

УДК 621.373.8

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-973-979

ЮСТИРОВКА ЛАЗЕРНОГО ДИОДНОГО МОДУЛЯ С ВОЛОКОННЫМ ВЫХОДОМ

Е.И. Котова, В.А. Шулепов, С.М. Аксарин, В.Е. Бугров

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
 Адрес для переписки: eikotova@itmo.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 04.06.19, принята к печати 20.08.19
 Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Котова Е.И., Шулепов В.А., Аксарин С.М., Бугров В.Е. Юстировка лазерного диодного модуля с волоконным выходом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 6. С. 973–979. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-973-979

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты юстировки оптической системы лазерного диодного модуля, включающей три этапа: коллимацию, сведение пучков от трех лазерных диодов и ввод излучения в оптическое волокно. Оптическая система лазерного диодного модуля с волоконным выходом представляет собой ступенчатую конфигурацию расположения источников со смещением по высоте друг относительно друга лазерных диодов на величину 1,6 мм. В качестве источников излучения использованы полупроводниковые лазерные диоды с резонатором Фабри–Перо и пиковой длиной волны генерации 1020 нм. Диаметр сердцевины выходного многомодового кварцевого оптического волокна составил 400 мкм, числовая апертура — NA 0,22. **Метод.** Реализован метод пространственного объединения лазерных пучков от трех лазерных диодов в непрерывном режиме генерации. Контроль остаточной расходимости и отклонений оптических осей в каждом канале проводился измерением профилей лазерных пучков в двух сечениях при смещении измерителя профиля пучка строго вдоль оси распространения на 100 мм. Эффективность ввода излучения в оптическое волокно определялась измерением мощности излучения до ввода лазерного пучка и на выходе из оптического волокна. **Основные результаты.** Максимальная выходная мощность опытного образца лазерного диодного модуля составила 19,65 Вт. Уменьшение потерь достигается за счет нанесения просветляющих покрытий на линзы и высоко отражающего покрытия на зеркала с учетом спектрального состава излучения и угла падения лазерных пучков. **Практическая значимость.** Реализованный метод сборки может быть использован для изготовления лазерных диодных модулей большей выходной мощности, включающих большее количество единичных лазерных диодов без снижения эффективности. Разработанный стенд позиционирования микрооптических компонент позволяет производить высокоточную юстировку линз и зеркал, а также производить стыковку с оптическим волокном оптоэлектронных устройств.

Ключевые слова

лазерный диод, коллимация, юстировка, волоконное соединение

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-973-979

FIBER COUPLED LASER DIODE MODULE ALIGNMENT

E.I. Kotova, V.A. Shulepov, S.M. Aksarin, V.E. Bugrov

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
 Corresponding author: eikotova@itmo.ru

Article info

Received 04.06.19, accepted 20.08.19
 Article in Russian

For citation: Kotova E.I., Shulepov V.A., Aksarin S.M., Bugrov V.E. Fiber coupled laser diode module alignment. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 973–979 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-973-979

Abstract

Subject of Research. The paper presents the results of the laser diode module optical system alignment, which includes three steps: the laser diode radiation collimation, the laser beams multiplexing from three sources and the radiation input into the optical fiber. The laser diode module optical system with a fiber output is realized as a stepped configuration of sources position with a height shift of laser diodes relative to each other by 1.6 mm. Semiconductor laser diodes with Fabry-Perot resonator and peak generation wavelength of 1020 nm are used as radiation sources. The core diameter of the output multimode quartz optical fiber is equal to 400 μm and the numerical aperture is NA 0.22. **Method.** The method of spatial multiplexing for laser

beams from three laser diodes in a continuous-wave mode was implemented. The residual divergence and deviations control of the optical axes in each channel were carried out by measuring the laser beam profiles in two sections with the beam profile meter displaced strictly along the laser beams propagation axis by 100 mm. The radiation input efficiency into the optical fiber was determined by measuring the radiation power before entering the laser beam and at the output from the optical fiber. **Main Results.** The maximum output power of the laser diode module prototype is 19.65 W. The loss reduction is achieved owing to the application of anti-reflective coatings on the lenses and a highly reflective coating on the mirrors, taking into account the spectral composition of the radiation and the angle of incidence of the laser beams. **Practical Relevance.** The implemented assembly method can be used to manufacture higher output power laser diode modules, including more than three laser diodes without reduction in effectiveness. The developed micro-optical component positioning test bench allows for high-precision alignment of lenses and mirrors, and optical fiber coupling of optoelectronic devices.

