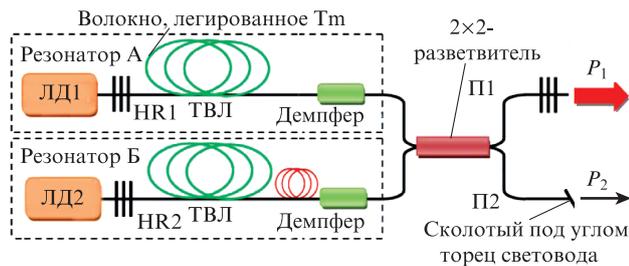


Рис.1. Конфигурация лазера на волокне, легированном тулием, с использованием композитного резонатора.

вставлялось пассивное волокно длиной несколько метров для предотвращения интерференционных неустойчивостей. Кроме того, каждый лазерный резонатор включал отрезок пассивного волокна длиной, достаточной для обеспечения демпфирования излучения накачки. Два плеча активного интерферометра являются двумя независимыми волоконными лазерами, соединенными с одномодовым 2×2 -разветвителем (50:50), который выполняет когерентное сложение полей. Выходные порты резонаторов А и Б сращены сплавлением с двумя входными портами разветвителя. Один выходной порт разветвителя соединен с ВБР (ОС) с коэффициентом отражения 10% и центральной длиной волны 1950 нм для создания выходного порта когерентного объединения (порт П1), а выходное волокно другого порта (П2) сколото под углом так, чтобы обеспечить достаточную дискриминацию потерь между двумя выходными портами. Система охлаждается за счет теплопроводности с отводом тепла посредством металлической пластины.

Измерения выходной мощности показали, что при независимой генерации волоконных лазеров максимальные выходные мощности плеча А (P_A) и плеча Б (P_B) из порта П1 составили 1.13 и 1.21 Вт соответственно. Некогерентная сумма мощностей определяется как сумма выходных мощностей из порта П1 двух ТВЛ, работающих независимо. Экспериментальные данные и их аппроксимация полиномиальной кривой показаны на рис.2.

При соединении резонаторов ТВЛ разветвителем, который создает схему объединения, и несинхронизованной совместной работе [15] обнаружено, что более высокая мощность всегда излучается из порта П1, который имеет низкие потери. При включении обоих лазеров накачки максимальная выходная мощность P_1 в случае ко-

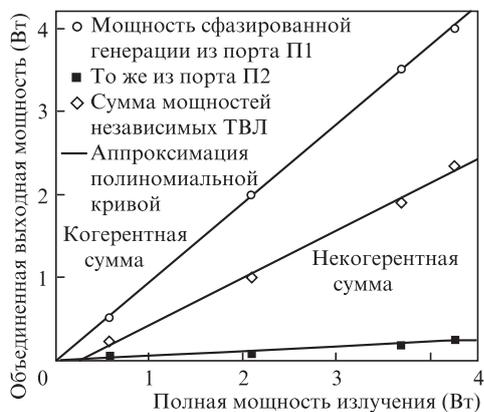


Рис.2. Зависимость выходной мощности лазера от полной введенной мощности накачки.

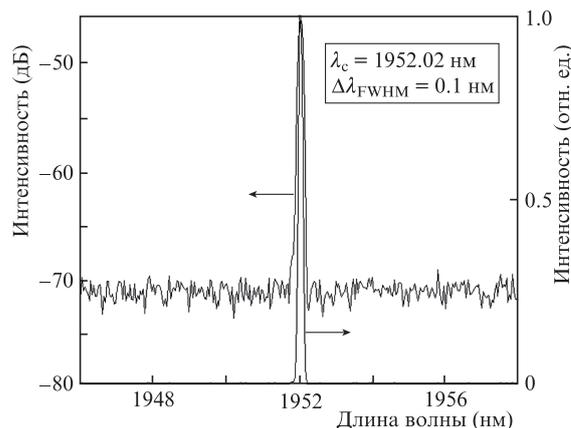


Рис.3. Спектр излучения из порта П1 с дифракционной решеткой.

герентного объединения составляет 4 Вт. На рис.2 также показана выходная мощность P_2 из волоконного порта П2, сколото под углом. Из вида аппроксимирующих кривых для когерентной и некогерентной сумм следует, что когерентное объединение позволяет снизить порог возбуждения резонаторов ТВЛ.

Для оценки эффективности объединения [11] введем параметр добротности, определяемый как $\eta = P_1/(P_1 + P_2) \times 100\%$. Эффективность объединения при максимальном токе накачки составила 93.9%.

Спектр излучения, выходящего из порта П1 с дифракционной решеткой при когерентном объединении, измеренный анализатором оптического спектра, показан на рис.3. Установлено, что и эффективность объединения, и оптический спектр устойчивы. Центральная длина волны $\lambda_c = 1952.02$ нм при ширине линии 0.1 нм. Важно отметить необходимость уменьшения тепловых потерь посредством улучшения теплопроводности разветвителя.

Итак, успешно построен полностью волоконный эффективный лазер на легированном тулием волокне с когерентным объединением. Достигнуто устойчивое когерентное объединение с эффективностью 93.9%. Следует отметить, что полученная выходная мощность существенно меньше, чем у лазеров на $\lambda = 1$ мкм, однако возможно дальнейшее масштабирование мощности матрицы тулиевых волоконных лазеров с когерентным объединением за счет использования оптимизированного источника накачки, волокон с большой площадью моды, разветвителей на основе таких же волокон и кратного числа ТВЛ.

- Geng J., Wang Q., Luo T., Jiang S., et al. *Opt. Lett.*, **34**, 3493 (2009).
- Zhang Y.J., Wang W., et al. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 723 (2009).
- Meleshkevich M., Platonov N., et al. *Proc. Eur. Conf. Lasers Electro-Opt.* (2007), doi: 10.1109/CLEOE-IQEC.2007.4386516.
- Ehrenreich T. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7850**, 7850-16 (2010).
- Dawson J.W., Messerly M.J., Heebner J.E., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7686**, 768611-1 (2010).
- Zhu J.J., Du W.B., Zhou P., et al. *Acta Phys. Sin.*, **61**, 064209 (2011).
- Kozlov V.A., Hernandez-Cordero J., et al. *Opt. Lett.*, **24**, 1814 (1999).
- Shiralawa A., Saitou T., et al. *Opt. Express*, **10**, 1167 (2002).
- Wang B.S., Mies E., Minden M., Sanchez A. *Opt. Lett.*, **34**, 863 (2009).
- Sabourdy D., Kermene V., et al. *Electron. Lett.*, **38**, 692 (2002).
- Sabourdy D., Kermene V., et al. *Opt. Express*, **11**, 87 (2003).
- McComb T., Shah L., Sims R.A., et al. *Proc. CLEOE/IQEC* (Washington: OSA, 2009, paper CThRS).
- Moulton P.F. *SPRC Ann. Symp.* (2008); <http://www.qpeak.com>.
- Zhou P., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7843**, 784307-1 (2010).
- Shirakawa A., Saitou T., et al. *Opt. Express*, **10**, 1167 (2002).