



基于楔形整形镜对半导体激光的光纤耦合

郭照师, 秦文斌, 李景, 刘友强, 曹银花, 孟娇, 关骄阳, 潘建宇, 兰天, 李庆轩, 王智勇

引用本文:

郭照师, 秦文斌, 李景, 等. 基于楔形整形镜对半导体激光的光纤耦合[J]. *发光学报*, 2021, 42(1): 98–103.

GUO Zhao-shi, QIN Wen-bin, LI Jing, et al. Fiber Coupling of Semiconductor Laser Based on Wedge-shaped Lens[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(1): 98–103.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJL.20200233>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于不锈钢薄板切割的直接半导体激光源

Direct Diode Laser Source for Stainless Sheet Cutting

发光学报. 2015(10): 1188–1194 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153610.1188>

915 nm/974 nm单发射区半导体激光器光纤耦合模块设计

Design of 915 nm/974 nm Single-emitter Laser Diode Fiber-coupled Module

发光学报. 2018, 39(11): 1598–1603 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183911.1598>

三波长合束单管激光器光纤耦合模块设计

Design of Fiber-coupled Laser Diode Module Based on Three-wavelengths Multiplexing by ZEMAX

发光学报. 2018, 39(3): 337–342 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183903.0337>

GaAs基高功率半导体激光器单管耦合研究

Coupling Research of High Power Single GaAs Based Semiconductor Laser

发光学报. 2015(9): 1018–1021 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153609.1018>

基于mini-bar的千瓦级光纤耦合模块

Fiber Coupling Module with Kilowatt-output Based on Mini-bars

发光学报. 2014(11): 1359–1364 <https://doi.org/10.3788/fgxb20143511.1359>

文章编号: 1000-7032(2021)01-0098-06

基于楔形整形镜对半导体激光的光纤耦合

郭照师¹, 秦文斌^{1*}, 李 景¹, 刘友强¹, 曹银花¹,
孟 娇¹, 关骄阳¹, 潘建宇¹, 兰 天¹, 李庆轩², 王智勇¹

(1. 北京工业大学材料与制造学部 先进半导体光电技术研究所, 北京 100124;

2. 中国电子科技集团公司第五十三研究所, 天津 300308)

摘要: 在半导体激光器的光纤耦合系统中, bar 条的各发光点指向偏差(偏向角)会恶化光束整形效果, 显著降低光纤耦合效率。针对该现象提出利用引入修正角的楔形整形镜补偿发光点的指向偏差, 改善激光束的指向性和光束整形效果。通过 ZEMAX 软件模拟与实验验证, 在光纤耦合系统中使用引入修正角后的楔形整形镜片, 其整形效果显著改善, 测量的光束参数积(BPPs)在快轴和慢轴方向分别为 7.25 mm·mrad 和 5.05 mm·mrad, 聚焦光斑为 148 μm × 135 μm(包含 90% 能量)。该系统将单个 bar 条耦合进芯径 200 μm、数值孔径(NA)0.2 的光纤中, 在注入电流 60 A 时, 获得稳定输出功率 53 W, 对应电-光转换效率为 47%, 光纤耦合效率为 87%, 相对于使用修正前的楔形整形镜片, 光纤耦合效率提高了 7%。

关键词: 半导体激光器; 楔形整形镜; 光束整形; 光纤耦合

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20200233

Fiber Coupling of Semiconductor Laser Based on Wedge-shaped Lens

GUO Zhao-shi¹, QIN Wen-bin^{1*}, LI Jing¹, LIU You-qiang¹, CAO Yin-hua¹,
MENG Jiao¹, GUAN Jiao-yang¹, PAN Jian-yu¹, LAN Tian¹, LI Qing-xuan², WANG Zhi-yong¹

(1. Institute of Advanced Technology on Semiconductor Optics & Electronics, Department of Materials and Manufacturing,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. The 53th Research Institute of China Electronic Science & Technology, Tianjin 300308, China)

