

УДК 681.7.068

А.А. Колегов¹, А.А. Абакшин^{1,2}, А.В. Горбачев^{1,2}, Д.А. Фролов^{1,2}¹ ООО «Нордлэйз», Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

НЕПРЕРЫВНЫЙ ИТТЕРБИЕВЫЙ ОДНОМОДОВЫЙ ЛАЗЕР С МОЩНОСТЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ 1500 Вт

В работе представлены результаты разработки и создания одномодового оптоволоконного лазера с высоким качеством излучения и мощностью 1500 Вт. Показаны перспективы дальнейшего увеличения мощности без ухудшения качества излучения.

Ключевые слова: волоконные лазеры, мощные лазеры, иттербиевые лазеры, одномодовые лазеры.

A.A. Kolegov¹, A.A. Abakshin^{1,2}, A.V. Gorbachev^{1,2}, D.A. Frolov^{1,2}¹Nordlase, Saint Petersburg, Russian Federation²Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russian Federation

1500 W YTTERBIUM-DOPED SINGLE MODE CW FIBER LASER

This paper presents the results of the development and creation of a single mode fiber laser with high beam quality and a power of 1500 W. The prospects for further increasing the power without degradation the quality of the beam are shown.

Keyword: fiber lasers, high power lasers, ytterbium lasers, single mode lasers.

Введение

В настоящее время одномодовые волоконные лазеры мощностью более 1 кВт стали очень востребованными во многих отраслях промышленности (металлообработка, аддитивные технологии, объединение излучения и др.). Во многом это стало возможным благодаря их преимуществам: компактность, высокий КПД и др. Одномодовые волоконные лазеры с качеством пучка $M^2 < 1,3$ мощностью более 500 Вт попадают под санкции и ввести их в Россию не представляется возможным, а производства таких лазеров в России нет. Поэтому разработка и производство отечественного одномодового волоконного лазера мощностью 1,5 кВт и более являются актуальной задачей.

Настоящая работа посвящена разработке и созданию одномодового оптоволоконного лазера с высоким качеством излучения и мощностью 1500 Вт, который может использоваться как самостоятельно, так и в составе различных лазерных комплексов и систем.

Экспериментальная часть

Как известно, с наращиванием выходной мощности излучения в волокне могут проявляться нелинейные эффекты, пороги возникновения которых зависят от длины волокна и диаметра сердцевины [1]. Лучшее сочетание диаметра сердцевины волокна и его числовой апертуры, обеспечивающее параметр $M^2 < 1,3$ (можно считать близким к дифракционному) и выходную мощность 2–3 кВт [2–4], – 20 мкм с числовой апертурой $NA = 0,06$.

В основном на ограничение выходной мощности волоконного лазера оказывают влияние следующие факторы:

- совокупность термальных и нелинейных эффектов;
- оптический пробой;
- яркость диодов накачки;
- модовая нестабильность (ТМН), проявление которых зависит от диаметра сердцевины и длины используемого волокна.

Сердцевина диаметром 20 мкм с числовой апертурой $NA = 0,06$ дает лучшее сочетание, обеспечивающее параметр $M^2 < 1,3$ (можно считать близким к дифракционному) и выходную мощность 2–3 кВт. Пороговую мощность оптического пробоя для такого волокна можно оценить по формуле [1]:

$$P_{\text{out}}^{\text{damage}} = I_{\text{damage}} \pi a^2, \quad (1)$$

где a – радиус поля моды, I_{damage} – пороговая интенсивность, и при $I_{\text{damage}} \approx 13 \text{ Вт/мкм}^2$ [5] пороговая мощность составит $\approx 4000 \text{ Вт}$. Таким образом, имеется возможность получить одномодовое излучение в полностью волоконной схеме мощностью до 4 кВт. Тем не менее исследований по определению пороговой интенсивности пробоя кварца для непрерывного излучения не проводилось, и вопрос остается открытым.

В случае распространения излучения с широким спектром среди нелинейных эффектов самый низкий порог возникновения будет иметь

вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), пороговую мощность которого можно оценить по формуле [1]:

$$P_{\text{out}}^{\text{srs}} = \frac{25\pi a^2}{g_R L}, \quad (2)$$

где L – длина оптического тракта, $g_R = 10^{-13}$ м/Вт [6].

В соответствии с формулой (2) на рис. 1 представлены графики пороговой мощности ВКР в зависимости от длины волокна для разных диаметров поля моды.

