

# 基于双管的高亮度半导体激光器光纤耦合系统设计

吴华玲<sup>1,2</sup> 郭林辉<sup>1,2\*</sup> 王昭<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>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

**摘要** 半导体激光器光纤耦合输出系统常被用作光纤激光器的抽运源,是光纤激光器的核心器件之一。针对芯径 105  $\mu\text{m}$ 、NA0.15 的多模光纤,使用 Zemax 软件设计了一种基于双管的高亮度半导体激光器光纤耦合输出系统。该系统采用高精密切直技术、台阶加反射镜空间合束、偏振合束和慢轴扩束技术完成光束整形,最后使用非球面透镜聚焦耦合进芯径 105  $\mu\text{m}$ 、NA0.15 的目标光纤。结合设计,在现有实验条件的基础上进行了等效验证实验。模拟和实验均表明:该系统可将 16 支双管耦合进芯径 105  $\mu\text{m}$ 、NA0.15 的光纤,在注入电流为 15 A 时,可获得稳定输出功率 154 W,亮度达 25  $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ ,对应电光效率为 42%。该模块工程化后可广泛应用在光纤激光器抽运及工业加工等领域。

**关键词** 激光器; 半导体激光器; 高亮度; 光纤耦合; Zemax

**中图分类号** TN248.4

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.1001012

## Design of High Brightness Fiber-Coupled Diode Laser System Based on Dual-Emitters

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

<sup>1</sup>Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of  
Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

<sup>2</sup>Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** Fiber-coupled diode laser output system is often used for pumping source of fiber laser, and it is one of the key elements of fiber laser. Aimed at multi-mode fiber of 105  $\mu\text{m}$  core diameter and 0.15 numerical aperture, a high brightness fiber-coupled diode laser system based on dual-emitters is designed by using Zemax software. In the system, the high precision collimation technique, spatial multiplexing used steps and mirrors, polarization multiplexing and slow axis beam expander technique are taken to achieve beam shaping. Finally, an aspherical lens is used to focus and couple the beam into the target fiber of 105  $\mu\text{m}$  core diameter and 0.15 numerical aperture. Combined with the design, the equivalent confirmatory experiment is carried out based on the existing experimental condition. The simulation and experiment all show that, the system can couple 16 dual-emitters into a fiber of 105  $\mu\text{m}$  core diameter and 0.15 numerical aperture, the stable output power can reach 154 W, the brightness is up to 25  $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ , and the electro-optics efficiency is 42% at injection current 15 A. This system can be widely used in pumping fiber laser, manufacture processing and other fields after been engineered.

