

09 Лазерный модуль с волоконным выводом излучения яркостью более 10 MW/(cm²·sr)

© А.В. Фомин, С.Р. Усманов, А.Н. Игнатьев, Е.В. Кадигроб

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е.И. Забабахина, 456770 Снежинск, Челябинская обл., Россия
e-mail: dep5@vniitf.ru

Поступило в Редакцию 1 декабря 2021 г.
В окончательной редакции 18 января 2022 г.
Принято к публикации 19 января 2022 г.

Разработаны и изготовлены лазерные модули спектрального диапазона 975 nm на основе одиночных лазерных диодов с волоконным выводом излучения. Осуществлен монтаж оптической системы для ввода излучения семи лазерных диодов в кварц-кварцевое волокно с диаметром сердцевины 105 μm и числовой апертурой 0.15. Исследованы их мощностные и спектральные характеристики. Максимальная выходная мощность излучения лазерного модуля составила 65 W в непрерывном режиме работы при номинальном токе 12 A и температуре термостабилизации 25°C, полный КПД лазерного модуля составил 43%, яркость лазерного модуля — 10.6 MW/(cm²·sr).

Ключевые слова: лазерный модуль, оптическая система, лазерные диоды, волоконные лазеры.

DOI: 10.21883/JTF.2022.04.52250.305-21

Введение

Лазерные модули (ЛМ) с волоконным выводом излучения на основе одиночных лазерных диодов (ЛД) являются традиционным источником излучения накачки мощных волоконных лазеров [1–3]. Растущий рынок волоконных лазеров требует постоянного совершенствования параметров ЛМ, к наиболее важным из которых относят мощность излучения, яркость, полный КПД, ширину спектра излучения, ресурс работы. Для увеличения выходной мощности ЛМ используются схемы пространственного, поляризационного и спектрального сложения излучения ЛД [4]. При этом наибольшее распространение получили схемы пространственного и комбинированного (пространственного с поляризационным) объединения излучения.

Среди коммерчески доступных изделий с пространственным объединением излучения ЛД можно выделить ЛМ производства фирмы IPG Photonics (США) с введением в оптическое волокно с апертурой 0.13 излучения шести ЛД [5] и BWT Beijing (Китай) с введением в оптическое волокно с апертурой 0.22 излучения семи ЛД [6]. Поскольку дополнительное увеличение мощности накачки в системах мульткиловаттных волоконных лазеров может быть достигнуто за счет объединения излучения нескольких ЛМ с помощью промежуточных волоконных объединителей (каплеров), для ряда применений является критическим условие использования в ЛМ выходного волокна с меньшей числовой апертурой. В настоящей работе представлены результаты разработки ЛМ с пространственным объединением излучения семи ЛД и последующим вводом в кварцевое волокно с диаметром сердцевины 105 μm и числовой апертурой 0.15.

1. Оптическая схема ЛМ

При разработке конструкции ЛМ была применена оптическая схема, основанная на пространственном объединении излучения одиночных ЛД, расположенных с вертикальным шагом друг относительно друга с последующей фокусировкой объединенного пучка на торец приемного волокна (рис. 1).

Характеристики ЛД, используемых в составе ЛМ, приведены в табл. 1.

Ввиду существенного различия угловой расходимости излучения ЛД в двух взаимно перпендикулярных направлениях, для компенсации расходимости в каждой из плоскостей требуется использование отдельной линзы. Для компенсации расходимости излучения ЛД по быстрой оси (в плоскости, перпендикулярной *p–n*-переходу) использовались асферические *D*-образные микролинзы с фокусным расстоянием ~ 0.32 mm, обеспечивающие, согласно паспортным данным, распространение не ме-

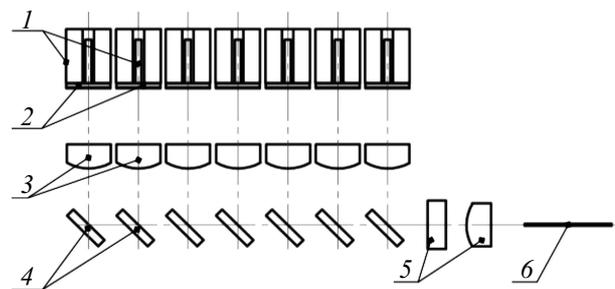


Рис. 1. Оптическая схема ЛМ: 1 — ЛД, 2 — асферические микролинзы, 3 — цилиндрические линзы, 4 — поворотные зеркала, 5 — фокусирующие линзы, 6 — оптическое волокно.

