

## 500 W 级半导体激光器光纤耦合输出模块设计

吴华玲<sup>1,2</sup>, 郭林辉<sup>1,2</sup>, 余俊宏<sup>1,2</sup>, 高松信<sup>1,2</sup>, 武德勇<sup>1,2</sup>

- (1. 中国工程物理研究院 高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900;
2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**为实现亮度均匀、形状对称、高对称光束质量的高功率半导体激光输出,提出了一种基于 mini-bar 芯片的高功率光纤耦合系统设计方案,使用 Zemax 设计了一套针对 200  $\mu\text{m}$ /NA0.22 多模光纤的 500 W 级光纤耦合输出系统。设计使用反射镜-条纹镜系统实现单列叠层微通道封装芯片快轴方向光束的尺寸压缩,并结合偏振合束技术在不改变光束束参积的条件下将功率提高一倍,并使用慢轴扩束系统压缩慢轴方向发散角,最后采用非球面透镜耦合进目标光纤。在设计的基础上采用 4 列叠层微通道封装的叠阵(每列包含 5 个 mini-bar 芯片)进行了等效验证实验,在注入电流为 37 A 时得到稳定输出功率 506 W 的小型化模块,亮度达 10.3  $\text{MW}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr})$ ,电光效率为 43.0%。设计和实验共同表明,该光纤耦合模块可实现 500 W 稳定功率输出,可广泛应用于光纤/固体激光泵浦及工业加工等领域。

**关键词:** 半导体激光器; 光纤耦合; 光束整形; Zemax 设计

中图分类号: TN248 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.1005005

## Design of 500 W-output fiber-coupled diode laser module

Wu Hualing<sup>1,2</sup>, Guo Linhui<sup>1,2</sup>, Yu Junhong<sup>1,2</sup>, Gao Songxin<sup>1,2</sup>, Wu Deyong<sup>1,2</sup>

- (1. The Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 2. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** In order to realize the output of high power semiconductor laser with uniform brightness, symmetrical shape and high symmetrical beam quality, a high power fiber-coupled diode laser system based on mini-bar was proposed, and Zemax was used to simulate a 500 W-output fiber-coupled diode laser system with a fiber of 200  $\mu\text{m}$  core diameter and 0.22 numerical aperture. In the system, mirror-stripe mirror system was put forward to compress the beam size in the fast axis of diode array in terrace structure, and polarization multiplexing was used to double the output power without changing the beam parameter product. Then, a beam expander system was taken to reduce the residual angle in slow axis, and an aspherical lens was used to coupled the shaping beam into the fiber. Based on the existing condition, 4 diode laser arrays (each contains 5 mini-bar) in terrace structure were used to validate the design. The output power of the fiber-coupled diode laser system can achieve 506 W, and the brightness is 10.3  $\text{MW}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr})$ , while the E-O efficiency is 43.0% at operation current of 37 A. Design and experiment all show the fiber-coupled diode laser system can work steadily with output power over 500 W. This module can be used in material processing and many other areas.

**Key words:** diode laser; fiber-coupled; beam shaping; Zemax design

收稿日期: 2017-02-10; 修订日期: 2017-03-14

基金项目: 中国工程物理研究院重大项目子课题(AL01020103)

作者简介: 吴华玲(1987-), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事半导体激光器光束整形方法和光学设计方面的研究。Email: wuhualing08@126.com