**Key words** lasers; diode laser; high brightness; fiber coupling; Zemax

**OCIS codes** 140.2020; 140.3325; 140.3300; 140.3480

**收稿日期:** 2016-06-22; **收到修改稿日期:** 2016-07-27

**基金项目:** 中国工程物理研究院高功率光纤激光器项目(2014PY-4)、中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金(HEL2014-08)

**作者简介:** 吴华玲(1987—),女,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。

E-mail: wuhualing08@126.com

\* 通信联系人。E-mail: glh863@163.com

# 1 引 言

光纤激光器以其结构简单紧凑、体积小、工作稳定可靠、易于集成等特点,近年来在工业加工、医疗保健和军事国防等领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。光纤耦合半导体激光器抽运的光纤激光器具有电光效率高、热光畸变小、使用寿命长、结构简单等优点,因此光纤耦合半导体激光器常被选作光纤激光器的抽运源<sup>[2-3]</sup>。光纤激光器的输出功率除受增益光纤自身因素的制约外,极大地取决于抽运光源的亮度和耦合效率<sup>[4]</sup>。目前,在抽运光纤时,主要通过 $7\times 1$ 和 $19\times 1$ 光纤合束器将抽运光耦合到增益光纤中,如单臂输入光纤为芯径 $105\ \mu\text{m}$ 、NA为0.15的光纤合束器,其单臂耐受功率已突破 $200\ \text{W}$ <sup>[5]</sup>,但商用典型芯径 $105\ \mu\text{m}$ 、NA0.15尾纤输出模块功率仅为 $70\sim 100\ \text{W}$ 。因此,如能提升单臂抽运光的输入功率,将有效简化光纤激光器的系统结构,提高系统可靠性。目前,针对 $105\ \mu\text{m}$ 细芯径光纤耦合的研究中,将多个单管直接耦合进目标光纤是国内外研究者采用最多的技术路线,如德国Fraunhofer公司采用阶梯镜反射法将12个功率为 $11\ \text{W}$ 的单管耦合进芯径 $105\ \mu\text{m}$ 、NA0.22的光纤中,光纤耦合输出功率达 $100\ \text{W}$ ,耦合效率为 $80\%$ <sup>[6]</sup>。与此同时,美国nLIGHT公司采用多个单管合束技术研制出芯径 $105\ \mu\text{m}$ 、NA0.15高亮度光纤耦合输出商用成品模块,功率在 $70\sim 100\ \text{W}$ 之间可选<sup>[7]</sup>。国内一些研究单位也开展了 $105\ \mu\text{m}$ 细芯径光纤耦合研究,如中国工程物理研究院应用电子学研究所采用台阶分布等合束技术将5个单管半导体激光器的光束耦合进芯径 $105\ \mu\text{m}$ 、NA0.2的光纤中,获得的光纤耦合输出功率为 $21.8\ \text{W}$ ,对应亮度 $1.83\ \text{MW}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr})$ <sup>[8]</sup>;北京凯普林公司(BWT)针对芯径 $105\ \mu\text{m}$ 、NA0.15的光纤,利用多个单管合束技术研制出功率为 $50\ \text{W}$ 的商用成品模块<sup>[9]</sup>。然而,多个单管直接耦合技术在获得高功率的情况下所需器件数目非常多,导致装调困难和成本增加<sup>[10]</sup>。

因此,本文针对 $105\ \mu\text{m}$ 、NA0.15的细芯径多模光纤,基于双管(DL)设计了一套光纤耦合输出系统。该光纤耦合系统充分利用了慢轴(SA)方向的余量,并避免了沿慢轴方向的空间二次拼接,简化了系统结构,降低了系统集成调试难度,为细芯径高亮度光纤耦合输出研究提供了一种新思路。

# 2 系统光学设计

在理论设计和计算时,使用光束束参积(BPP,其定义为光束半宽和发散半角的乘积)来评价光束质量。根据设计要求,目标光纤为芯径 $105\ \mu\text{m}$ 、NA0.15的多模光纤,其束参积为 $7.87\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。如果要将近直后的光束高效耦合到光纤中,经过整形后光束的均方根束参积 $V_{\text{BPP,RMS}}$ 应小于目标光纤的束参积。均方根束参积可以表示为<sup>[11]</sup>

$$V_{\text{BPP,RMS}} = \sqrt{V_{\text{BPP,FA}}^2 + V_{\text{BPP,SA}}^2}, \tag{1}$$

式中 $V_{\text{BPP,FA}}$ 表示快轴方向光束束参积, $V_{\text{BPP,SA}}$ 表示慢轴方向光束束参积。由于光纤端面是圆形,如图1所示,为保证光纤耦合的高效率输出,整形后均方根束参积 $V_{\text{BPP,RMS}}$ 值应小于光纤束参积 $7.87\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。

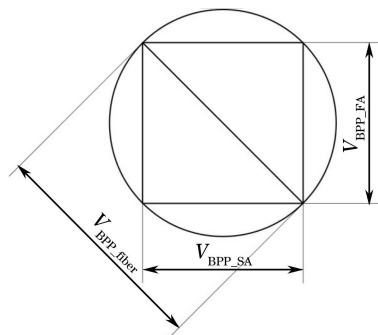


图1 光纤束参积示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber BPP

而通用典型单管快轴(FA)方向光束质量接近衍射极限,慢轴方向条宽一般在 $100\ \mu\text{m}$ 左右,发散角约 $6^\circ\sim 10^\circ$ ,对应束参积为 $2.3\sim 4\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。如果使用慢轴发散角较小的芯片,可沿慢轴方向排列两次以充分利用慢轴方向的束参积余量。然而空间拼接合束对系统装调精度要求很高,且导致系统结构复杂,因此提出

