

## 高功率半导体激光堆栈双波长合束及聚焦系统

米庆改, 王旭葆, 肖荣诗

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要:** 针对两种波长的直接高功率半导体激光堆栈, 为适应半导体激光在材料加工方面的需求, 设计一种双波长合束及长焦距光学系统。首先, 利用快慢轴准直镜对两种波长的激光堆栈进行初步准直, 然后, 用双波长合束镜将其合束。进而, 利用倒置开普勒望远系统原理对慢轴光束进一步扩束准直, 最终, 用快慢轴聚焦镜实现同步聚焦。利用光参数积原理对聚焦系统进行理论分析, 并根据瑞利长度公式计算出焦深。用 ZEMAX 软件对整个光路进行光线追迹, 得出模拟结果。根据理论分析和软件模拟, 开展相应实验。经合束和聚焦, 实现焦距 300 mm, 焦点尺寸 2.0 mm×4.0 mm 的聚焦光斑, 输出功率 5 000 W, 功率密度达  $10^4$  瓦级。最后讨论该系统影响因素。聚焦光斑可用于激光熔覆, 表面处理等工艺。

**关键词:** 半导体激光堆栈; ZEMAX; 光束整形; 光束聚焦

**中图分类号:** TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1218003

## Double wavelength combination and focus system of high power laser diodes stack

Mi Qinggai, Wang Xubao, Xiao Rongshi

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** A double wavelength combination and long focal length optical system was designed to combine and focus two direct high power laser diodes stacks with different wavelengths for laser material processing. First of all, the two LD stacks were collimated by fast and slow axis collimator respectively. Second, the two LD stacks were combined by double wavelength combine mirror. Then, the invert Kepler telescope system principle was applied to expand and collimate the laser beam in the slow axis direction. Finally, the fast and slow axis laser beams were focused at the same time. The focus optical system was analyzed by beam parameter product theory, and the focal depth was also be calculated by Rayleigh length formula. The whole optical path was simulated by ZEMAX software, and the simulation results were shown after ray tracing. Based on the theoretical analysis and ZEMAX simulation, the corresponding

收稿日期: 2018-07-10; 修订日期: 2018-08-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2011CB606305); 北京市教委项目(KM201310005018)

作者简介: 米庆改(1988-), 男, 博士生, 主要从事半导体激光器光束整形及激光先进制造方面的研究。Email: 348570574@qq.com

导师简介: 肖荣诗(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光先进制造及其应用方面的研究。Email: rsxiao@bjut.edu.cn

通讯作者: 王旭葆(1972-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事半导体激光器及固体激光器方面的研究。

Email: wangxubao@bjut.edu.cn

experiment were performed. After the combination and focusing, the focused spot size was 2.0 mm × 4.0 mm, and focal length was 300 mm. The final output power was 5 000 W and power density could reach to 10<sup>4</sup> W/cm<sup>2</sup>. The influence factors of this optical system were discussed finally. The focused spot can be applied to material processing, such as laser cladding and surface treatment.

Key words: laser diodes stack; ZEMAX; beam shaping; beam focus

## 0 引言

半导体激光器自 20 世纪 60 年代诞生以来,经历了飞速的发展<sup>[1-2]</sup>,主要得益于自身独特的优点,相较于其他类型的激光器,半导体激光器具有体积小,重量轻,电光转换效率高,使用寿命长等优点。单个半导体激光单元的功率较低,所以,采用阵列的形式提高功率,一维线阵,一般为 19 个单管水平排列成线阵,即巴条(LD bar),功率可达百瓦级。半导体激光发光单元以二维面阵的形式进行排列,形成堆栈(LD stack),可以将功率提升到千瓦级甚至万瓦级,可用于泵浦源<sup>[3-4]</sup>、材料加工<sup>[5-6]</sup>,如激光熔覆,激光表面处理等。然而,半导体激光器受限于自身光束质量差的问题,即快慢轴光束质量不均衡且发散角不一致,而且在排列过程中存在死区(dead zone)和“Smile”效应,光束质量进一步变差,光束在传输过程中,能量发散严重,光斑随距离不断增大,光功率密度随之下降,要想应用于激光材料加工,需对其进行光束整形以实现长焦距高功率密度的聚焦光斑。因此,针对半导体激光器的光束质量问题,出现了多种光束整形技术,大致有以下几种:提高功率密度的条形镜技术、利用全反射原理的导光管技术<sup>[7]</sup>、美国麻省理工的光谱合束技术<sup>[8]</sup>、偏振耦合技术<sup>[9]</sup>、积分镜技术等,这些方法,多用于光纤耦合<sup>[10-17]</sup>,安装要求精度高。