## 0 引言

近红外波段半导体激光器(Diode Laser)作为一款高效率的近红外光源,相较于其他激光器类型,具有转换效率高、体积小、重量轻、寿命长、能直接调制及易与其他半导体器件集成等特点,在工业加工、军事国防和激光通信领域发挥着重要作用<sup>[1-4]</sup>。例如,目前优化设计的量子阱结构和低寄生电压损失使得宽波段多模半导体激光器的电光效率可高达 70%<sup>[5]</sup>,使得该类半导体激光器常被用作固体激光、光纤激光和碱蒸汽激光系统的泵浦源<sup>[6]</sup>。然而半导体激光光源(单管、bar 条等)最大的缺陷是其快慢轴(平行 PN 结的方向为慢轴,垂直 PN 结的方向为快轴)方向光束质量不对称,快轴方向接近衍射极限,慢轴方向光束质量较差,存在发散角大、椭圆光斑的难题,限制了其直接应用<sup>[7]</sup>,而光纤能够实现激光的柔性传输,因此将半导体激光阵列出射的激光通过光束整形和合束技术耦合进光纤从而提高输出功率和亮度是实现半导体激光应用的主要途径<sup>[8-9]</sup>。近年来,国内外半导体激光器光纤耦合输出研究获得了极大的进展,如德国 LIMO 公司使用 mini-bar 进行光纤耦合研究,目前已经把 500 W 单波长激光耦合进 200  $\mu\text{m}$ /NA0.22 的光纤中<sup>[10]</sup>。美国 nLIGHT 公司研制出输出光纤为 400  $\mu\text{m}$ /NA0.2 多模光纤、输出功率可达 1 000 W 的光纤耦合模块<sup>[11]</sup>。国内一些研究单位也开展了半导体激光器的光纤耦合研究,其功率大多在百瓦量级,如 2012 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所利用光束旋转器进行光束整形后,采用空间复用技术得到了输出功率为 107 W、光纤芯径为 200  $\mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.22 的光纤耦合半导体激光模块,光纤耦合效率为 87.2%,整体的电光转换效率为 43.1%<sup>[12]</sup>。2016 年北京工业大学使用光束整形、空间合束和偏振合束技术将 518 W 功率耦合到芯径 400  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的光纤中<sup>[13]</sup>。然而国外同行虽然实现了高功率输出,但其系统结构非常复杂,对每一步骤的工艺要求非常高。国内研制的 500 W 级实验模块由于传输损耗和偏振合束工艺的偏差,引起光束质量退化,导致耦合输出亮度不高。

文中提出了一种基于 mini-bar 芯片的高功率光纤耦合系统设计方案,使用 Zemax 设计了一套针对 200  $\mu\text{m}$ /NA0.22 多模光纤的 500 W 级光纤耦合系统,通过反射镜-条纹镜系统压缩快轴方向光束尺寸,采用偏振合束、慢轴扩束和聚焦耦合技术将 500 W 功率耦合进目标光纤,并基于实验室现有条件进行了等效验证实验。该光束整形方法缩小了模块尺寸,简化了系统结构,为高功率光纤耦合输出系统的研制提供了一条可行途径。

## 1 基本原理

在半导体激光器光纤耦合中,通常使用光束束参积(Beam Parameter Product, BPP)来评价光束质量,其定义为<sup>[14]</sup>:

$$BPP = \frac{d_0}{2} \frac{\theta_0}{2} \quad (1)$$

式中: $d_0$ 为光斑束腰直径; $\theta_0$ 为远场发散全角。根据使用要求,所选取的光纤芯径为 200  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.22,即光纤半角的正弦值为 0.22,则耦合光纤的 BPP 为 22  $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。

半导体激光合束后光斑和远场分布都呈矩形,而光纤端面呈圆形,因此聚焦后半导体激光束的快慢轴 BPP 需满足以下条件:

$$\sqrt{BPP_{FA}^2 + BPP_{SA}^2} \leq BPP_F = 22 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \quad (2)$$

式中: $BPP_{FA}$ 、 $BPP_{SA}$ 分别为快慢轴方向的光束束参积。公式(2)给出了光纤耦合最佳耦合效率的边界条件。由此可知,要使得整形后光束高效耦合进目标光纤,其快慢轴束参积的均方根需小于 22  $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。

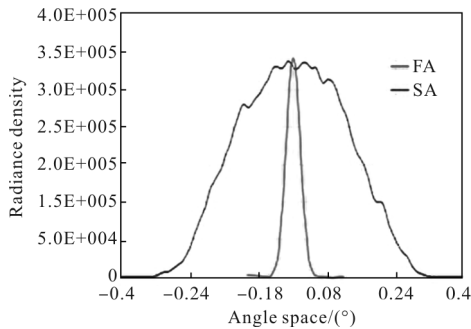
文中选用 Osram 商用 mini-bar 芯片作为直接光源,芯片参数如表 1 所示。