采用由 Osram 商用 min-bar 芯片切割而成的双管作为整形光源的基础单元,其结构如图 2 所示,参数如表 1 所示,其中 FWHM 为半峰全宽。

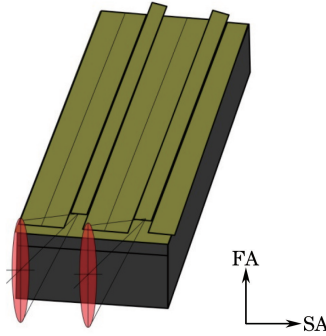


图 2 双管结构

Fig. 2 Structure of DL

表 1 芯片参数

Table 1 Parameters of the chip

Parameter	Value
Number of emitters per bar	2
Pitch	1000 $\mu\text{m}$
Single emitters area	100 $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$
Cavity length	4000 $\mu\text{m}$
Peak output power	16 W
Centre wavelength	976 nm
FWHM emission bandwidth	$\leq 4$ nm
Fast axis divergence	$42^\circ(1/e^2)$
Slow axis divergence	$6.5^\circ(1/e^2)$

采用有效焦距为 0.9 mm 的非球面快轴准直镜(FAC,LIMO 公司 FAC900)对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>[12-13]</sup>,取快轴准直后发散角为 2.5 mrad,光斑尺寸为 0.72 mm,对应束参积为 0.47 mm·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 的柱透镜阵列(SACA,INGENERIC 公司 SAC-100-1000)进行慢轴准直,准直后光束尺寸按 2 mm 计算,剩余发散角为 10 mrad,对应束参积为 5 mm·mrad。快慢轴准直如图 3 所示。

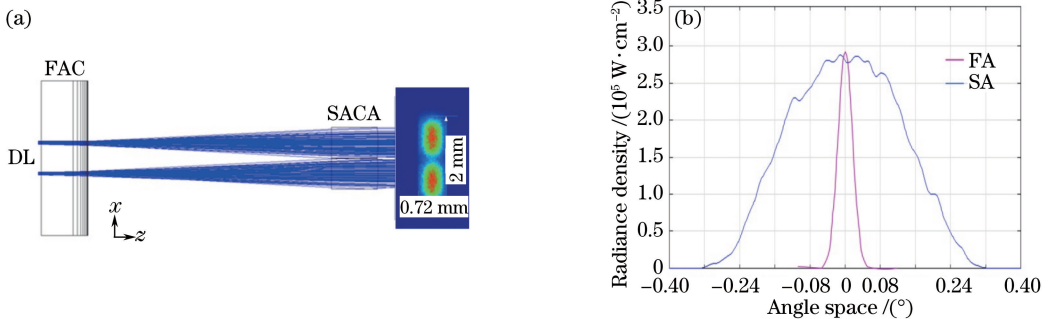


图 3 快慢轴准直。(a) 准直模拟; (b) 剩余发散角

Fig. 3 Collimation in fast and slow axes. (a) Simulation of collimation; (b) residual divergence angle

根据目标光纤(芯径 105  $\mu\text{m}$ 、NA0.15 多模光纤)的束参积和单个双管准直后的光束参数可知,快轴方向最多可排列的双管个数为 11,慢轴方向只可排列一个双管。在本设计中,使用台阶加  $45^\circ$  反射镜实现各双管光束在空间上沿快轴方向的拼接,台阶高度差为 0.75 mm,相邻两个双管沿慢轴方向的间隔为 6 mm,因此第一个双管和第  $n(n \leq 11)$  个双管之间存在  $6(n-1)$  mm 的光程差。由于慢轴方向剩余发散角为 10 mrad,

因此空间合束后第  $n$  个双管和第一个双管之间存在的光程差将导致第  $n$  个双管的光束沿慢轴方向扩展  $0.06(n-1)$ , 进而导致慢轴束参积增大, 进一步影响快轴方向的束参积容量, 因此需要重新修正快轴方向可排布的双管个数。根据(1)式的约束, 计算可得出单偏振光路快轴方向最多可排布 8 个双管, 慢轴方向可排列一个双管。将两个各含 8 个双管的单偏振光路进行偏振合束后, 使用一个 4 倍扩束系统对慢轴方向进行扩束以平衡快慢轴方向发散角。16 个双管激光器焊装在台阶式通水铜冷却热沉上。光束整形总体设计如图 4 所示。