Таблица 1. Характеристики ЛД

| Параметр | Значение |
|--|----------|
| Длина волны, nm | 975 |
| Ширина эмиттера, μm | 90 |
| Расходимость излучения по медленной оси по уровню 95% ($I = 12 \text{ A}$, $T = 25^\circ\text{C}$), deg | 5.25 |
| Расходимость излучения по быстрой оси по уровню 95% ($I = 12 \text{ A}$, $T = 25^\circ\text{C}$), deg | 29 |
| Мощность лазерного излучения ($I = 12 \text{ A}$), W | 12 |

Таблица 2. Параметры излучения ЛД после прохождения поворотных зеркал (по уровню 95%)

| Параметр | Обозначение | Значение |
|--|---------------|----------|
| Расходимость излучения по быстрой оси (по уровню 92%), deg | θ_{fa} | 0.13 |
| Расходимость излучения по медленной оси, deg | θ_{sa} | 0.37 |
| Ширина пучка по быстрой оси, mm | ω_{fa} | 0.33 |
| Ширина пучка по медленной оси, mm | ω_{sa} | 1.3 |

нее 92% мощности ЛД в пределах угла $\pm 0.13^\circ$. Для компенсации расходимости излучения по медленной оси (в плоскости, параллельной p - n -переходу) использовались цилиндрические линзы с фокусным расстоянием 7 mm, общий параллельный пучок формировался путем отражения от разновысотных установленных поворотных зеркал. Расчетные параметры излучения при отражении от поворотных зеркал приведены в табл. 2.

Максимальное количество ЛД, излучение которых может быть с высокой эффективностью введено в волокно, определяется выражением [7]:

$$N = \frac{D_f \theta_f}{2D_{fa,sa} \theta_{fa,sa}} \gamma_{fa,sa}, \quad (1)$$

где D_f — диаметр волокна, θ_f — числовая апертура волокна, $D_{fa,sa}$ — диаметр перетяжки лазерного пучка по быстрой и медленной осям, $\theta_{fa,sa}$ — расходимость излучения по быстрой и медленной осям, $\gamma_{fa,sa}$ — коэффициент заполнения.

Подставляя в выражение (1) данные табл. 2, получаем подтверждение, что эффективное введение излучения нескольких ЛД в выбранной оптической схеме ЛМ возможно за счет объединения излучения ЛД только в направлении быстрой оси. Очевидно, что максимальная мощность излучения ЛМ может быть достигнута за счет минимизации вертикального шага между ЛД, однако при этом ограничивающим фактором является возможное „срезание“ излучения соседних ЛД поворотными зеркалами, что учитывается коэффициентом заполнения γ_{fa} (всегда меньше единицы). Поскольку погрешности

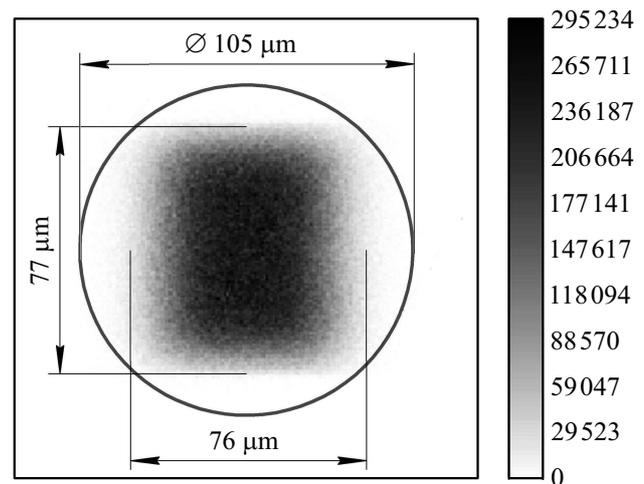


Рис. 2. Распределение интенсивности лазерного излучения на торце приемного волокна.

монтажа D -образных микролинз всегда связаны с увеличением расходимости лазерного излучения и отклонения направления распространения лазерных пучков от горизонтали, значение разновысотности соседних ЛД в рассматриваемом ЛМ было выбрано равным $450 \mu\text{m}$.

При выборе оптических элементов для фокусировки лазерного излучения на торец приемного волокна учитывались условия:

$$D_{fa,sa} \leq \frac{D_f}{\sqrt{2}},$$

$$\theta_{fa,sa} \leq \frac{\theta_f}{\sqrt{2}},$$

где $D_{fa,sa}$ — размер сфокусированного пучка по быстрой и медленной осям, $\theta_{fa,sa}$ — угол распространения сфокусированного излучения по быстрой и медленной осям. Знаменатель $\sqrt{2}$ учитывает несоответствие формы сфокусированного пучка (квадрат) форме сечения оптического волокна (окружность). С целью компенсации астигматизма излучения ЛД после прохождения поворотных зеркал фокусировка на торец приемного волокна осуществлялась с помощью двух цилиндрических линз для фокусировки по быстрой и медленной осям соответственно. Распределение интенсивности лазерного излучения на торце приемного волокна по результатам численного моделирования в программном комплексе Zemax приведено на рис. 2. Для снижения потерь при вводе лазерного излучения в волокно на его торец было дополнительно нанесено просветляющее покрытие.