采用有效焦距为 0.9 mm (LIMO 公司 FAC900)的非球面快轴准直镜(简称 FAC)对单个芯片快轴发散角进行压缩,压缩后快轴光斑尺寸为 0.72 mm,理论剩余发散角为 1.5 mrad。考虑到快轴准直镜的装配误差在  $\pm 0.5$  mrad<sup>[15-16]</sup>,取快轴准直后剩余发散角为 2.5 mrad,光斑尺寸为 0.72 mm,对应 BPP 为 0.47  $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。为使慢轴准直后发散角尽量小且充分填充两个发光点之间的间隙,采用焦距 10.3 mm (ingeneric 公司型号 SAC-100-1000)的柱透镜阵列

表 1 半导体激光器芯片参数  
Tab.1 Characteristics of diode laser chips

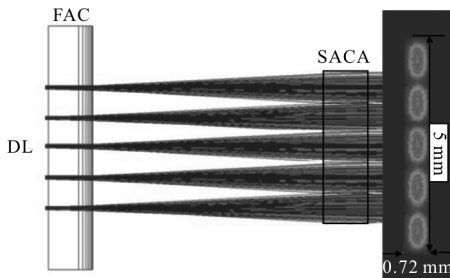
Parameter	Characteristic
Number of emitters per bar	5
Pitch/ $\mu\text{m}$	1 000
Single emitters area/ $\mu\text{m}^2$	100 $\times$ 1
Peak output power/W	40
Centre wavelength/nm	976
FWHM emission bandwidth/nm	$\leq 4$
Fast axis divergence	46°(95% energy)
Slow axis divergence	6.2°(95% energy)

(SACA) 进行慢轴准直, 准直后光束尺寸按 5 mm 计算, 剩余发散角为 10 mrad, 对应 BPP 为 12.5 mm·mrad。快慢轴准直如图 1 所示。



(a) 准直模拟

(a) Simulation of collimation



(b) 剩余发散角(FA: 2.5 mrad, SA: 10 mrad)

(b) Residual divergence angle(FA: 2.5 mrad. SA: 10 mrad)

图 1 快慢轴准直

Fig.1 Collimation in fast and slow axes

由于模块功率较高, 所需芯片较多, 为减小模块尺寸, 将多个芯片封装成微通道冷却的叠阵。为进一步提高光束质量, 提出采用 45°反射镜-条纹镜对快轴方向空间间隔进行填充 (简称光束空间压缩系

统), 其原理是通过入射激光在 45°反射镜和条纹镜上的两次反射, 将一部分单元激光束穿插到另一部分透射光束中间, 使整体光斑尺寸减小为原来的 1/2, 以提高光束质量。其工作原理如图 2 所示, 条纹镜一面镀增透膜, 另一面镀成宽度为  $\sqrt{2a}$  的高透/高反交错的条纹, 其周期为  $2\sqrt{2a}$ 。当宽度不超过  $a$  的多个激光束入射到反射镜-条纹镜系统时, 下端激光束直接由条纹镜透射区透射, 上端激光束经过全反射镜和条纹镜反射区反射后穿插在透射光间隔中。当激光束个数为  $2n$  时, 出射激光整体的宽度变为原来的 1/2; 当激光束个数为  $2n+1$  时, 出射激光整体宽度变为原来的  $(2n+1)/(4n+1)$ , 而在该变化过程中, 激光单元发散角不发生变化, 因此激光束在 Y 方向的光束质量得以压缩, 达到提高光束质量的目的。图 2 中, Mirror 表示反射镜, SM 表示条纹镜, 两个探测器上的光束分别为整形前后的激光束。