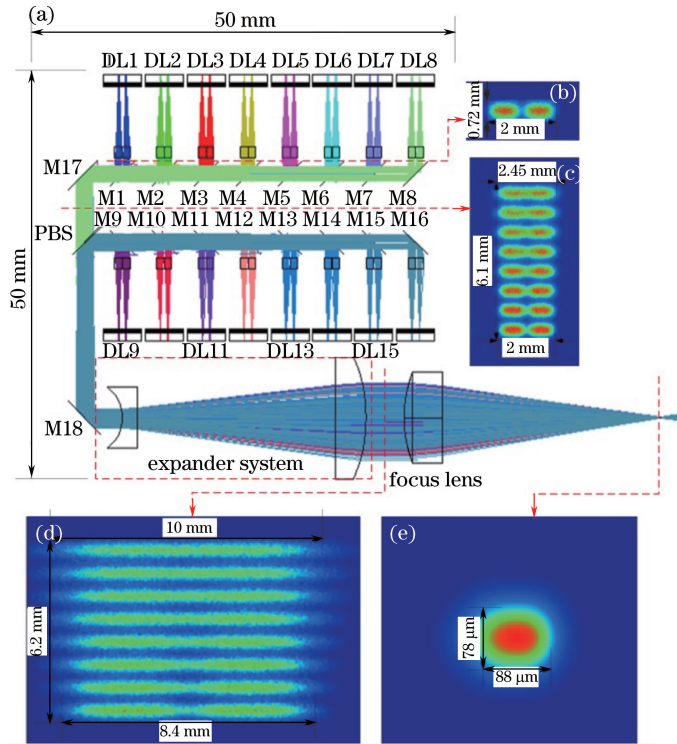


图 4 光学系统设计。(a) 系统布局; (b) 单个双管准直后光束; (c) 空间合束; (d) 慢轴扩束后光束; (e) 聚焦光斑  
Fig. 4 Optical system design. (a) System layout; (b) beam after collimation of dual-emitters; (c) spatial multiplexing; (d) beam after beam expander system; (e) focus spot

图 4 中, M 系列表示反射镜, PBS 表示偏振分光片, expander system 为慢轴 4 倍扩束系统, focus lens 为非球面聚焦镜。各光斑图像中, 图 4(b) 表示单个双管准直后的光斑形貌, 图 4(c) 表示单偏振光路空间合束后的光斑形貌, 图 4(d) 表示慢轴 4 倍扩束后的光斑形貌, 图 4(e) 是使用有效焦距 31.25 mm 的非球面聚焦镜(Edmund 公司 LENS ASPHERE 25mm  $F/1.25$ ) 聚焦后的焦斑图像。

结合图 3 和图 4 可知, 使用台阶进行空间拼接合束后, 光束快轴方向尺寸为 6.1 mm, 发散角为 2.5 mrad; 慢轴方向底端光束尺寸最小, 为 2.0 mm, 顶端尺寸最大, 为 2.45 mm, 发散角为 10 mrad。使用 4 倍扩束系统对慢轴进行扩束后, 快慢轴方向光束尺寸分别为 6.2 mm 和 10 mm, 发散角均为 2.5 mrad, 因此快慢轴方向束参积分别为  $3.87 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  和  $6.25 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ , 均方根束参积  $V_{\text{BPP,RMS}}$  为  $7.3 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ , 小于光纤束参积  $7.87 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ , 满足设计要求。系统整体光学结构尺寸为  $60 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。

使用有效焦距为 31.25 mm 的非球面聚焦镜将整形光束聚焦后所得焦斑尺寸和 NA 角如图 5 所示。由图 5 可知, 聚焦焦斑快慢轴方向的尺寸分别为  $78 \mu\text{m}$  和  $88 \mu\text{m}$ , 最大 NA 分别为 0.1 和 0.159(包含 95% 能量)。使用芯径  $105 \mu\text{m}$ 、NA0.15 的光纤进行耦合, 最高输出功率可达 170 W, 光纤前后耦合效率约为 85%。

### 3 验证实验

基于上述设计和现有器件, 采用 4 列叠层微通道封装(每列包含 4 个双管)的模块进行了验证实验, 实验装置如图 6 所示。图 6 中, DLA1~4 表示 4 列叠阵, SM1 和 SM2 表示条纹镜, 其作用是实现快轴方向光束间隙的填充,  $1/2 \lambda$  wave plate 是半波片, F 表示非球面聚焦镜。验证实验装置大小约为  $140 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。