文中针对两种不同波长的半导体激光堆栈,利用双波长合束镜(二向色镜)和柱透镜组,实现高功率密度长焦距的聚焦光斑,以适应半导体激光在材料加工方面的需求。双波长合束镜在不改变光斑尺寸的情况下,将两种波长激光堆栈合束,功率密度提高将近一倍。根据半导体激光器自身的特点,选用柱透镜对快慢轴光束分别处理,最终实现同步聚焦。由于在激光熔覆等材料加工过程中,需要在工件上方

添加送粉,保护气体装置,所以需要相对较长的焦距容纳这些配套装置。利用光参数积原理对整个光学系统进行理论分析,计算出光学系统的聚焦光斑和焦深的理论值,并且利用 ZEMAX 软件模拟光路,最终开展实验,实现了功率 5 000 W、焦距 300 mm 的聚焦效果,功率密度显著提升,达万瓦级,可用于激光熔覆、表面处理等工艺。

## 1 光束整形原理

半导体激光堆栈是由单个发光单元排列而成的面阵,文中采用两种波长的半导体激光堆栈,808 nm 和 976 nm,由德国的 JENOPTIK 公司提供的商业化产品。利用快轴准直镜(fast axis collimator, FAC)和慢轴准直镜(slow axis collimator, SAC)初步准直。由于快轴光束的光束质量好于慢轴光束,所以,准直后快轴全角发散角小于 0.5°,慢轴发散角为 4°。快轴方向由 25 个巴条叠加在一起,发光尺寸 42 mm,慢轴方向由 19 个发光点排列而成,发光尺寸 10 mm,每个发光点间距(pitch)500 μm。单个激光堆栈功率为 2 750 W。一般用光参数积来表示半导体激光器的光束质量:

$$M_{BPP} = \frac{\omega_0}{2} \times \frac{\theta_0}{2} \quad (1)$$

式中:  $\omega_0$  为光束腰斑宽度;  $\theta_0$  为全角发散角, mrad。所以根据公式,可以求得经过 FAC 和 SAC 准直后的快慢轴光束质量:

$$M_{BPP-f} = \frac{42}{2} \times \frac{0.5 \times 17.5}{2} = 91.9 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \quad (2)$$

$$M_{BPP-s} = \frac{10}{2} \times \frac{4 \times 17.5}{2} = 175 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \quad (3)$$

双波长合束镜,即二向色镜,可以将 45°入射的两种不同波长的激光,一种波长透过,另一种反射,从而合束到一起,实现光功率密度成倍的提升。如图 1 所示。976 nm 的激光被反射,808 nm 的激光透射,最

终实现合束。

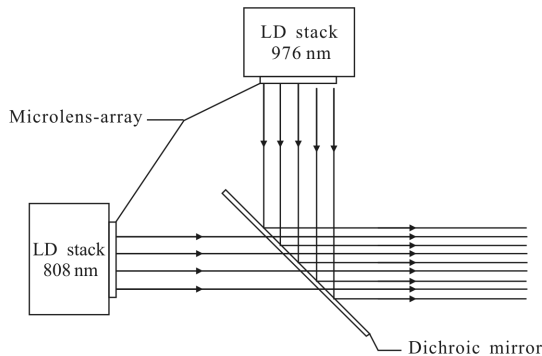


图 1 双波长合束示意图

Fig.1 Diagram of double wavelength coupling

选择短波通二向色镜,截止波长 900 nm,低于截止波长(808 nm)的光束具有高透射率,高于截止波长(976 nm)的光束具有高反射率。

合束后的激光,快慢轴的光束发散角没有发生改变,只是功率密度提升了一倍,快慢轴发散角仍为 0.5°和 4°,快轴光束发散角基本消除,可以直接聚焦,慢轴光束发散角仍然较大,需要进一步压缩发散角,利用倒置开普勒望远系统原理慢轴光束进行扩束准直,如图 2 所示。

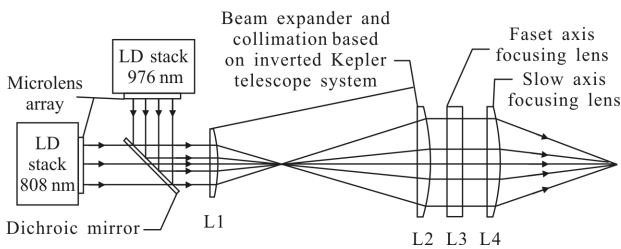


图 2 光路原理图

Fig.2 Diagram of optical path

其中 L1、L2、L3、L4 为四片平凸柱透镜,对应焦距为  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$ 。从图 2 可以看出,L1 和 L2 利用倒置开普勒原理扩束准直,显然,扩束倍数  $n=f_2/f_1$ ,由于快轴光尺寸为 42 mm,慢轴光尺寸为 10 mm,所以,笔者将慢轴光扩束 4.2 倍,使得快慢轴尺寸相同,这里选择市场常见的焦距  $f_1=60$  mm、 $f_2=250$  mm,扩束倍数约为 4.2 倍,这样扩束后,快慢轴光束尺寸基本相同。由于光斑尺寸和发散角成反比,所以扩束的同时,慢轴发散角被压缩了 4.2 倍,缩小到 0.96°。最