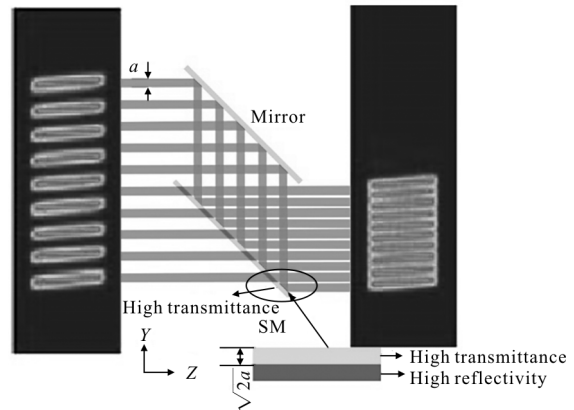


图 2 光束压缩系统原理

Fig.2 Principle of mirror-stripe mirror system

基于反射镜-条纹镜光束压缩原理, 文中提出一种小型化 500 W 级光纤耦合输出模块设计方案, 将 20 个功率为 40 W 的 mini-bar 芯片封装成两个各含 10 个 bar 条的叠阵, 采用光束压缩系统对两个叠阵光束的快轴(Y 方向)方向进行压缩后使用偏振器件进行偏振合束, 再使用一个 2 倍扩束系统对慢轴方向进行扩束, 最后使用非球面透镜耦合进目标光纤。系统整体设计如图 3 所示, 模块尺寸为 180 mm $\times$ 100 mm $\times$ 30 mm。图中, DLA1 和 DLA2 表示半导体激光器叠阵, SACA 表示慢轴准直镜阵列, S-M 表示反射镜-条纹镜光束压缩系统 (Mirror-Stripe

mirror), PBS 表示偏振分光棱镜, BES 表示扩束系统 (Beam Expander System), F 表示非球面聚焦镜。图中第一幅光斑图像是叠阵准直后光束, 第二幅是