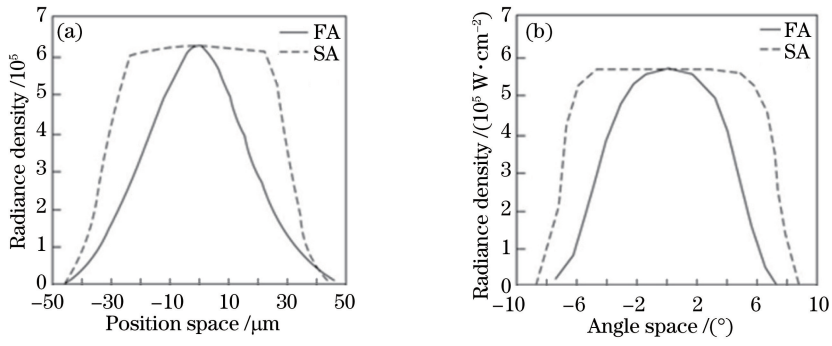


图 5 焦斑尺寸和 NA。(a) 尺寸；(b) NA 角

Fig. 5 Size and NA of focus spot. (a) Size; (b) NA angle

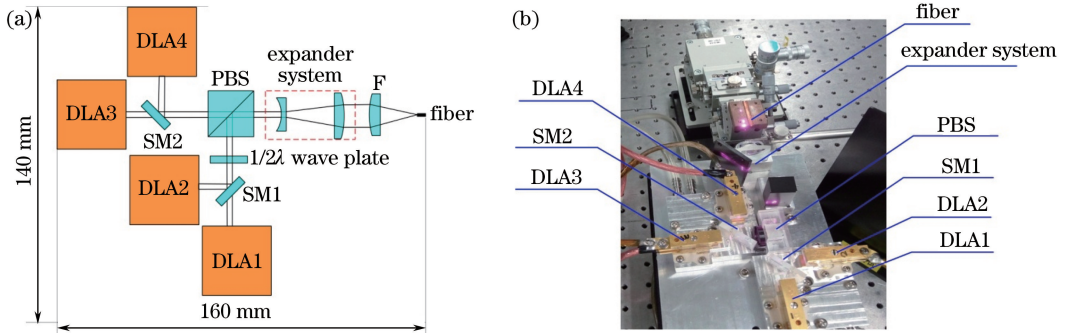


图 6 (a) 实验原理；(b) 实验装置

Fig. 6 (a) Principle of the experiment; (b) experimental setup

使用上述实验装置进行验证实验,第 1、2 列空间叠加调试过程如图 7 所示。图中近场光斑由电荷耦合器件(CCD)探测得出,远场光斑由有效焦距为 300 mm 的平凸透镜聚焦在 CCD 上得出。

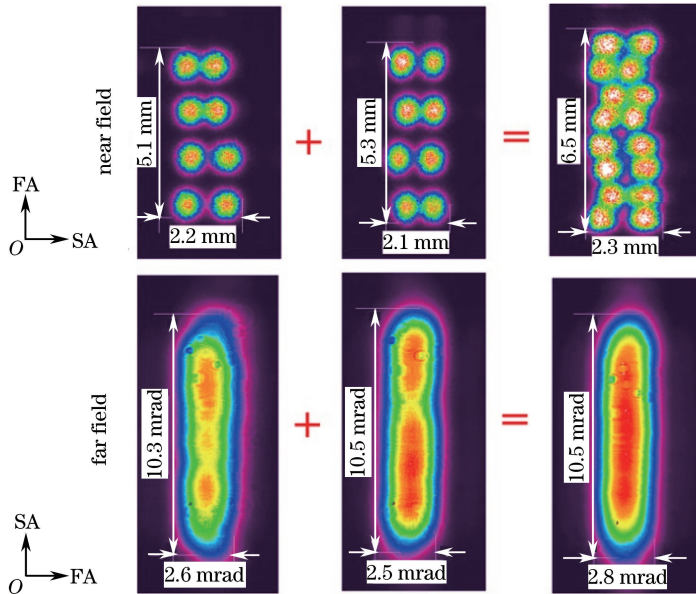


图 7 光束整形

Fig. 7 Beam shaping

为对比模拟和实验结果的差异,将各列叠阵各步骤实验调试结果与模拟设计值进行对比,如表 2 所示。

表 2 中,1+2 表示第 1 列和第 2 列叠阵空间叠加,3+4 表示第 3 列和第 4 列叠阵空间叠加,1+2+3+4 表示偏振合束,After ES 表示慢轴扩束。