* Corresponding Author, E-mail: w bqin@bjut.edu.cn

Abstract: In fiber coupling system of diode laser bars, directivity deviation of emitters deteriorates the beam shaping seriously, thus leading to the degradation of fiber coupling efficiency. In order to solve this problem properly, in this paper, a wedge-shaped lens with calibrated angle is proposed to compensate the directivity deviation of the emitters and then improve the directivity of the laser beam and shaping effect. Both ZEMAX simulation and experiments are conducted. The results show that significant improvements of the beam shaping are obtained by using such wedge-shaped lens with calibrated angle. The beam parameter products(BPPs) calculated in the fast and slow axis are 7.25 mm·mrad and 5.05 mm·mrad respectively, and the focal spot dimension is 148 μm × 135 μm (with 90% energy enclosed). After coupled the laser beams into a standard fiber with 200 μm core diameter and 0.2 numerical aperture(NA), the output power is measured to be 53 W and the electrical-to-optical conversion efficiency is 47% at the inject current of 60 A. Finally, the fiber coupling efficiency of 87% is achieved, increased by 7% compared to that of the conventional wedge-shaped lens.

收稿日期: 2020-08-04; 修订日期: 2020-09-03

基金项目: 北京市科技计划(Z171100004417003)资助项目

Supported by Beijing Municipal Science and Technology Commission(Z171100004417003)

Key words: diode laser bars; wedge-shaped lens; beam shaping; fiber coupling

1 引言

半导体激光器具有高亮度、高功率、结构紧凑和高电光转换效率等优点,因此被广泛地应用于材料加工、生物医疗和固体激光器泵浦源等领域^[1-3]。然而,对于典型的半导体激光器来说,由于其本身的特殊结构,快慢轴两个方向的发散角和光束质量是不对称的。快轴方向的发散角在 $60^\circ \sim 80^\circ$,其光束质量接近于衍射极限;慢轴方向的发散角在 $6^\circ \sim 15^\circ$,其光束质量远远大于衍射极限^[4-7]。为了在各种不同应用领域中获得高功率、高光束质量的激光,需要对光束进行整形,光束整形不仅能够改善激光的光束质量,也能够获得更高的光纤耦合效率^[8-14]。

2011年,Seyed等^[15]利用“反光条纹镜”和一对变形棱镜填充激光束的无光区并压缩快轴方向的光斑高度,使用“V型堆栈镜片”匀化光束质量,模拟实现1 kW的激光耦合进芯径 $550 \mu\text{m}$ 、 $\text{NA} = 0.22$ 的光纤中,输出激光束的强度为 $3.5 \times 10^5 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。2015年,余俊宏等^[16]使用两个 45° 平行四边形棱镜,激光束经过两次全内反射被切割为两部分,再通过棱镜重新排列,实现了快慢轴光束的匀化,最终将16个激光bar耦合进光纤中,实现光纤耦合效率70%,输出功率440 W,激光亮度达到 $36.2 \text{ MW}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2)$ 。

本文研究了楔形整形透镜在光纤耦合系统中对光束整形效果和耦合效率的影响。实验测量激光器14~19号发光单元的指向偏差角度(偏向角)在2 mrad左右,通过对楔形整形透镜的改进,将修正角2.1 mrad引入到楔形整形镜片中。ZEMAX模拟与实验验证均获得了较好的整形效果,激光束在快、慢轴方向的光束参数积(BPPs)分别为 $7.25 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 和 $5.05 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。将单bar整形并聚焦后的激光束耦合进芯径 $200 \mu\text{m}$ 、 $\text{NA} = 0.2$ 的光纤中,在注入电流60 A时输出功率为53 W,耦合效率为87%,比楔形整形透镜改进前提高了7%。

2 光学设计

2.1 楔形整形镜设计

在实验中发现,bar条封装过程中引起的

smile效应^[17-18]会导致发光单元指向发生变化从而产生偏向角,而快轴准直镜(FAC)的安装精度以及光束转换器(BTS)对光束的旋转都会进一步放大偏向角度,最终影响光束整形效果和光纤耦合效率^[19]。本文选用的半导体光源为808 nm的cm-bar,发光单元个数19个,发光单元间距 $500 \mu\text{m}$ 。实验中使用狭缝和CCD对bar条的19个发光单元偏向角进行了测量。19个发光单元的激光束依次通过狭缝,并在1 m处的位置利用CCD采集每束激光光斑在CCD中的相对位置,以1号发光单元的位置为基准,计算出2~19号发光单元的偏向角。图1是实验测出的bar条每个发光单元的偏向角分布,2~13号发光单元的偏向角都在 $0.3 \sim 0.6 \text{ mrad}$ 范围内,但是14~19号发光单元的偏向角在2 mrad左右,偏离较为严重,需要对其进行修正。针对上述问题,本文提出了在整形系统的楔形镜片中引入修正角以改善发光单元的指向偏差。