Keywords

laser diode, collimation, adjustment, fiber coupling

Введение

Стремительное развитие полупроводниковых лазерных технологий и снижение их стоимости в последнее десятилетие сделали внедрение мощных лазерных диодов (ЛД) и устройств на их основе более доступными. Длины волн около 1 мкм эффективно поглощаются металлами, что в совокупности с компактностью таких устройств и гибкостью подводимого световода делает лазерные диодные модули (ЛДМ) востребованными источниками излучения для применений в аддитивном производстве. Главной тенденцией по-прежнему остается увеличение выходной оптической мощности и эффективности устройств за счет лучшей температурной и спектральной стабилизации, улучшения качества лазерного излучения [1–6].

Несмотря на высокую электрооптическую эффективность полупроводниковых лазерных диодов с внешним резонатором (более 50 %), увеличение выходной мощности устройства приводит и к увеличению количества тепла, которое необходимо равномерно отводить от источников. Именно поэтому для создания лазерных диодных модулей выходной мощностью в несколько десятков ватт использование отдельных лазерных диодов имеют ряд преимуществ перед использованием лазерных линеек: во-первых, большее расстояние между излучателями (5 мм против 500 мкм у линеек) определяет меньшее взаимное температурное влияние, и отвод тепла производится эффективнее, во-вторых, при использовании линеек лазерных диодов возникает так называемый «smile», возникающий при посадке лазерных чипов на единое основание, который сложно компенсировать вторичной оптикой, из-за чего эффективность коллимации и ввода излучения в оптическое волокно может быть существенно ниже. Представленные факторы влияют на надежность и стабильность работы устройств [7–9].

К существенным недостаткам ЛД можно отнести высокую чувствительность к температурному режиму работы и изменению электрических параметров питания ЛД, которые приводят к смещению пиковой длины волны (на величину до 10 нм) [10]. Также характерной особенностью ЛД является эллиптический профиль пучка, связанный с разными значениями линейных размеров излучающей области (1×100 мкм) и угловой расходимости излучения (θ) в двух взаимно перпендикулярных сечениях ($\theta_{\parallel} = 8^\circ$, $\theta_{\perp} = 35^\circ$ по уровню FWHM) [11–13].

Оптическая система ЛДМ

Для практической реализации и экспериментальных исследований была выбрана конфигурация ЛДМ модуля, включающая три лазерных диода. Выбор количества источников определялся необходимостью отработки отдельных операций, при которых юстировка производится относительно соседнего лазерного пучка или центрального канала. Ранее была предложена компьютерная модель ступенчатой конфигурации оптической системы ЛДМ, включающая до 23 лазерных диодов, расположенных в единый массив [14].

Оптическая схема была разработана, проанализирована и оптимизирована в программе ZEMAX, с помощью которой были определены допуски на линейные и угловые отклонения оптических элементов от оптимального положения при юстировке. Основание и корпус лазерного диодного модуля изготовлены из меди для обеспечения эффективного теплоотвода от источников излучения, влияющих на спектральные и выходные характеристики модуля.

Для уменьшения френелевских потерь на границе разделов сред воздух-стекло на оптических элементах предусмотрено просветляющее покрытие, а в случае зеркал – высоко отражающее покрытие (отражение более 99 %). При этом следует также учитывать угол падения лазерного луча и спектральный состав излучения [15, 16].

Разработанная оптическая система ЛДМ с волоконным выходом представляет собой ступенчатую конфигурацию расположения источников (рис. 1) со смещением по высоте друг относительно друга лазерных диодов на величину 1,6 мм и включает в себя три этапа преобразования лазерного излучения: коллимация отдельных лазерных пучков в каждом канале, пространственное объединение (сведение) лазерных пучков плоскими зеркалами за счет излома оптических осей на 90° и ввод суммарного лазерного излучения в оптическое волокно (ОВ) при его фокусировке на торец волокна. Пиковая длина волны излучения используемых лазерных диодов составила 1020 нм согласно спецификации производителя.

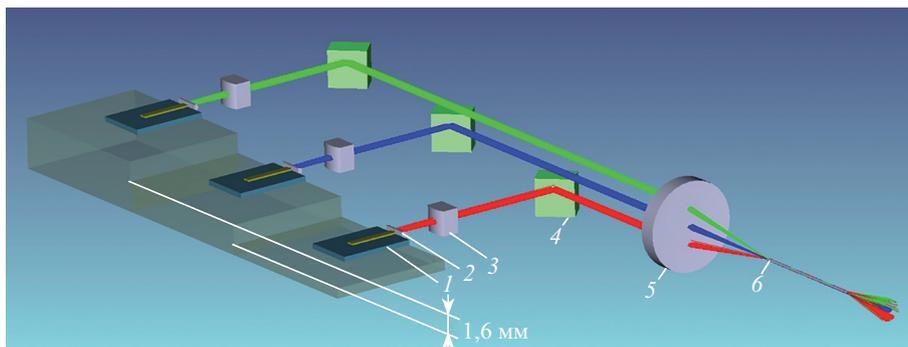


Рис. 1. Схема оптической системы лазерного диодного модуля: 1 — лазерные диоды; 2, 3 — цилиндрические линзы для коллимации лазерных пучков; 4 — наклонные зеркала; 5 — фокусирующая линза; 6 — оптическое волокно

Габаритные размеры разработанного опытного образца составили $87 \times 86 \times 21$ мм без учета длины оптического волокна (рис. 2).