表 2 实验和模拟结果比对

Table 2 Comparison between experiment and simulation results

Item	Size /mm				Residual angle /mrad			
	Theoretical value		Experimental value		Theoretical value		Experimental value	
	FA	SA	FA	SA	FA	SA	FA	SA
1	5.25	2.00	5.10	2.20	2.5	10.0	2.6	10.3
2	5.25	2.00	5.30	2.10	2.5	10.0	2.5	10.5
3	5.25	2.00	5.28	2.16	2.5	10.0	2.5	10.2
4	5.25	2.00	5.32	2.23	2.5	10.0	2.7	10.2
1+2	6.00	2.00	6.50	2.30	2.5	10.0	2.8	10.5
3+4	6.00	2.00	6.40	2.25	2.5	10.0	2.7	10.4
1+2+3+4	6.00	2.00	6.50	2.30	2.5	10.0	2.8	10.5
After ES	6.00	8.00	6.60	9.20	2.5	2.5	2.8	2.8

通过对比实验和模拟设计发现,实验所得偏振叠加后光束快轴方向尺寸为 6.50 mm,相比于设计值 6.00 mm 扩展了 0.50 mm;发散角为 2.8 mrad,相比于模拟值 2.5 mrad 扩展了 0.3 mrad。光束慢轴方向尺寸为 2.30 mm,相比于模拟值 2.0 mm 扩展了 0.3mm;发散角为 10.5 mrad,相比于模拟值扩展了 0.5 mrad。在偏振合束后,对慢轴进行 4 倍扩束以平衡快慢轴方向的分散角和尺寸。扩束后光斑快慢轴方向发散角一致,为 2.8 mrad,尺寸分别为 6.60 mm 和 9.20 mm,束参积分别为 4.62 mm·mrad 和 6.44 mm·mrad,均方根束参积为 7.92 mm·mrad,稍稍超出目标光纤束参积 7.87 mm·mrad。

根据整形后的光束参数,选择实验室现有的有效焦距 31.25 mm 非球面透镜(Edmund 公司 LENS ASPHERE 25 mm  $F/1.25$ )和芯径 105  $\mu\text{m}/125 \mu\text{m}$ 、NA0.15 的光纤进行耦合实验,输出结果如图 8 所示。

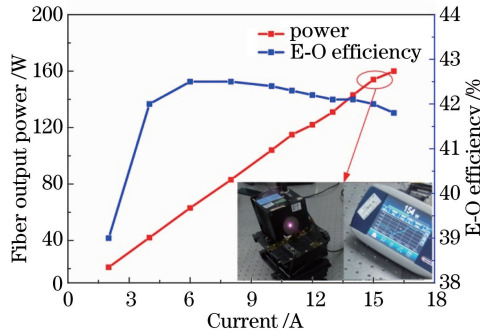


图 8 输出特性曲线

Fig. 8 Output characteristic curves

实验表明,在注入电流为 15 A 时,光纤耦合输出端可获得稳定输出功率 154 W,亮度为 25 MW/(cm<sup>2</sup>·sr),光纤前后耦合效率为 77%,对应电光效率为 42%,效率值相比于设计值偏低。造成耦合效率下降的原因如下:

1) 叠层微通道封装结构对芯片空间位置难以实现精确控制,导致各发光单元的排布不一致(如图 4 中各发光单元排列参差不齐,表 2 详细罗列了各叠阵尺寸和发散角的扩展情况),从而增大了光束尺寸,另外,发散角扩展、装调产生的指向性偏差(根据经验值,约 0.2~0.5 mrad)进一步造成尺寸扩展。快轴发散角增大主要来源于装调偏差,慢轴发散角增大不仅与装调有关,还与其发光区的多模特性有关,一般模拟建模很难准确模拟慢轴方向的光场分布。光束尺寸和发散角的扩展共同造成光束质量下降。