使用反射镜-条纹镜压缩后光束图像, 第三幅是扩束后光束图像, 最后一幅是有效焦距 30 mm 的非球面镜头的聚焦焦斑图像。

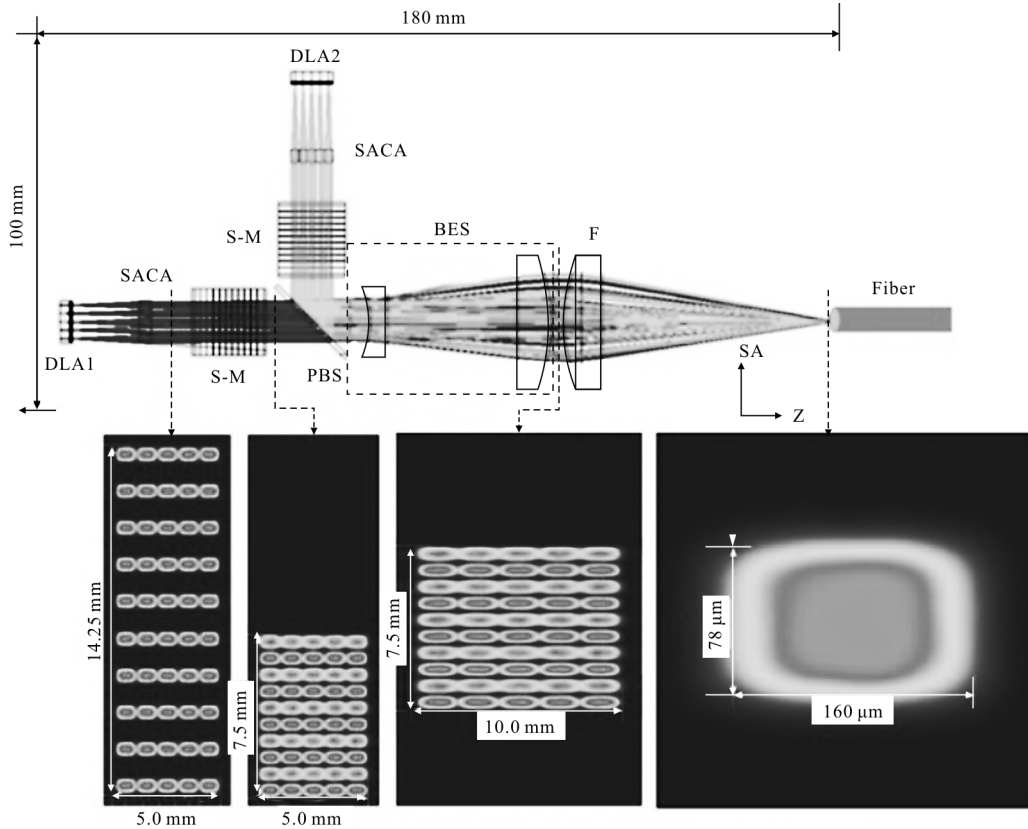


图 3 系统整体光路布局

Fig.3 System overall optical path layout

根据图 3 将整形各步骤光束的参数变化情况列表, 如表 2 所示。

表 2 光束整形过程光束参数变化

Tab.2 Beam parameter changes during beam shaping

Item	Size/mm		Residual angle/mrad	
	FA	SA	FA	SA
After collimation	14.25	5.00	2.5	10.0
After compress	7.50	5.00	2.5	10.0
Polarization multiplexing	7.50	5.00	2.5	10.0
After expander system	7.50	10.00	2.5	5.0

由表 2 可知, 扩束后快慢轴方向尺寸分别为 10 mm 和 7.5 mm, 对角线尺寸为 12.5 mm。当使用有效焦距 30 mm 的聚焦镜聚焦时, 最大数值孔径为 0.2, 小于目标光纤数值孔径 0.22。由图 3 可知, 使用

该聚焦镜聚焦后焦斑对角线尺寸为 178 μm, 小于光纤芯径 200 μm。综合聚焦焦斑的数值孔径和大小可知该设计满足最佳耦合条件。

使用有效焦距为 30 mm 的非球面聚焦镜耦合进 200 μm/NA0.22 的多模光纤, 光纤前后耦合效率达 95%, 系统光-光效率为 75%。

## 2 实验结果

在该设计的基础上, 考虑到实验室现有条纹镜的限制, 采用 4 列各包含 5 个 mini-bar 的叠阵进行了验证实验, 实验原理如图 4 所示。实验使用的条纹镜与设计所使用条纹镜的差别在于, 设计用条纹镜条纹宽度 (反射区和透射区) 为单个子光束宽度的 1.414 倍, 而实验所用条纹镜条宽与单个子光束快轴方向光束尺寸相同, 将两列高度差为一个子光束宽度的叠阵沿快轴方向拼接起来, 以填满封装热沉

的发光死区。

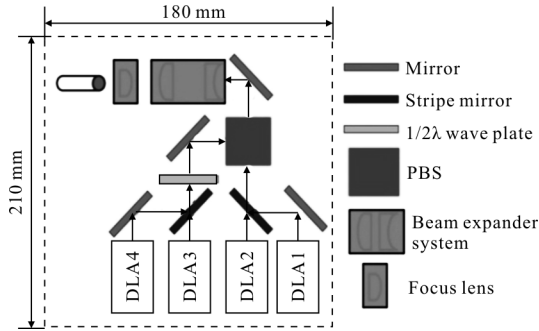
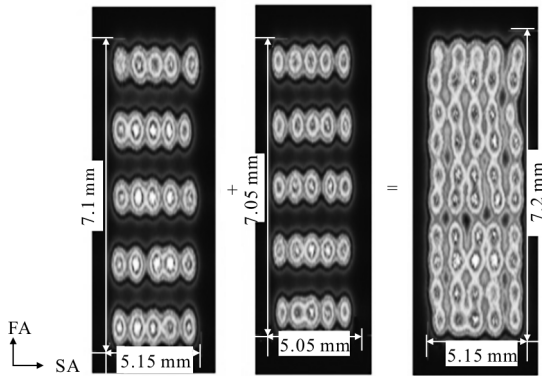