终,利用快慢轴聚焦镜( $f_3=350$  mm、 $f_4=300$  mm)实现快慢轴同步聚焦。根据光参数积原理,可以推导并计算出快慢轴光束聚焦后的光束发散角  $\theta'_{0-fast}$ 、 $\theta'_{0-slow}$  和光斑尺寸  $\omega'_{0-fast}$ 、 $\omega'_{0-slow}$ ,如公式(4)~(7)所示。

$$\theta'_{0-fast} = 2 \times \arctan \frac{\omega_{0-fast}}{2f_3} = 2 \times \arctan \frac{42}{2 \times 350} = 120 \text{ mrad} \quad (4)$$

$$\theta'_{0-slow} = 2 \times \arctan \frac{f_2 \cdot \omega_{0-slow}}{2f_1 f_4} = 139 \text{ mrad} \quad (5)$$

$$\omega'_{0-fast} = \frac{2M_{BPP-f}}{\arctan \frac{\omega_{0-fast}}{2f_3}} = \frac{\omega_{0-fast} \cdot \theta_{0-fast}}{2 \times \arctan \frac{\omega_{0-fast}}{2f_3}} = 3.06 \text{ mm} \quad (6)$$

$$\omega'_{0-slow} = \frac{2M_{BPP-s}}{\arctan \frac{n \cdot \omega_{0-slow}}{2f_4}} = \frac{\omega_{0-slow} \cdot \theta_{0-slow}}{2 \times \arctan \frac{\omega_{0-slow}}{2f_4}} = 5.04 \text{ mm} \quad (7)$$

当光束从束腰位置传输到光斑面积增加到 2 倍时,这段距离被称为瑞利长度,如公式(8)所示,这段距离光束近似平行传输,所以把焦深定义为瑞利长度的 2 倍。

$$Z_{\text{Rayleigh}} = \frac{f^2 \cdot \lambda}{2 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot K} \quad (8)$$

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{\omega}{2} \cdot \frac{\theta}{2}} \quad (9)$$

将公式(9)代入公式(8)得到:

$$Z_{\text{Rayleigh}} = \frac{f^2 \cdot M_{BPP}}{2 \cdot r^2} \quad (10)$$

经过计算,可得到快轴光束瑞利长度为 12.7 mm,慢轴光束瑞利长度为 17.9 mm,对应快慢轴焦深为 25.4 mm 和 35.8 mm,这里选取 25.4 mm 作为整个光束的焦深。

## 2 ZEMAX 软件模拟

根据半导体激光堆栈的参数和镜子的参数,在 ZEMAX 软件的非序列模式下模拟整个光路如图 3 所示,这里主要介绍一下二向色镜的模拟,利用 ZEMAX 软件的膜层设计功能,设计出相应膜层,使 976 nm 波长激光透射,808 nm 波长激光反射,入射角 45°,膜层的设计代码如下:

TABLE SWP

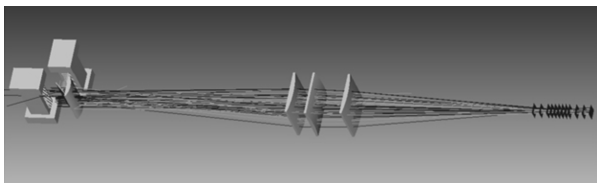
ANGL 45.0

WAVE 0.808 0.0 0.0 0.88 0.88 0.0 0.0 0.0 0.0

WAVE 0.976 0.93 0.93 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

设计完膜层后,添加到相应的合束镜上,然后利

用三维建模软件模拟各个柱面镜,并导出为 IGS 格式,导入 ZEMAX 软件,模拟出整体光路如图 3 所示。



(a) 整体光路  
(a) Whole optical path



(b) 快轴方向  
(b) Fast-axis direction



(c) 慢轴方向  
(c) Slow-axis direction

图 3 模拟光路图

Fig.3 Simulation optical path

利用 ZEMAX 软件的光线追迹功能进行光线追迹,然后再利用矩形探测器得到焦点处的光斑图,如图 4 所示,背景尺寸为 15 mm×15 mm。图 5 为快慢轴光束截面能量分布图,半峰高度对应的焦点光斑尺寸 2.0 mm×4.0 mm 的近圆形光斑,离焦位置为方形光斑,如果取 100%能量对应的焦点光斑的尺寸约为 3.0 mm×5.0 mm,其值与理论计算值基本一致。模拟出的峰值光功率密度高达  $9.075 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 。