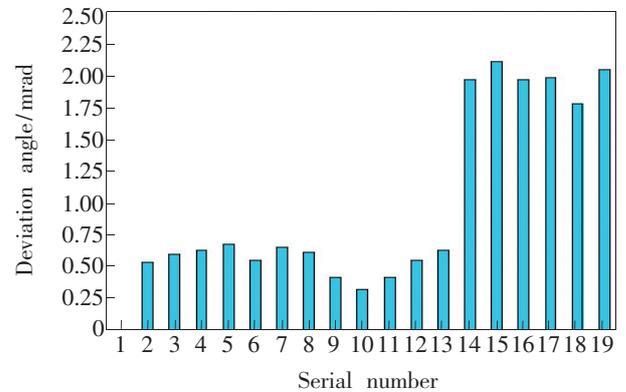


图1 bar条各发光单元偏向角分布

Fig. 1 Relative deviation angles distribution of all emitters

如图2(a),对于常规楔形镜来说,镜片输入面与输出面相平行以保证激光束经过楔形镜后只改变水平方向的位移而不影响水平角度的偏差,当入射光不是平行入射时,出射光也会以相同的角度出射。对于图2(b)中的楔形镜,引入修正角后,光束通过修正角度后的镜片,出射光的出射角度发生变化,这样就可以将14~19号发光单元的偏向角修正为平行光出射。

根据折射定律有:

$$\sin I_1 = n \sin I_2, \quad (1)$$

$$n \sin I_3 = \sin I_4, \quad (2)$$

I_1, I_2 分别是图2(a)楔形镜输入面的入射角与折

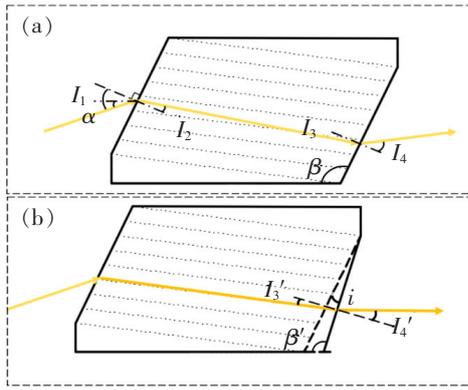


图 2 (a) 常规楔形整形镜; (b) 修正角度后的楔形整形镜。

Fig. 2 (a) Conventional wedge prism. (b) Wedge prism with correcting the deviation angle.

射角, I_3, I_4 是输出面的入射角与折射角, α 是半导体激光器发光单元的偏向角, n 是镜片的折射率, β 是楔形镜的角度。根据几何关系有:

$$I_1 = I_4 = \beta - 90^\circ + \alpha, \quad (3)$$

$$I_2 = I_3, \quad (4)$$

对于修正后的楔形棱镜的出射面, 根据折射定律:

$$n \sin I'_3 = \sin I'_4, \quad (5)$$

根据几何关系有:

$$I'_3 = I_3 - i, \quad (6)$$

$$I'_4 = \beta' - 90^\circ = \beta - i - 90^\circ, \quad (7)$$

$$n \sin(I_3 - i) = \sin(\beta - i - 90^\circ), \quad (8)$$

$$\sin I_3 = \frac{1}{n} \sin(\beta - 90^\circ + \alpha), \quad (9)$$

其中 I'_3, I'_4 分别是图 2(b) 楔形整形镜输出面的入

射角与折射角, β' 是镜片的角度, i 是镜片的修正角。 $\beta = 123^\circ 31'$, 14 ~ 19 号发光点的偏向角 $\alpha \approx 2$ mrad, 镜片的折射率 $n \approx 1.57$ 。联立公式 (8) 和 (9) 可以求出楔形整形镜的修正角度 $i = 7.2' = 2.1$ mrad。