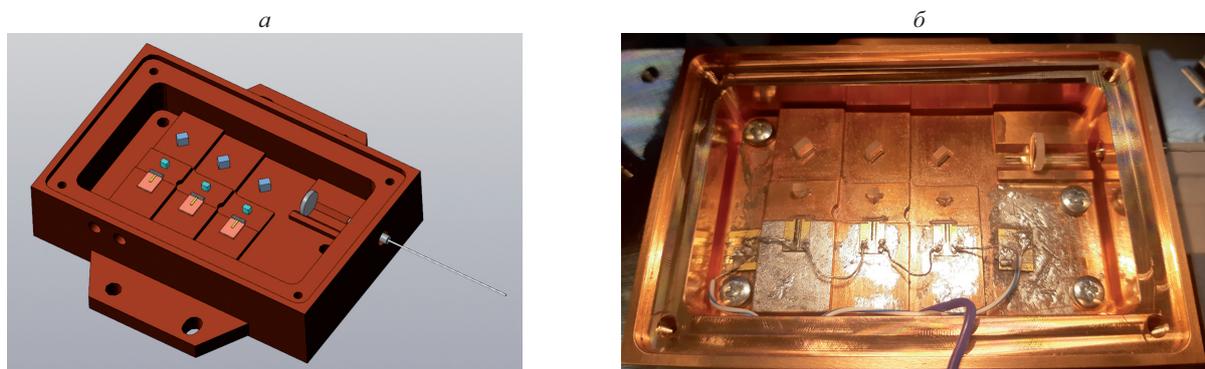


Рис. 2. Трехмерная модель (а) и опытный образец (б) разрабатываемого лазерного диодного модуля

Задание источников при моделировании учитывало линейные и угловые характеристики излучателей в двух взаимно перпендикулярных сечениях, но задавалось распределением Гаусса в обоих сечениях. Излучение реального лазерного диода по оси параллельной $p-n$ переходу имеет ярко выраженный многомодовый состав излучения. Эффективность ввода лазерного излучения от трех лазерных диодов в оптическое волокно при моделировании составила 94,8 % и 22,75 Вт при выходной мощности одного ЛД 8 Вт, что соответствует параметрам питания для одного излучателя 10 А и 1,55 В согласно спецификации производителя ЛД.

Сборка ЛДМ и факторы, влияющие на эффективность

Выходная мощность ЛДМ сильно зависит от эффективности оптической системы и минимизации потерь при установке, юстировке и фиксации оптических элементов с помощью клея, отверждаемого под действием ультрафиолетового излучения. При сборке модуля использовался клей фирмы Дупах с высоким коэффициентом вязкости (более 135 Па·с), минимизирующем нежелательное растекание клея, и минимальной величине линейной усадки клеевого слоя при облучении ультрафиолетовой лампой и полимеризации (менее 0,1 %), влияющей на смещение линз и зеркал от оптимального съюстированного положения.

При сборке модуля отклонение оптических осей лазерных пучков от параллельности основанию модуля и соосность соседних каналов оказывает наибольшее влияние на эффективность ввода излучения в волокно, так как обеспечение максимальной эффективности возможно только при нормальном (перпендикулярном) падении лазерных пучков на фокусирующую линзу.

Из-за особенностей конструкции стенда для сборки модуля остаточная расходимость оценивалась при позиционировании первых двух линз каждого канала на расстоянии $L_1 = 87$ мм от источников до измерителя профиля пучка и при его перемещении на расстояние $L_2 = 100$ мм (рис. 3), при этом оптимальным положением линз считалось то, при котором не происходит линейного смещения центра профиля лазерного пучка на измерителе. Расположение лазерных пучков крайних каналов юстировалось относительно центрального, а расстояние между соседними пучками по вертикали совпадало с высотой ступеней модуля и составляло 1,6 мм.

Наибольшей чувствительностью к разъюстировке в оптической системе лазерных диодных модулей обладают первые цилиндрические линзы с задним фокальным отрезком порядка 135 мкм и строгим

допуском по согласованию оптических осей источника и коллимирующей линзы (не более 2,5 мкм). При полимеризации УФ-отверждаемого клея на цилиндрических линзах в каждом из трех каналов наблюдалось смещение оптического компонента от заданного положения и, как следствие, отклонение оптических осей («свечение вниз» — к основанию) из-за усадки УФ-отверждаемого клея. В результате разъюстировки оптическая ось наклоняется на величину до $0,5^\circ$, а максимальная остаточная расходимость лазерного пучка составила $1,5^\circ$ в центральном канале (рис. 4). Измерение остаточной расходимости и контроль смещения оптических осей производились с помощью измерителя профиля пучка BC106N-VIS/M (Thorlabs) методом измерения двух сечений при продольном смещении на расстояние 100 мм друг от друга. Размер матрицы измерителя профиля пучка составляет $6,6 \times 8,8$ мм (1024×1360 пикселей), размер пикселя $6,45 \times 6,45$ мкм.