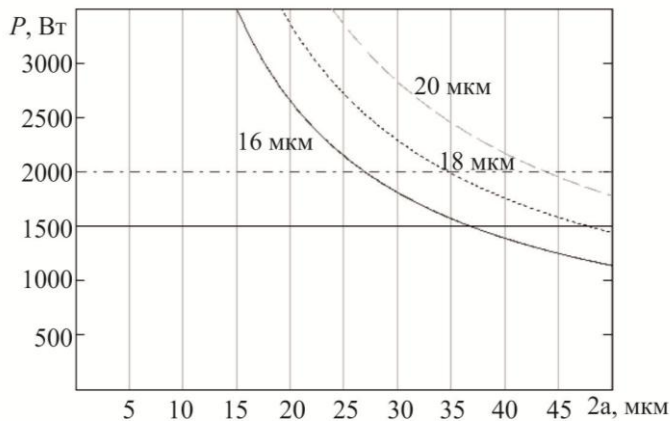


Рис. 1. Пороговая мощность ВКР

Из рис. 1 видно, что длина оптического тракта волокна с диаметром поля моды 18 мкм для достижения мощности 1500 Вт не должна превышать примерно 47 м.

Модовая нестабильность проявляется в перекачке энергии из основной моды в высшие и может приводить к флуктуациям выходной мощности и ухудшению качества излучения, что связано с наведенными изменениями показателя преломления волокна.

Как показали исследования [7], модовая нестабильность возникает при средней тепловой нагрузке $Q = 34$ Вт/м. Таким образом, необходимо обеспечить условия генерации лазерного излучения с меньшей тепловой нагрузкой. Здесь ключевыми факторами являются коэффициент поглощения и квантовый дефект. На рис. 2 показаны распределение излучения накачки по длине волокна, поглощенная

часть излучения накачки и тепловая нагрузка, связанная с квантовым дефектом.

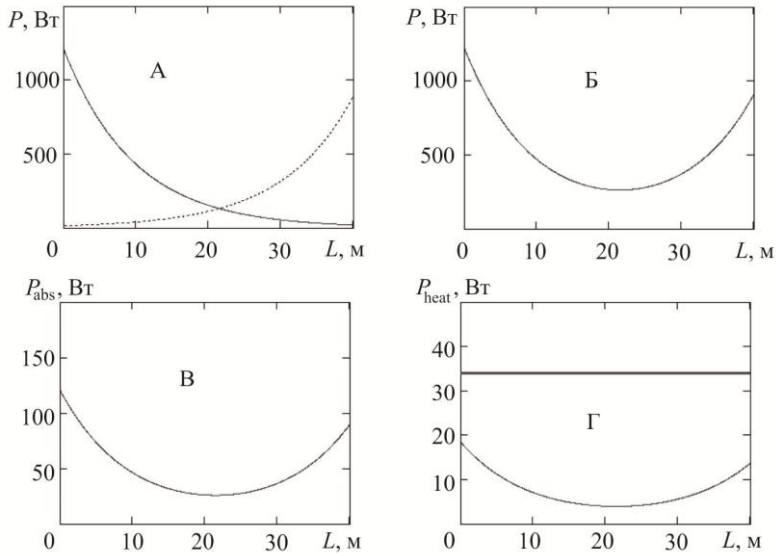


Рис. 2. Распределение излучения накачки по длине волокна (А, Б), распределение поглощенного излучения накачки по длине волокна (В), тепловая нагрузка, вызванная квантовым дефектом (Г)

В соответствии с полученными результатами средняя тепловая нагрузка не превысила 9 Вт/м, что позволяет в дальнейшем увеличить мощность лазера до предельной величины тепловой нагрузки 32 Вт/м.

Схема лазера представлена на рис. 3, она проста и принципиально не отличается от известных в мире [2–4].

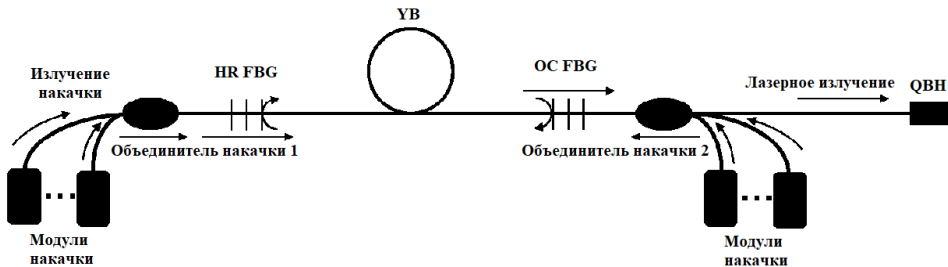


Рис. 3. Схема лазера: HR FBG – глухая волоконная брегговская решетка; OC FBG – выходная волоконная брегговская решетка; УВ – активное иттербиевое волокно; QBH – волоконный кабель с оптическим коннектором типа QBH