2. Экспериментальные результаты

Изготовленный ЛМ был смонтирован в корпусе размерами $14.5 \times 28 \times 78 \text{ mm}$. Узел крепления оптического волокна был выполнен в виде пьедестала со сквозным

отверстием, являющимся частью теплопроводящего корпуса. Фиксация всех оптических элементов ЛМ осуществлялась на специальный УФ-отверждаемый клей с величиной линейной усадки менее 0.2%. На рис. 3 представлена взаимная ориентация пучков ЛД после прохождения линз для компенсации расходимости излучения по быстрой и медленной осям. Максимальная расходимость излучения по быстрой оси для всех ЛД не превысила значения 0.14° , максимальное взаимное отклонение лазерных пучков в горизонтальном направлении находилось в пределах $\pm 0.11^\circ$. Была измерена мощность излучения всех ЛД до и после монтажа поворотных зеркал, потери мощности излучения на поворотных зеркалах составили 5%.

Для измерения мощностных и спектральных характеристик изготовленный ЛМ был установлен на водоохлаждаемое основание, подсоединенное к системе охлаждения с заданной температурой воды 25°C . Измерение ватт-амперной характеристики осуществлялось с шагом 1 А до номинального значения тока накачки 12 А. На рис. 4 приведена ватт-амперная характеристика для одного из изготовленных ЛМ.

Максимальная выходная мощность излучения ЛМ составила 65.4 W при токе накачки 12 А, что соответствует яркости ЛМ $10.6\text{ MW}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr})$ и полному КПД 43%. При этом максимальный КПД составил 52% для тока накачки 6 А. Стоит отметить, что характер зависимости

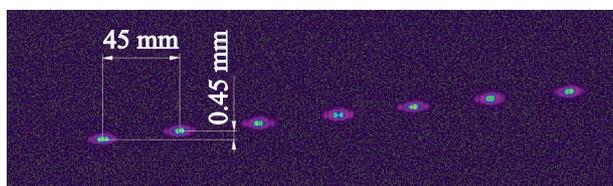


Рис. 3. Взаимное расположение лазерных пучков после прохождения линз для компенсации расходимости излучения по быстрой и медленной осям.

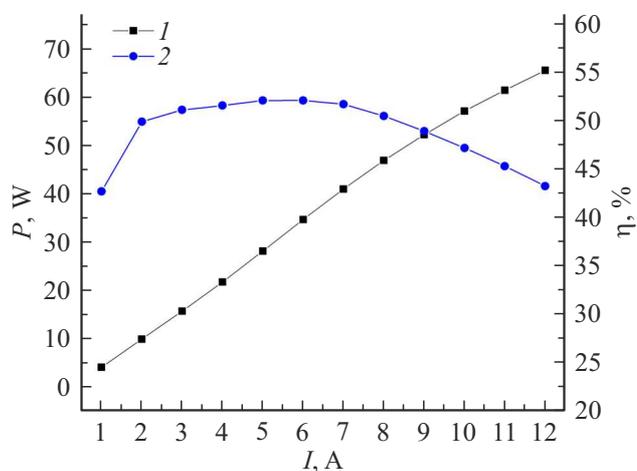


Рис. 4. Зависимость выходной мощности ЛМ (1) и полного КПД (2) от тока накачки.

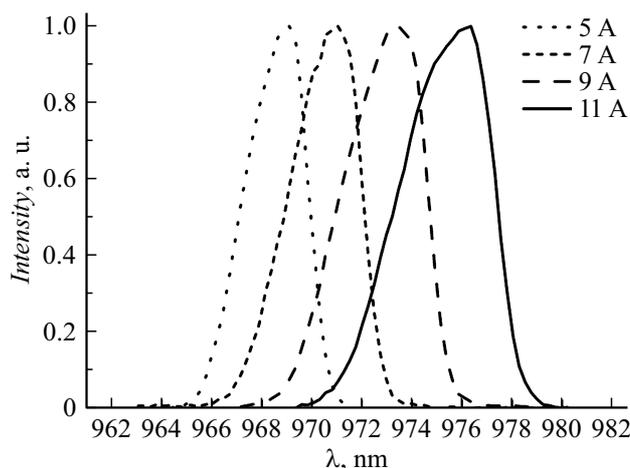


Рис. 5. Сдвиг огибающей спектра излучения ЛМ от тока накачки.