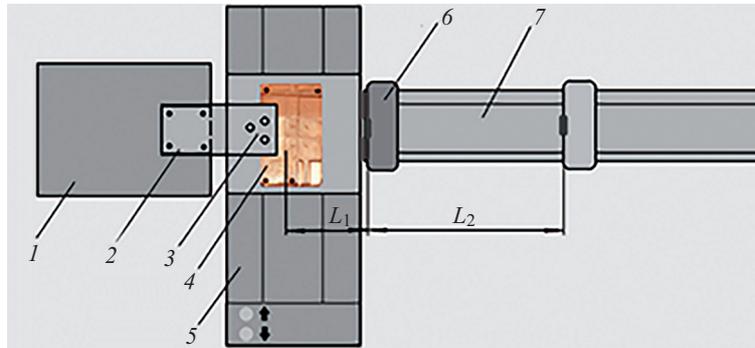


Рис. 3. Схема стенда для установки коллимационных линз лазерного диодного модуля: 1 — автоматическая 6-координатная подвижка, 2 — линейные трансляторы для позиционирования гриппера, 3 — пластина для крепления гриппера с возможностью его поворота на 45° , 4 — ступенчатое основание опытного образца, 5 — автоматизированный линейный транслятор, 6 — измеритель профиля пучка, 7 — оптический рельс

На рис. 4 приведены распределения интенсивности профиля лазерного пучка после первой (рис. 4, а) и второй (рис. 4, б) цилиндрических коллимирующих линз. Линейные размеры лазерных пучков в двух сечениях хорошо согласуются с полученными значениями при компьютерном моделировании (1100×272 мкм).

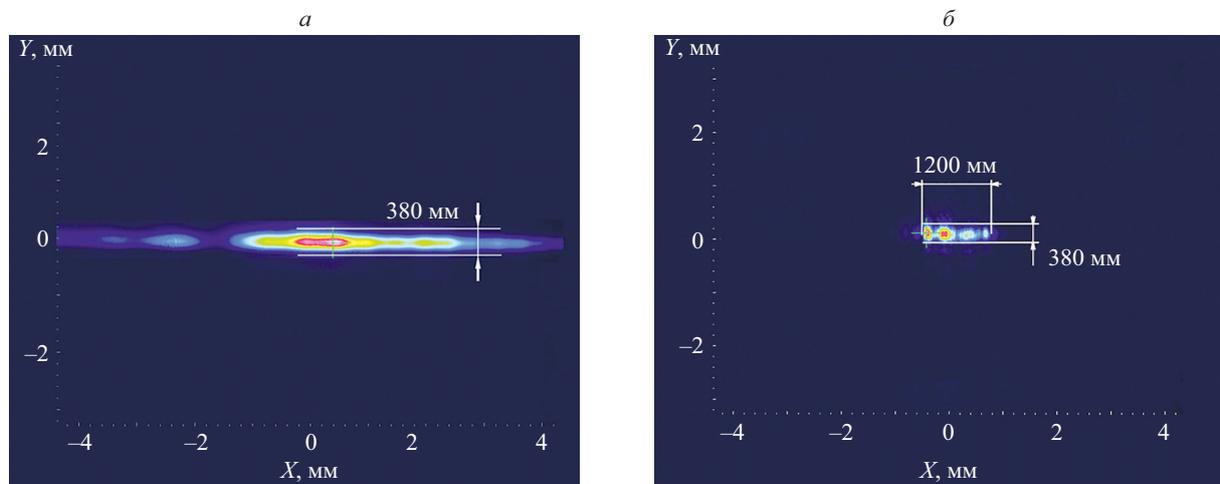


Рис. 4. Распределение интенсивности профиля лазерного пучка на фотоприемной матрице ($6,6 \times 8,8$ мм) на расстоянии 87 мм от источника после: а — первой, б — второй цилиндрических коллимирующих линз

После поворота основания ЛДМ на 90° для установки зеркал оптический путь в трех каналах в ближнем положении измерителя профиля пучка составил 70, 83 и 96 мм (L_1) соответственно, в дальнем положении измерения производились при смещении измерителя от первоначального положения также на $L_2 = 100$ мм.