Специально подобранные компоненты с минимальными потерями обеспечивают высокую эффективность и надежность лазера. Накачка активного волокна осуществляется с двух сторон лазерными диодными модулями в количестве 7 шт с длиной волны 915 нм и максимальной выходной мощностью 370 Вт. Такой способ накачки распределяет тепловую нагрузку по волокну и существенно снижает нагрузку с мест сварок и оптоволоконных компонентов. Резонатор лазера образован парой волоконных брегговских решеток производства AFR, поддерживающей излучение сигнала до 3 кВт и излучение накачки до 1,5 кВт. Активное иттербиевое волокно имеет диаметр сердцевины 19,5 мкм и числовую апертуру $NA = 0,065$. Поглощение излучения в активном волокне на длине волны 915 нм составляет 0,39 дБ/м. Длина активного волокна в резонаторе составила 35 м. Излучение накачки в активное волокно вводится с помощью объединителей накачки Lightcomm типа (6+1)x1. Со стороны глухой решетки HR FBG вводится примерно 1200 Вт излучения накачки (использовано 4 диодных модуля), а со стороны выходной решетки ОС FBG – примерно 900 Вт (использовано 3 диодных модуля). Вывод излучения обеспечивается кабелем длиной 7 м с оптическим разъемом типа QBH.

Особую роль в создании мощного волоконного лазера играет эффективный теплоотвод. Так, для отвода тепла в разработанном лазере используются специальные водоохлаждаемые алюминиевые плиты. Для отвода тепла от активного волокна последние размещаются в V-канавках, как показано на рис. 4, и заливаются специальным теплоотводящим компаундом для фиксации и обеспечения теплового контакта между волокном и теплоотводящей поверхностью.

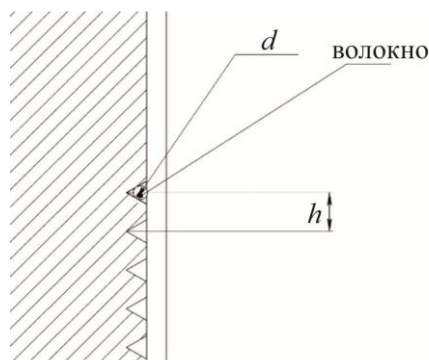


Рис. 4. Укладка активного волокна: d – диаметр волокна;
 h – шаг между канавками

Полученные результаты и их анализ

На рис. 5 представлена зависимость выходной мощности лазерного излучения от мощности излучения накачки. Видно, что эффективность «свет в свет» составляет примерно 70 %. Также на рис. 5 представлен профиль пучка, коэффициент распространения $M^2 < 1,3$. Флуктуации мощности составляют не более 1 %, заметных флуктуаций профиля пучка не обнаружено, что свидетельствует о низком уровне ТМІ.

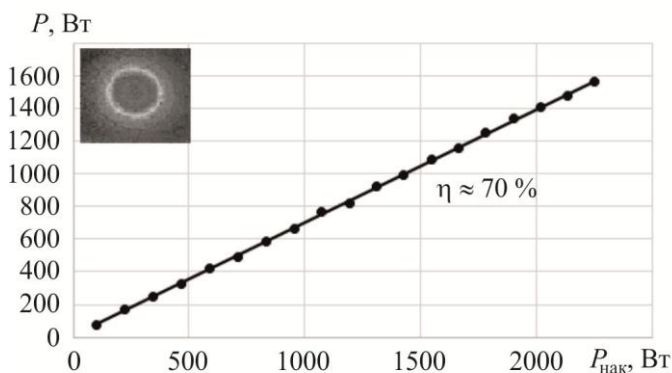


Рис. 5. Зависимость выходной мощности излучения от мощности излучения накачки

Спектр выходного излучения для разной мощности представлен на рис. 6. Из рис. 6 видно, что с увеличением мощности спектр уширяется. Ширина спектра на полувысоте для 1500 Вт составляет примерно 3 нм, для 500 Вт – примерно 1 нм, для 100 Вт – 0,6 нм.