2.2 光纤耦合系统设计

图 3 为光纤耦合系统模型, 系统中包括一个半导体激光器 bar、准直系统、整形系统(整形 1 和整形 2)、聚焦系统和一个芯径 $200 \mu\text{m}$ 、 $\text{NA} = 0.2$ 的光纤。在光纤耦合系统模型中, 准直系统采用快慢轴准直镜(FAC 和 SAC)压缩快慢轴方向的发散角, 同时利用光束转换器(BTS)进一步匀化半导体光源快慢轴光束质量。其作用是将通过 FAC 后的激光束旋转 90° , 即半导体激光器的快慢轴方向相互转换。半导体激光快慢轴方向光束质量相差较大, 在光纤耦合系统中常采用切割、重排^[20]的整形方式, 使快慢轴两个方向 BPP 值相近。快、慢轴方向的光束参数积分别用 K_{fast} 和 K_{slow} 来表示:

$$K_{\text{fast}} = \omega_{\text{fast}} \times \theta_{\text{fast}}, \quad (10)$$

$$K_{\text{slow}} = \omega_{\text{slow}} \times \theta_{\text{slow}}, \quad (11)$$

再根据光束快慢轴光束质量均匀化条件有:

$$\frac{1}{M} K_{\text{fast}} \approx K_{\text{slow}}, \quad (12)$$

其中, $\omega_{\text{fast}}, \omega_{\text{slow}}$ 分别是光束快慢轴的光斑宽度, $\theta_{\text{fast}}, \theta_{\text{slow}}$ 分别是光束快慢轴发散角, M 为分段的数量。

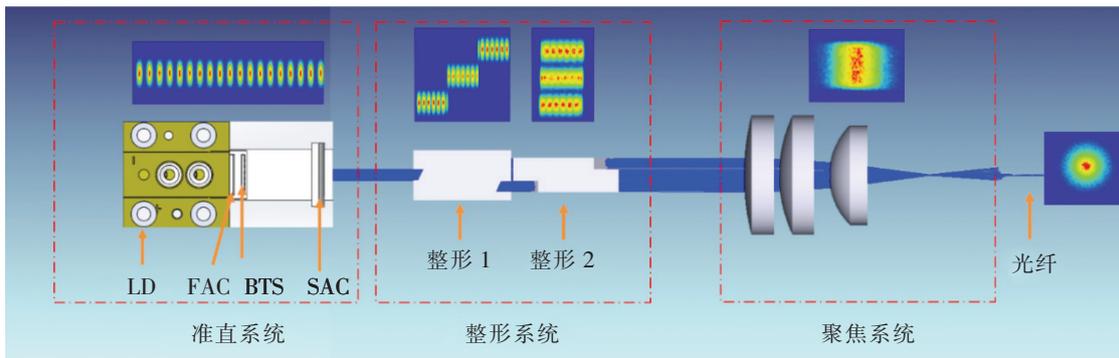


图 3 光纤耦合系统模型

Fig. 3 Optical configuration of the fiber-coupled system

本设计首先利用第一整形系统(整形 1)将 bar 激光束切割为 3 段, 再通过第二整形系统(整形 2)对 3 段激光束重排。整形 1 和整形 2 镜片结构相同, 两者互为垂直放置。整形 1、2 均由两片楔形镜片和一片矩形玻璃平板组成, 利用楔形镜片对光束产生的

位移和镜片摆放位置的不同, 实现切割和重排的目的。聚焦系统由焦距为 25 mm 的三片式镜片组合, 通过聚焦镜对整形后的光束聚焦获得焦点光斑。在光纤耦合系统中根据每个发光单元的偏向角数据建立实际的光源模型, 同时在整形 2 中分别使用常规

楔形整形镜片与修正后的楔形整形镜片, 模拟出实际的光斑图像。

如图 4(a) 所示, 发光单元偏向角过大会恶化激光束的整形效果, 且随着传输距离的增大越来越明显, 同时会严重影响焦点光斑的大小。图 4(b) 是光斑在整形后经 25 mm 聚焦镜后的聚焦光斑, 光斑尺寸为 $182 \mu\text{m} \times 106 \mu\text{m}$ (包含 90% 能量), 获得模拟耦合效率为 91.47%。如图 4(c),

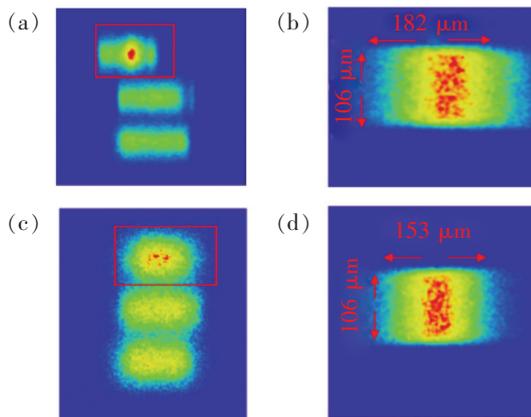


图 4 楔形整形镜修正角度前的整形光斑(a)和焦点光斑(b);楔形整形镜修正角度后的整形光斑(c)和焦点光斑(d)。

Fig. 4 Shape spot image(a) and focal spot(b) of wedge lens before calibrated. Shape spot image(c) and focal spot(d) of wedge lens with calibrated angle.