Как показал оптический расчет и подтвердил эксперимент, наклон оптической оси $0,5^\circ$ может быть компенсирован наклоном плоского зеркала на величину $0,4^\circ$ по двум координатам, при этом остаточная расходимость не изменится, распространение лазерного пучка выровняется параллельно основанию со смещением по оси Y (перпендикулярный p-n переходу) на величину до 200 мкм. Данное линейное смещение находится в рассчитанном допуске на юстировку, и плоские зеркала следующих каналов оптической системы не перекрывают лазерные пучки с большей длиной оптического пути.

На рис. 5 представлены картины распределения интенсивности лазерных пучков трех каналов после отражения от плоских зеркал на расстоянии 70 мм (рис. 5, а) и 170 мм (рис. 5, б) от ближнего лазерного

диода. Нижний профиль лазерного пучка имеет наименьшую длину оптического пути, поэтому с учетом остаточной расходимости лазерных пучков имеет наименьший размер и наибольшую яркость. Разница оптического пути по сравнению с центральным пучком составляет 13 мм по сравнению с верхним – 26 мм. Измеритель профиля пучка автоматически подстраивает коэффициент усиления относительно максимума интенсивности, поэтому дальние от приемника лазерные пучки на картине распределения имеют меньшую интенсивность.

Также по картине распределения видно, что при перемещении измерителя профиля пучка вдоль оси распространения лазерного излучения оптические оси в трех каналах параллельны и условные центры лазерных пучков не меняют своего положения по оси Y .

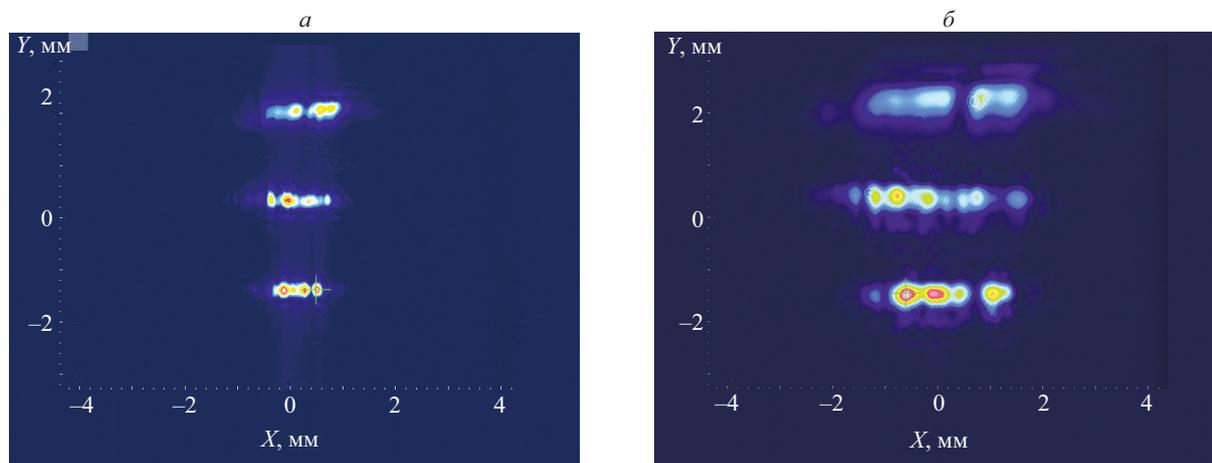


Рис. 5. Картины распределения интенсивности лазерных пучков после отражения от плоских зеркал и излома оптических осей на 90° : *a* — на расстоянии 70 мм от ближайшего излучателя до матрицы измерителя профиля пучка, *б* — на расстоянии 170 мм

Ввод излучения в многомодовое кварцевое оптическое волокно с диаметрами сердцевины 400 мкм и оболочки 440 мкм осуществлялся асферической линзой A397-B (производитель Thorlabs) с просветляющим покрытием для спектрального диапазона 650–1050 нм. Предварительно оптическое волокно вклеивается в стальную ферулу, и торец полируется под углом 8° для уменьшения влияния обратных отражений на лазерные диоды. Юстировка оптимального положения оптического волокна и фокусирующей линзы проводилась по максимальному уровню оптической мощности излучения на выходе из световода. В качестве эталона было выбрано значение мощности суммарного пучка после отражения от плоских зеркал: при силе тока $I = 0,6$ А и напряжении $U = 4,0$ В, мощность после зеркал составила $P_{mirrors} = 380$ мВт, максимальное значение на выходе оптического волокна составило $P_{fiber} = 330$ мВт. Таким образом, потери на волоконном соединении составили порядка 13,1 %, а при значении тока $I = 3,0$ А потери на вводе возросли до 13,5 %.

Анализ потерь в оптической системе

Перед монтажом лазерных диодов на медное основание была проведена характеристика их выходных параметров, а именно: пороговый ток (I_{th}) и мощность излучения при величине силы тока 1 А (P_{1A}) и 3 А (P_{3A}) (табл. 1).