图 4 实验装置示意图

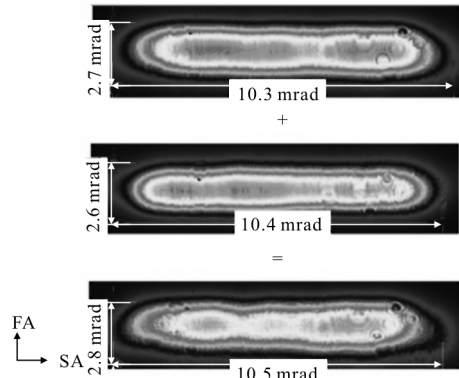
Fig.4 Sketch of experimental setup

使用 4 列各封装 5 个 mini-bar 的叠阵进行验证实验,第一、二列空间叠加调试过程如图 5 所示。图中近场光斑由 CCD(Camera Spricon)探测得出,远场光斑由有效焦距 300 mm 的平凸透镜聚焦在 CCD 上得出。



(a) 近场强度分布

(a) Near-field intensity distribution



(b) 远场强度分布

(b) Far-field intensity distribution

图 5 实验光斑

Fig.5 Experimental light spot

为充分对比设计与实验的差异,将各调试过程光束的参数变化列表,如表 3 所示。

表 3 中,1+2 表示第一列和第二列叠阵空间叠加,3+4 表示第三列和第四列叠阵空间叠加,1+2+3+4 表示偏振合束。

通过对比实验和理论值发现,实验所得偏振叠加后光束快轴方向尺寸为 7.95 mm,相对设计值 7.5 mm 扩展了 0.45 mm;发散角 2.8 mrad,相对模拟值 2.5 mrad 扩展了 0.3 mrad。光束慢轴方向尺寸为 5.30 mm,相对模拟值 5.0 mm 扩展了 0.3 mm;发散角为 10.5 mrad,相对模拟值扩展了 0.5 mrad。在对慢轴进行 2 倍扩束后,快轴发散角保持不变,仍为 2.8 mrad,慢轴发散角变为 5.3 mrad,快慢轴方向光束尺寸分别为 8.0 mm 和 10.5 mm,束参积分别为

表 3 实验与设计比对

Tab.3 Comparison of experiment and design

Item	Size/mm				Residual angle/mrad			
	Theoretical value		Experimental value		Theoretical value		Experimental value	
	FA	SA	FA	SA	FA	SA	FA	SA
1	6.75	5.00	7.10	5.15	2.5	10.0	2.7	10.3
2	6.75	5.00	7.05	5.05	2.5	10.0	2.6	10.4
3	6.75	5.00	7.08	5.02	2.5	10.0	2.8	10.2
4	6.75	5.00	7.12	5.10	2.5	10.0	2.7	10.4
1+2	7.50	5.00	7.85	5.16	2.5	10.0	2.7	10.5
3+4	7.50	5.00	7.92	5.15	2.5	10.0	2.8	10.5
1+2+3+4	7.50	5.00	7.95	5.30	2.5	10.0	2.8	10.5
After BES	7.50	10.00	8.00	10.50	2.5	5.0	2.8	5.3

5.6 mm·mrad 和 13.9 mm·mrad, 均方根束参积为 15 mm·mrad, 小于目标光纤束参积 22 mm·mrad, 因此可保证高耦合效率。

使用有效焦距 30 mm 的非球面透镜(Edmund LENS ASPHERE 30 mm/F1.0) 和 200 μm/NA0.22 的光纤进行耦合实验, 在注入电流为 37 A 时, 光纤耦合系统稳定输出功率达到 506 W, 光纤前后的耦合效率为 82%, 对应电光效率 43%。电流与输出功率、电光效率曲线如图 6 所示。