利用修正的楔形整形镜对发光单元的偏向角修正后获得了较为理想的整形效果。图 4(d) 是在偏向角修正后通过 25 mm 聚焦镜后的焦点光斑, 大小为 $153 \mu\text{m} \times 106 \mu\text{m}$ (包含 90% 能量), 很明显比修正角度前的聚焦光斑小, 耦合效率为 98.6%, 比修正前高了 7.13%。

3 结果与讨论

图 5 为光纤耦合实验装置, 激光光源选用的商用 cm-bar, 采用 CS 封装, 输出功率 60 W, 具体参数如表 1 所示。实验中, 在光束整形系统的整形 2 中分别使用常规楔形整形镜和引入修正角后的楔形整形镜对光束进行整形, 对比整形前后的光斑图像及焦点光斑图像, 并通过光纤耦合实验对比引入修正角后对光纤耦合效率的改善效果。如图 6(a) 红框标注区域, 在光纤耦合实验中采用常规楔形整形镜片, 光束整形效果较差, 并且光斑偏移量会随着传输距离的增加而变大, 整形后快轴光束质量 $8.75 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 慢轴光束质量 $5.25 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。如图 6(b) 所示, 聚焦后的焦点光斑大小为 $153 \mu\text{m} \times 138 \mu\text{m}$ (包含 90% 能量), 在注入电流 60 A 时, 单 bar 的耦合效率为 80%, 稳定输出功率 48 W, 对应电-光转化效率 42.6%。

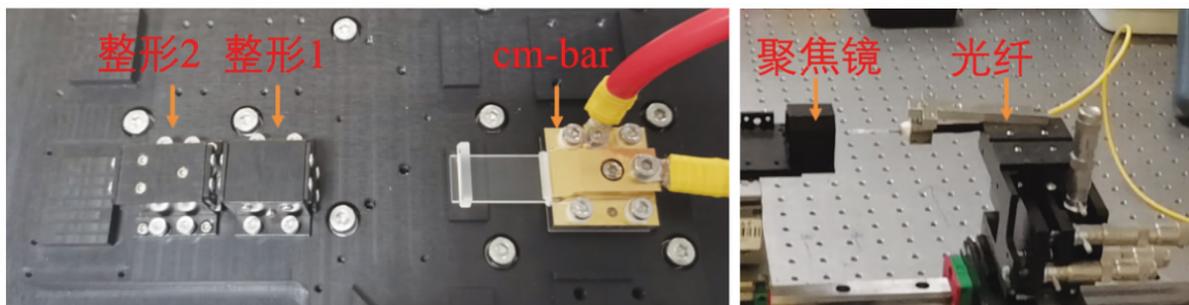


图 5 光纤耦合实验装置图

Fig. 5 Experimental setup of the beam shaping

表 1 激光器参数

Tab. 1 Characteristic of the used diode laser bar

Output power/ W	Number of emitters	Fast-axis divergence (90%)/(°)	Slow-axis divergence (90%)/(°)	Emitter size/ μm	Center wavelength/ nm
60	19	<63	<7.5	100	808

如图 7(a) 所示, 光束整形系统中采用修正后的楔形镜片整形后的 3 段光斑没有发生偏离现象, 获得快轴光束质量 $7.25 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 慢轴光束质量 $5.05 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。如图 7(b), 获得的焦点光

斑大小为 $148 \mu\text{m} \times 135 \mu\text{m}$ (包含 90% 能量), 在注入电流 60 A 时, 获得稳定输出功率 53 W, 耦合效率 87%, 对应电-光转化效率 47%。