Таблица 1. Исходные параметры лазерных диодов

Номер ЛД	I_{th} , мА	P_{1A} , Вт	P_{3A} , Вт
1	400	0,52	2,32
2	405	0,49	2,23
3	407	0,51	2,32
Сумма трех ЛД	—	1,52	6,87

Следует отметить, что измеренные значения выше (более чем на 10 %), чем заявленные производителем: при токе 3 А заявленная в технической документации выходная мощность ЛД составляет только 2 Вт.

В процессе сборки лазерного диодного модуля выходную мощность отдельных лазерных диодов и суммарного пучка можно было оценить только после установки коллимационных цилиндрических линз, так как без них конструкция модуля не позволяет поднести измерители мощности достаточно близко к излучателям, а из-за расходимости лазерных диодов лазерный пучок не попадает полностью на измерительную площадку. По промежуточным измерениям вольт-амперных и ватт-амперных зависимостей были оценены

суммарные потери на оптической системе и потери на каждом отдельном этапе преобразования лазерного излучения (табл. 2).

Таблица 2. Измерения мощности излучения после каждого этапа юстировки и оценка потерь на оптической системе опытного образца ЛДМ при $I = 3 \text{ A}$

	Коллимационная система	Зеркала	ОВ	Итого
Мощность P , Вт	6,70	6,36	5,43	—
Потери, %	2,5	5,0	13,5	21

Измерения выходной мощности ЛДМ проводились при установке опытного образца на медную плиту с водяным охлаждением. Стабилизация температуры нижней грани модуля устанавливалась $18 \text{ }^\circ\text{C}$. Максимальное значение выходной мощности составило $19,65 \text{ Вт}$ оптической мощности (рис. 6, а), оптико-электрическая эффективность (ОЭЭ – отношение выходной оптической мощности к потребляемой электрической мощности) снижается до 30% (рис. 6, б), что, вероятно, можно обосновать постепенным перегревом активной области и снижением КПД излучателей.

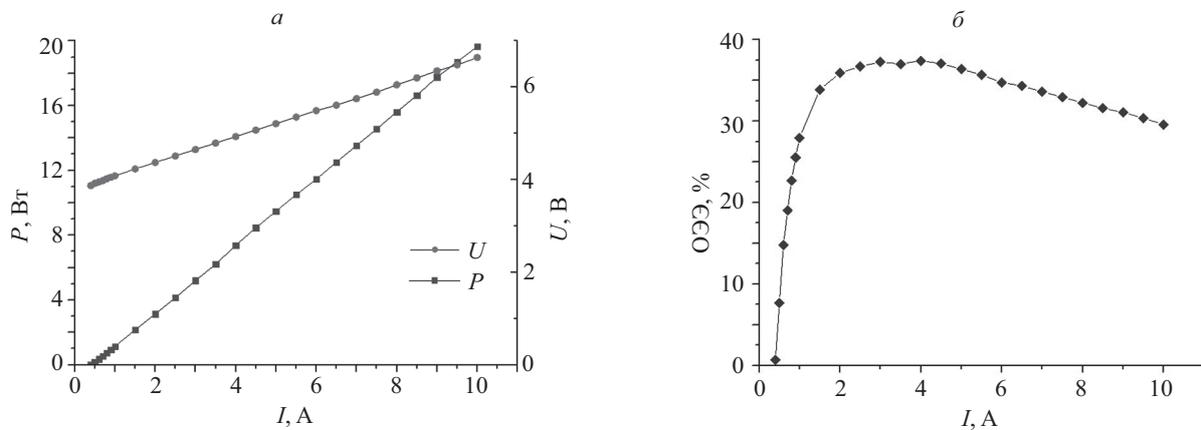


Рис. 6. Выходные характеристики опытного образца лазерного диодного модуля: а — вольт-амперные и ватт-амперные характеристики, б — оптико-электрическая эффективность

Уменьшение потерь в оптической системе возможно при увеличении точности позиционирования оптических компонент, зависящей от точности изготовления механических элементов и оснастки для захвата (губки гриппера), а также отработки технологических операций по нанесению, контролю толщины слоя оптического клея для минимизации ввода линз и зеркал при полимеризации клея, отверждаемого под действием ультрафиолетового излучения. Уменьшение френелевских отражений от границ разделов сред «воздух-стекло» обеспечивается подбором лучшего просветляющего покрытия под требуемый спектральный диапазон длин волн, а также их строгое соответствие углам падения лазерных лучей на поверхность оптического элемента.