КПД ЛМ обусловлен зависимостью КПД самих ЛД от тока накачки, типичной для мощных ЛД [8,9]. При этом суммарные потери мощности излучения ЛД составили 23%, из них $\sim 9\%$ составили потери на элементах оптической системы, остальные потери обусловлены непосредственно эффективностью ввода сформированного лазерного пучка в оптическое волокно.

Результаты изготовления серии ЛМ продемонстрировали высокую воспроизводимость ватт-амперных характеристик, диапазон максимальной выходной мощности составил $(65 \pm 1)\text{ W}$, при номинальном значении тока накачки $(12 \pm 0.1)\text{ A}$.

Центральная длина волны излучения изготовленных ЛМ составила 976–978 nm. Смещение центральной длины волны излучения от тока не превысило $1.1\text{ nm}/\text{A}$ (рис. 5) при том, что значение аналогичной величины для используемых ЛД составляло $1\text{ nm}/\text{A}$.

Технологический процесс изготовления ЛМ предполагает проведение многочасовых ресурсных испытаний, в ходе которых регистрируются мощностные и спектральные характеристики ЛМ [10,11]. Для исследуемых в настоящей работе ЛМ время ресурсных испытаний составило 40 h при номинальном режиме работы. Деградация мощности лазерного излучения модулей не превысила 1.1%, что свидетельствует о надежности изготовленных ЛМ.

Заключение

Разработаны и изготовлены ЛМ с пространственным объединением излучения семи ЛД с эффективностью оптической системы более 77% [12]. Значение выходной мощности ЛМ составило 65 W при номинальном токе 12 А, что при используемом волокне с диаметром сердцевины $105\text{ }\mu\text{m}$ и числовой апертурой 0.15 соответствует яркости $10.6\text{ MW}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr})$, надежность ЛМ

подтверждена проведением ресурсных испытаний. Следует отметить, что по достигнутым характеристикам ЛМ не уступают мировым аналогам, а по показателю яркости превосходят большинство из них. Дальнейшее увеличение мощности ЛМ может быть достигнуто за счет использования схем поляризационного сложения излучения ЛД.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Haag, B. Kohler, J. Bicsenbach, T. Brand. Proc. SPIE, **6456**, 64560T (2007). DOI:10.1117/12.700941
- [2] C. Wessling, St. Hengesbach, J. Geiger, J. Dolkemeyer, M. Traub, D. Hoffman. Proc. SPIE, **6876**, 687614 (2008). DOI: 10.1117/12.763739
- [3] M. Kelemen, J. Gilly, P. Friedmann, S. Hilzensauer, I. Ogrodowski, H. Kissel, J. Biesenbach. Proc. SPIE, **10514**, 105140F (2018). DOI: 10.1117/12.2290030
- [4] B. Kruschke, H. Fritsche, H. Kern, T. Hagen, U. Pahl, R. Koch, A. Grohe, W. Gries. Proc. SPIE, **9346**, 934614 (2015). DOI: 10.1117/12.2079553
- [5] V. Gapontsev, N. Moshegov, P. Trubenko, A. Komissarov, I. Berishev. Proc. SPIE, **7198**, 719800 (2009). DOI: 10.1117/12.809456
- [6] Официальный сайт BWT Beijing Ltd Электронный ресурс: Режим доступа: <https://www.bwt-laser.com> (дата обращения 25.10.2021)
- [7] S. Karlsen, K. Price, M. Reynolds, A. Brown, R. Mehl, S. Patterson, R.J. Martinsen. Proc. SPIE Photon. West, **7198** (29), 71980T (2009). DOI: 10.1117/12.809710
- [8] Y. Kaifuchi, Y. Yamagata, R. Nogawa, R. Morohashi, Y. Yamada, M. Yamaguchi. Proc. SPIE, **10086**, 100860D-1 (2017). DOI: 10.1117/12.2251145
- [9] Y. Yamagata, R. Nogawa, Y. Kaifuchi, S. Sato, Y. Yamada. *High Power Semiconductor Laser Diode for Fiber Laser Pumping* (Fujikura Technical Review, 2016)
- [10] W. Zhao, L. Xiong, H. Liu. *Packaging of High Power Semiconductor Lasers* (Spinger, NY, 2015)
- [11] L.A. Johnson. IEEE Commun. Magazine, **44** (2), 4 (2006). DOI: 10.1109/MCOM.2006.1593543
- [12] Е.В. Кадигроб, С.Р. Усманов, А.В. Фомин. Патент РФ № 2688888 (2019).