通过对楔形镜片的修正, 整形后的光斑快慢

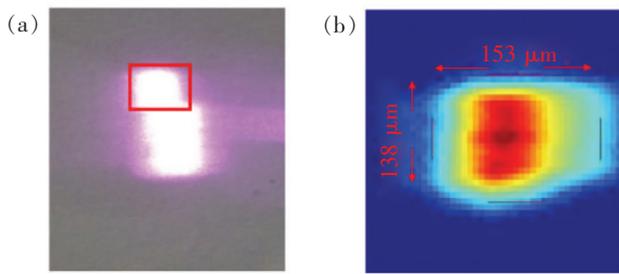


图 6 楔形镜片修正前的光束整形光斑(a)和焦点光斑(b)

Fig. 6 Beam shaping image(a) and focal spot image(b) of wedge lens before calibrated

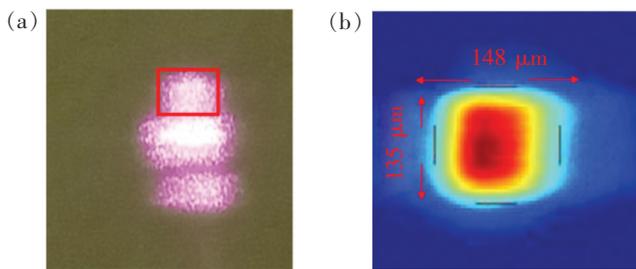


图 7 楔形镜片修正后的光束整形光斑(a)和焦点光斑(b)

Fig. 7 Beam shaping image(a) and focal spot image(b) of wedge lens with calibrated angle

轴光束质量均有改善,实际光纤耦合效率也有较大提升。虽然相对于模拟值 98.6% 仍然偏低,这主要是由于模拟时的参数均以 90% 能量的标准取值,导致了部分能量的边缘光斑因超出设计范围无法进入光学系统或者不满足传输角度而无法耦合进光纤中。

4 结 论

本文针对半导体激光 bar 发光单元指向偏离问题,对常规楔形整形镜片进行修正,获得了较好的整形效果和较高的耦合效率。通过实验测量出每个发光单元的偏向角度,针对偏离角度在 2 mrad 左右的发光点进行修正,并通过公式计算出镜片修正角度为 2.1 mrad。在光纤耦合实验中,利用修正后的楔形整形镜片对激光束整形,并将单个 bar 激光束耦合进芯径 200 μm、NA = 0.2 的光纤中,获得稳定输出功率 53 W,对应电-光转化效率 47%,耦合效率为 87%,比使用常规的楔形整形镜片提高了 7%。本研究很好地实现了光纤耦合系统的高效率输出,为半导体激光器的光束整形设计及获得更高的光-光转换效率提供了一定的参考。

参 考 文 献:

- [1] LI Z J, LI T, LU P, *et al.*. A survey of the high power high brightness fiber coupled laser diode [C]. *Proceedings of 2012 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics, Changchun*, 2012:52-55.
- [2] 王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展 [J]. *发光学报*, 2015, 36(1):1-19.
WANG L J, NING Y Q, QIN L, *et al.*. Development of high power diode laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(1):1-19. (in Chinese)
- [3] HEINEMANN S, FRITSCHKE H, KRUSCHKE B, *et al.*. Compact high brightness diode laser emitting 500 W from a 100 μm fiber [C]. *Proceedings of SPIE High-power Diode Laser Technology and Applications XI, San Francisco*, 2013: 86050Q.
- [4] HAN Z G, MENG L Q, HUANG Z Q, *et al.*. Determination of the laser beam quality factor (M^2) by stitching quadriwave lateral shearing interferograms with different exposures [J]. *Appl. Opt.*, 2017, 56(27):7596-7603.
- [5] 闫宏宇, 高欣, 宋健, 等. 976 nm 宽条形高功率半导体激光器的光束质量 M^2 评价 [J]. *发光学报*, 2019, 40(2): 196-203.
YAN H Y, GAO X, SONG J, *et al.*. Evaluation of beam quality M^2 for 976 nm wide stripe high power semiconductor laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40(2):196-203. (in Chinese)
- [6] 李再金, 胡黎明, 王焯, 等. 808 nm 含铝半导体激光器的腔面镀膜 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6):1258-1263.
LI Z J, HU L M, WANG Y, *et al.*. Facet coating for 808 nm Al-containing semiconductor laser diodes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):1258-1263. (in Chinese)
- [7] 田雨. 新型结构准直系统设计与激光束耦合分析 [D]. 成都:电子科技大学, 2018.
TIAN Y. *Design of A New Structure Collimation System and Analysis of Laser Beam Coupling* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [8] YAMAGUCHI S, KOBAYASHI T, SAITO Y, *et al.*. Collimation of emissions from a high-power multistripe laser-diode bar