Заключение

Разработан лазерный диодный модуль с волоконным выходом на основе трех лазерных диодов, излучение которых комбинируется при ступенчатом расположении излучателей друг относительно друга, коллимации лазерных пучков, пространственном сведении плоскими зеркалами и вводе в многомодовое волокно (400 мкм , $\text{NA } 0,22$). Максимальная выходная оптическая мощность составила $19,65 \text{ Вт}$. Приведен анализ потерь при юстировке оптической системы лазерного диодного модуля. Полученные результаты позволяют утверждать, что предложенный метод сборки может быть использован для изготовления лазерных диодных модулей большей выходной мощности, включающих большее количество полосок лазерных диодов без снижения эффективности.

Литература

1. High-Power Diode Lasers Fundamentals, Technology, Applications / Ed. by R. Diehl. Springer-Verlag, 2000. 422 p.
2. Liu X., Zhao W., Xiong L., Liu H. Packaging of high power semiconductor lasers. Springer, 2015. 415 p.
3. Sun H. A practical guide to Handling laser diode beams. Springer, 2015. 147 p.

References

1. High-Power Diode Lasers Fundamentals, Technology, Applications / Ed. by R. Diehl. Springer-Verlag, 2000, 422 p.
2. Liu X., Zhao W., Xiong L., Liu H. Packaging of high power semiconductor lasers. Springer, 2015, 415 p.
3. Sun H. A practical guide to Handling laser diode beams. Springer, 2015, 147 p.

4. Wolf P., Köhler B., Rotter K., Hertsch S., Kissel H., Biesenbach J. High-power, high-brightness and low-weight fiber coupled diode laser device // *Proceedings of SPIE*. 2011. V. 7918. P. 791800, doi: 10.1117/12.875147
5. Kasai Y., Yamagata Y., Kaifuchi Y., Sakamoto A., Tanaka D. High-brightness and high-efficiency fiber-coupled module for fiber laser pump with advanced laser diode // *Proceedings of SPIE*. 2017. V. 10086. P. 1008606. doi: 10.1117/12.2252122
6. Dawson J.W., Messerly M.J., Beach R.J., Shverdin M.Y., Stappaerts E.A., Sridharan A.K., Pax P.H., Heebner J.E., Siders C.W., Barty C.P.J. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power // *Optics Express*. 2008. V. 16. N 17. P. 13240–13266. doi: 10.1364/oe.16.013240
7. Pelegrina-Bonilla G., Mitra T. Compensation of the laser diode smile by the use of micro-optics // *Applied Optics*. 2018. V. 57. N 13. P. 3329–3333. doi: 10.1364/AO.57.003329
8. Wetter N.U. Three-fold effective brightness increase of laser diode bar emission by assessment and correction of diode array curvature // *Optics and Laser Technology*. 2001. V. 33. N 3. P. 181–187. doi: 10.1016/S0030-3992(01)00015-9
9. Yu J., Guo L., Wu H., Wang Z., Gao S., Wu D. Optimization of beam transformation system for laser-diode bars // *Optics Express*. 2016. V. 24. N 17. P. 19728–19735. doi: 10.1364/OE.24.019728
10. Köhler B., Brand T., Haag M., Biesenbach J. Wavelength stabilized high-power diode laser modules // *Proceedings of SPIE*. 2009. V. 7198. P. 719801. doi: 10.1117/12.809541
11. Liu R., Jiang X., Yang T., He X., Gao Y., Zhu J., Zhang T., Guo W., Wang B., Guo Z., Zhang L., Chen L. High Brightness 9xxnm Fiber Coupled Diode Lasers // *Proceedings of SPIE*. 2015. V. 9348. P. 93480V. doi: 10.1117/12.2080506
12. Hou L., Zhang H., Xu L., Li Y., Zou Y., Zhou X., Ma X. Design of high-brightness 976 nm fiber-coupled laser diodes based on ZEMAX // *Proceedings of SPIE*. 2015. V. 9521. P. 95211F. doi: 10.1117/12.2177786
13. Qi Y., Zhao P., Chen Q., Wu Y., Chen Y., Zou Y., Lin X. Design of 150W, 105- μ m, 0.22NA, fiber coupled laser diode module by ZEMAX // *Proceedings of SPIE*. 2016. V. 10152. P. 101521H. doi: 10.1117/12.2247657
14. Kotova E.I., Romanova G.E., Tsyganok H.A., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E. Efficiency analysis of optical schemes for the development of high power laser diode modules // *Proceedings of SPIE*. 2018. V. 10695. P. 106950T. doi: 10.1117/12.2313293
15. Андриевский А., Андриевский В.Ф. Лазерные диодные модули: ввод излучения в волокно и фиксация деталей модулей // *Фотоника*. 2017. № 3(63). С. 74–79. doi: 10.22184/1993-7296.2017.63.3.74.79
16. Werner M., Wessling C., Hengesbach S., Traub M., Hoffmann H.-D. 100 W / 100 μ m passively cooled, fiber coupled diode laser at 976 nm based on multiple 100 μ m single emitters // *Proceedings of SPIE*. 2009. V. 7198. P. 71980P. doi: 10.1117/12.810487