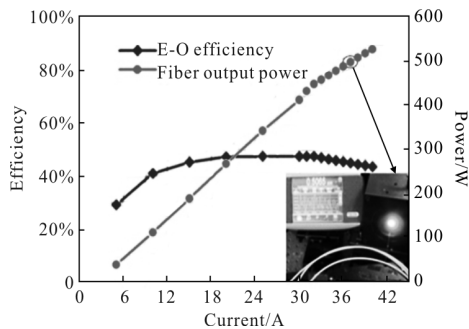


图 6 输出功率及耦合效率

Fig.6 Output power and coupling efficiency

### 3 结 论

基于微通道封装的 mini-bar 叠阵, 提出采用反射镜-条纹镜系统压缩快轴方向光束尺寸, 使用 Zemax 设计了一套针对 200 μm/NA0.22 多模光纤的 500 W 级光纤耦合系统, 并基于现有器件使用 4 列叠层微通道封装的 mini-bar (每列叠阵封装 5 个 mini-bar 条)进行了验证实验。模拟和实验共同表明, 该光纤耦合模块可实现 500 W 稳定功率输出, 亮度达 10.3 MW/(cm<sup>2</sup>·sr), 电光效率为 43.0%。该小型化模块可广泛应用于光纤/固体激光泵浦及工业加工等领域。

### 参考文献:

[1] Dai Zhiyong, Zhang Xiaoxia, Peng Zengshou, et al. High power single-frequency narrow linewidth fiber laser with nonlinear two-wave mixing [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32(2):159-163. (in Chinese)

[2] Li Zaijin, Hu Liming, Wang Ye, et al. Facet coating for 808 nm Al-containing semiconductor laser diodes [J]. *Opt Precision Eng*, 2010, 18(6): 1258-1263. (in Chinese)

[3] Ke Xizheng, Deng Lijun. Characteristic of onlinear distortion

and p redistortion compensation of semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3214-3210. (in Chinese)

[4] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun. Advance on high power diode laser coupling [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 517-534. (in Chinese)

[5] Efimov M, Glebov L B, Smirnov V I. High-frequency Bragg gratings in a photo-thermo-refractive glass [J]. *Opt Lett*, 2000, 25: 1693-1695.

[6] Roh S D, Grasso D M. High-brightness fiber coupled diode laser systems[C]//SPIE, 2007, 6456: 64560P.

[7] Tong Cunzhu, Wang Lijie, Tian Sisong, et al. Study on Bragg reflection waveguide diode laser [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 480-498.

[8] Hao Mingming. Research on technologies of high power beam combination and fiber coupling for diode laser short arrays [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 1-11. (in Chinese)

[9] Liu Youqiang, Cao Yinhu, Li Jing, et al. 5 kW fiber coupling diode laser for laser processing [J]. *Opt Precision Eng*, 2015, 23(5): 1279-1287. (in Chinese)

[10] Matthias Haag, Bernd Kohler, Jen Biesenbach, et al. Novel high-brightness fiber coupled diode laser device [C]//SPIE, 2007, 6456: 64560T.

[11] Kirk Price, Frank Peffer, Paul Leisher, et al. kW-class industrial diode laser comprised of single emitters [C]//SPIE, 2010, 7583: 75830E.

[12] Hao Mingming, Zhu Hongbo, Qin Li, et al. Research on high brightness fiber coupled diode laser module with hundred watts class output power [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 32(6): 651-659. (in Chinese)

[13] Xu Dan, Huang Xuesong, Jiang Menghua, et al. 500 W fiber-coupled semiconductor laser module [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0606003.

[14] Bachmann F, Loosen P, Poprawe R. High Power Diode Lasers and Their Applications [M]. New York: Springer, 2007: 121.

[15] Niu G, Fan Z W, Wang P F, et al. A single fiber coupling module with the output power of 50 W [J]. *J Optoelectronics Laser*, 2008, 19(4): 427-429.

[16] Yin Zhiyong, Wang Yuefeng, Yin Shaoyun, et al. Impact of microlens changes on the homogenization effect of semiconductor laser beam [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(10): 2556-2560. (in Chinese)