- with multiprism array coupling and focusing to a small spot [J]. *Opt. Lett.*, 1995, 20(8):898-900.
- [9] 王玉,张玲,杨盈盈,等. 高功率蓝紫光半导体激光器及其光场匀化研究 [J]. 半导体光电, 2019,40(1):38-41.
WANG Y,ZHANG L,YANG Y Y,*et al.*. High-power blue-violet laser diode and its optical field homogenization [J]. *Semiconduct. Optoelectron.*, 2019,40(1):38-41. (in Chinese)
- [10] EHLERS R,DU K,BAUMANN M,*et al.*. Beam shaping and fibre coupling of high-power diode laser arrays [C]. *Proceedings of SPIE Lasers and Optics in Manufacturing III*,Munich, 1997:639-644.
- [11] BACHMANN A,LAUER C,FURITSCH M,*et al.*. Recent brightness improvements of 976 nm high power laser bars [C]. *Proceedings of SPIE High-power Diode Laser Technology XV*,San Francisco, 2017:1008602.
- [12] LIN G Y,ZHAO P F,DONG Z Y,*et al.*. Beam-shaping technique for fiber-coupled diode laser system by homogenizing the beam quality of two laser diode stacks [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2020,123:105919.
- [13] 刘翠翠,王翠鸾,王鑫,等. 半导体激光器双波长光纤耦合模块的 ZEMAX 设计 [J]. 红外与激光工程, 2018,47(1):0105002-1-6.
LIU C C,WANG C L,WANG X,*et al.*. Design of double wavelengths fiber coupled module of semiconductor diode laser by ZEMAX [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2018,47(1):0105002-1-6. (in Chinese)
- [14] 朱洪波,郝明明,彭航宇,等. 基于 808nm 半导体激光器单管合束技术的光纤耦合模块 [J]. 中国激光, 2012,39(5):0502001-1-5.
ZHU H B,HAO M M,PENG H Y,*et al.*. Module of fiber coupled diode laser based on 808 nm single emitters combination [J]. *Chin. J. Lasers*, 2012,39(5):0502001-1-5. (in Chinese)
- [15] GHASEMI S H,HANTEHZADEH M R,SABBAGHZADEH J,*et al.*. Beam shaping design for coupling high power diode laser stack to fiber [J]. *Appl. Opt.*, 2011,50(18):2927-2930.
- [16] YU J H,GUO L H,WU H L,*et al.*. Beam shaping design for compact and high-brightness fiber-coupled laser-diode system [J]. *Appl. Opt.*, 2015,54(18):5759-5763.
- [17] 袁庆贺,井红旗,仲莉,等. 大功率半导体激光器封装热应力研究 [J]. 中国激光, 2019,46(10):1001009-1-6.
YUAN Q H,JING H Q,ZHONG L,*et al.*. Thermal stress in high-power semiconductor laser packaging [J]. *Chin. J. Lasers*, 2019,46(10):1001009-1-6. (in Chinese)
- [18] 张哲铭,薄报学,张晓磊,等. 半导体激光器巴条封装应力及评价 [J]. 发光学报, 2018,39(3):343-348.
ZHANG Z M,BO B X,ZHANG X L,*et al.*. Evaluation of packaging induced stress of semiconductor laser bar [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018,39(3):343-348. (in Chinese)
- [19] PELEGRINA-BONILLA G,MITRA T. Compensation of the laser diode smile by the use of micro-optics [J]. *Appl. Opt.*, 2018,57(13):3329-3333.
- [20] LIU Y Q,CAO Y H,XU C X,*et al.*. 1 000 W compound coupling high beam quality diode laser [C]. *Proceedings of SPIE International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009*,Beijing, 2009:738231-1-8.



郭照师(1996-),男,山东菏泽人,硕士研究生,2018年于山东理工大学获得学士学位,主要从事大功率半导体激光器技术的研究。

E-mail: guozhaoshi95@163.com



秦文斌(1981-),男,河北石家庄人,博士,副研究员,2012年于北京工业大学获得博士学位,主要从事大功率半导体激光器的研究。

E-mail: wbqin@bjut.edu.cn