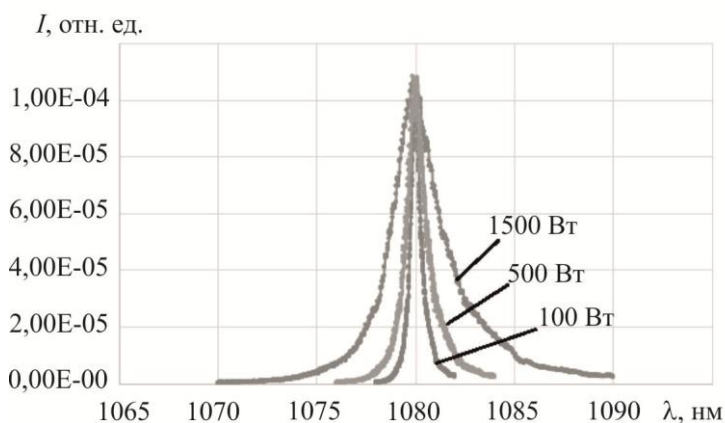


Рис. 6. Спектр выходного излучения

Заключение

В ходе работы была разработана высокоэффективная конструкция системы охлаждения, позволяющая эффективно отводить тепло от компонентов лазера, в свою очередь, активное волокно укладывается в V-канавку с теплопроводящим материалом.

В результате работ достигнута мощность 1500 Вт с эффективностью «свет в свет» 70 % и коэффициентом распространения не $M^2 < 1,3$. Ширина спектра на максимальной мощности составила 3 нм. Проявления ТМІ не обнаружено.

Разработанная конструкция позволяет обеспечить мощность выходного излучения до 2 кВт добавлением модулей накачки с использованием той же компонентной базы. Применение специальных методик по фильтрации мод высшего порядка позволяет достичь мощности излучения до 4–5 кВт с M^2 не хуже 1,3 [8, 9], что является предметом следующей разработки.

Список литературы

1. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power / J. Dawson [et al.] // *Opt. Express.* – 2008. – Vol. 16. – P. 13240–13266.
2. 3 kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for highly reflective and highly thermal conductive materials processing / S. Ikoma [et al.] // *Proc. SPIE.* – 2017. – Vol. 10083. – P. 100830Y.
3. Zhang F., Zhang X. 2 kW single-mode fiber laser employing bidirectional-pump scheme // *Opto-Electronic Engineering.* – 2017. – Vol. 44. – P. 953–956.
4. 2 kW single-mode fiber laser with 20-m long delivery fiber and high SRS suppression / Y. Mashiko [et al.] // *Proc. of SPIE.* – 2016. – Vol. 9728. – P. 972805.
5. 2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction limited brightness / V. Gapontsev, D. Gapontsev, N. Platonov [et al.] // *Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (Optical Society of America, 2005)* (Note: Used 14 μ m MFD fiber implying 13W/ μ m² power handling capability without damage).
6. Smith A., Do B., Soderlund M. Deterministic nanosecond laser-induced breakdown thresholds in pure and Yb³⁺ doped fused silica // *Proc. SPIE.* – 2007. – Vol. 6453. – P. 645317.

7. Optimizing high-power Yb-doped fiber amplifier systems in the presence of transverse mode instabilities / C. Jauregui, H. Otto, S. Breitkopf, J. Limpert, A. Tünnermann // *Opt. Express.* – 2018. – Vol. 24. – P. 7879–7892.

8. Single mode 4.3 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier / F. Beier [et al.] // *OPTICS EXPRESS.* – 2017. – Vol. 25. – P. 14892–14899.

9. 5-kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing / K. Shima [et al.] // *Proc. of SPIE.* – 2018. – Vol. 10512. – P. 105120C.

References

1. Dawson J., et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power // *Opt. Express.*, 2008, 16, p. 13240-13266.

2. Ikoma S., et al. 3 kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for highly reflective and highly thermal conductive materials processing // *Proc. SPIE*, 2017, 10083, p. 100830Y.

3. Zhang F., Zhang X. 2 kW single-mode fiber laser employing bidirectional-pump scheme // *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44, p. 953-956.

4. Mashiko Y., et al. 2 kW single-mode fiber laser with 20-m long delivery fiber and high SRS suppression // *Proc. of SPIE*, 2016, 9728, p. 972805.

5. Gapontsev V., Gapontsev D., Platonov N., et al. 2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction limited brightness // *Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics Europe*, (Optical Society of America, 2005) (Note: Used 14 μ m MFD fiber implying 13W/ μ m² power handling capability without damage).

6. Smith A., Do B., Soderlund M. Deterministic nanosecond laser-induced breakdown thresholds in pure and Yb³⁺ doped fused silica // *Proc. SPIE*, 2007, 6453, P. 645317.

7. Jauregui C., Otto H., Breitkopf S., Limpert J., Tünnermann A. Optimizing high-power Yb-doped fiber amplifier systems in the presence of transverse mode instabilities // *Opt. Express*, 2018, 24, p. 7879-7892.

8. Beier F., et al. Single mode 4.3 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier // *OPTICS EXPRESS*, 2017, 25, p. 14892-14899.

9. Shima K., et al, 5-kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing // *Proc. of SPIE*, 2018, 10512, p. 105120C.