4. Wolf P., Köhler B., Rotter K., Hertsch S., Kissel H., Biesenbach J. High-power, high-brightness and low-weight fiber coupled diode laser device. *Proceedings of SPIE*, 2011, vol. 7918, pp. 791800. doi: 10.1117/12.875147
5. Kasai Y., Yamagata Y., Kaifuchi Y., Sakamoto A., Tanaka D. High-brightness and high-efficiency fiber-coupled module for fiber laser pump with advanced laser diode. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10086, pp. 1008606. doi: 10.1117/12.2252122
6. Dawson J.W., Messerly M.J., Beach R.J., Shverdin M.Y., Stappaerts E.A., Sridharan A.K., Pax P.H., Heebner J.E., Siders C.W., Barty C.P.J. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power. *Optics Express*, 2008, vol. 16, no. 17, pp. 13240–13266. doi: 10.1364/oe.16.013240
7. Pelegrina-Bonilla G., Mitra T., Compensation of the laser diode smile by the use of micro-optics. *Applied Optics*, 2018, vol. 57, no. 13, pp. 3329–3333. doi: 10.1364/AO.57.003329
8. Wetter N.U. Three-fold effective brightness increase of laser diode bar emission by assessment and correction of diode array curvature. *Optics and Laser Technology*, 2001, vol. 33, no. 3, pp. 181–187. doi: 10.1016/S0030-3992(01)00015-9
9. Yu J., Guo L., Wu H., Wang Z., Gao S., Wu D. Optimization of beam transformation system for laser-diode bars. *Optics Express*, 2016, vol. 24, no. 17, pp. 19728–19735. doi: 10.1364/OE.24.019728
10. Köhler B., Brand T., Haag M., Biesenbach J. Wavelength stabilized high-power diode laser modules. *Proceedings of SPIE*, 2009, vol. 7198, pp. 719801. doi: 10.1117/12.809541
11. Liu R., Jiang X., Yang T., He X., Gao Y., Zhu J., Zhang T., Guo W., Wang B., Guo Z., Zhang L., Chen L. High Brightness 9xxnm Fiber Coupled Diode Lasers. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9348, pp. 93480V. doi: 10.1117/12.2080506
12. Hou L., Zhang H., Xu L., Li Y., Zou Y., Zhou X., Ma X. Design of high-brightness 976nm fiber-coupled laser diodes based on ZEMAX. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9521, pp. 95211F. doi: 10.1117/12.2177786
13. Qi Y., Zhao P., Chen Q., Wu Y., Chen Y., Zou Y., Lin X. Design of 150W, 105- μ m, 0.22NA, fiber coupled laser diode module by ZEMAX. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 10152, pp. 101521H. doi: 10.1117/12.2247657
14. Kotova E.I., Romanova G.E., Tsyganok H.A., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E. Efficiency analysis of optical schemes for the development of high power laser diode modules. *Proceedings of SPIE*, 2018, vol. 10695, pp. 106950T. doi: 10.1117/12.2313293
15. Andryieuski A., Andryieuski V.F. Laser Diode Modules: Optical Coupling And Parts Bonding. *Photonics*, 2017, no. 3(63), pp. 74–79. (in Russian). doi: 10.22184/1993-7296.2017.63.3.74.79
16. Werner M., Wessling C., Hengesbach S., Traub M., Hoffmann H.-D. 100 W / 100 μ m passively cooled, fiber coupled diode laser at 976 nm based on multiple 100 μ m single emitters. *Proceedings of SPIE*, 2009, vol. 7198, pp. 71980P. doi: 10.1117/12.810487

Авторы

Котова Екатерина Ильинична — ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56227010800, ORCID ID: 0000-0003-4740-0434, eikotova@itmo.ru

Шулепов Владимир Андреевич — инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57191411190, ORCID ID: 0000-0003-2168-8046, shulepov_vladimir@itmo.ru

Аксарин Станислав Михайлович — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57191417852, ORCID ID: 0000-0002-7482-3072, sm_aksarin@itmo.ru

Бугров Владислав Евгеньевич — доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 8321276100, ORCID ID: 0000-0002-1365-9184, vladislav.bougrov@itmo.ru

Authors

Ekaterina I. Kotova — Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 56227010800, ORCID ID: 0000-0003-4740-0434, eikotova@itmo.ru

Vladimir A. Shulepov — Research Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57191411190, ORCID ID: 0000-0003-2168-8046, shulepov_vladimir@itmo.ru

Stanislav M. Aksarin — PhD, Laboratory Head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57191417852, ORCID ID: 0000-0002-7482-3072, sm_aksarin@itmo.ru

Vladislav E. Bugrov — D.Sc., Associate Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 8321276100, ORCID ID: 0000-0002-1365-9184, vladislav.bougrov@itmo.ru