2) 实验中所用光纤是由裸纤直接切割出整齐端面的光纤,其端面未镀增透膜,当光束经过端面时会产生菲涅耳反射,通常光束每经过一个端面大约会损失 4% 的能量<sup>[14]</sup>,总共约造成 8% 的损失。

## 4 结 论

基于双管并使用 Zemax 软件设计了一套针对芯径 105  $\mu\text{m}/125 \mu\text{m}$ 、NA0.15 的多模光纤的光纤耦合系

统,并基于现有器件和条件使用叠层微通道封装的16个双管(4列叠阵,每列叠阵封装4个双管)进行了验证实验。模拟和实验结果共同表明,该光纤耦合模块可实现150 W功率输出,亮度达25 MW/(cm<sup>2</sup>·sr),电光效率为42%。该模块工程化后可广泛应用于在抽运光纤激光器及材料处理等领域。

## 参 考 文 献

- 1 赵尚弘, 占生宝, 石 磊. 高功率光纤激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- 2 Wang Xueli, Liu Feng, Lou Xiaoping, *et al.* The design of driving circuit for pumping fiber laser diode[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2014, 36(5): 825-827.  
王雪丽, 刘 锋, 娄小平, 等. 光纤激光器抽运源驱动电路的设计[J]. *压电与声光*, 2014, 36(5): 825-827.
- 3 Dong Wanji. The pumping source of fiber laser[J]. *Electronics World*, 2014, (4): 204-205.  
董婉佳. 光纤激光器的泵浦(抽运)源[J]. *电子世界*, 2014, (4): 204-205.
- 4 Gao Linzhu. Research progress of high power fiber laser[J]. *Optical Communication Technology*, 2011, 35(9): 22-24.  
高林柱. 大功率光纤激光器研究进展[J]. *光通信技术*, 2011, 35(9): 22-24.
- 5 Gong Zhiqun, Wang Xiaolin, Cao Jianqiu, *et al.* Characteristics of homemade high power fiber pump combiner[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2658-2662.  
龚智群, 王小林, 曹润秋, 等. 国产高功率光纤泵浦(抽运)合束器特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(10): 2658-2662.
- 6 Schroder D, Werner E, Franke A, *et al.* Roadmap to low cost high brightness diode laser power out of the fiber[C]. *SPIE*, 2010, 7583: 758309.
- 7 Price K, Karlsen S, Browmn A, *et al.* High brightness diode laser module development at nLIGHT photonics[C]. *SPIE*, 2009, 7325: 73250T.
- 8 Yu Junhong, Guo Linhui, Gao Songxin, *et al.* Research on high-power single emitter fiber-coupled diode laser[J]. *High Power and Particle Beams*, 2014, 26(5): 051005.  
余俊宏, 郭林辉, 高松信, 等. 高功率半导体激光器光纤耦合实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(5): 051005.
- 9 北京凯普林光电科技有限公司[EB/OL]. [2016-06-20]. <http://www.opticsjournal.net/Companys/c00007.htm?action=slist>.
- 10 Wang Pengcheng, Deng Yongli, Zhang Liping, *et al.* High brightness fiber coupled diode laser module[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(12): 1335-1441.  
王鹏程, 邓永丽, 张立平, 等. 高亮度半导体激光阵列光纤耦合模块[J]. *发光学报*, 2012, 33(12): 1335-1341.
- 11 Hao Mingming. Research on technologies of high power beam combination and and fiber coupling for diode laser short arrays[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.  
郝明明. 大功率半导体激光短阵列合束及光纤耦合技术的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- 12 Niu G, Fan Z W, Wang P F, *et al.* A single fiber coupling module with the output power of 50 W[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2008, 19(4): 427-429.
- 13 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.  
殷智勇, 汪岳峰, 尹韶云, 等. 微透镜变化对半导体激光器光束匀化效果的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(10): 2556-2560.
- 14 Zhu Hongbo, Liu Yun, Hao Mingming, *et al.* High efficiency module of fiber coupled diode laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32(11): 1147-1151.  
朱洪波, 刘 云, 郝明明, 等. 高功率半导体激光器光纤耦合模块[J]. *发光学报*, 2011, 32(11): 1147-1151.