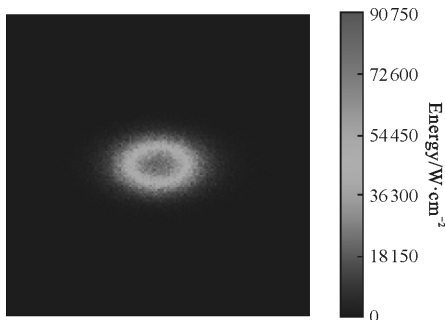
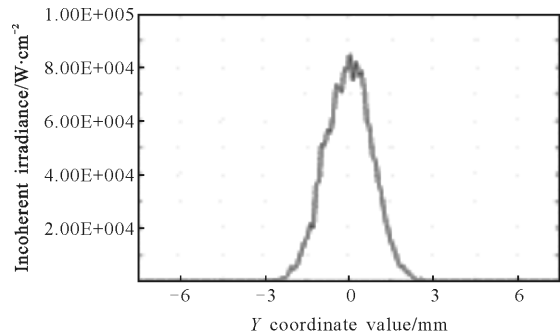
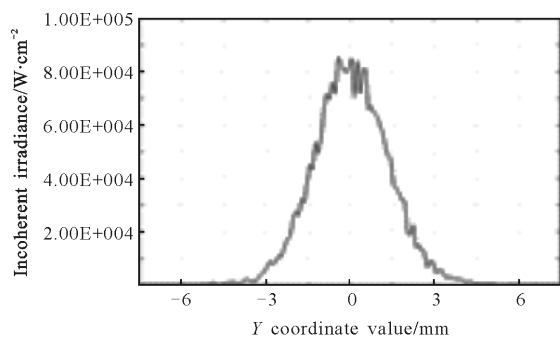


图 4 模拟焦点光斑能量分布图

Fig.4 Simulation of energy distribution of focus spot



(a) 快轴方向  
(a) Fast axis direction



(b) 慢轴方向  
(b) Slow axis direction

图 5 快慢轴能量分布曲线

Fig.5 Energy distribution curve in the slow and fast axis direction

### 3 实验

文中采用德国 JENOPTIK 公司的垂直堆栈,波长有 808 nm 和 976 nm 两种,功率均为 2 750 W。双波长合束镜(二向色镜)对 976 nm 激光反射率约为 93%,808 nm 透射率约为 88%。按照图 3 所设计光路进行实验,如图 6 所示,所用柱面镜均镀宽谱增透膜,976 nm 和 808 nm 波长激光的透过率均大于 99.9%。最终获得的双波长总功率为 5000 W,其中 808 nm 所占功率比例约为 47%,976 nm 所占功率比例约为 53%。

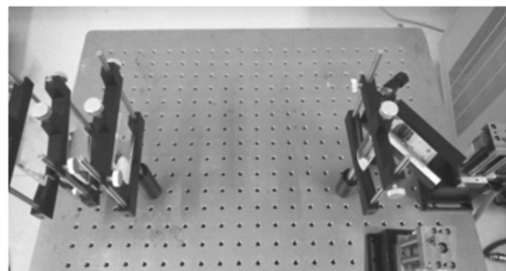


图 6 实验装置图

Fig.6 Diagram of experiment device

将最终测得的实验数据拟合成二次曲线,如图 7 所示,X 轴坐标对应距离输出镜的距离,Y 轴对应光斑尺寸,由于存在焦深,焦距基本在 300 mm 左右,焦点处光斑尺寸为 2.0 mm×4.0 mm。所有实验数据基本与理论计算值和 ZEMAX 模拟结果相一致。

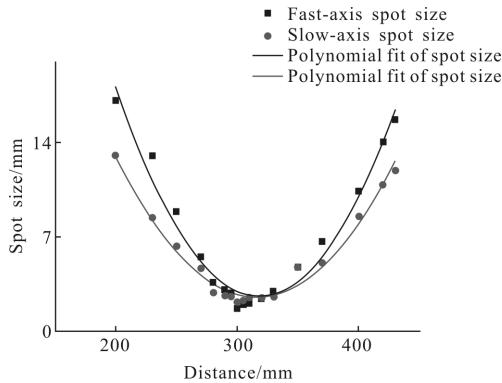


图 7 快慢轴光斑尺寸随距离的变化曲线

Fig.7 Curve of fast and slow axis spot size vary with distance

## 4 讨论

二向色镜合束效率影响因素主要有两点:所镀膜层的透过率和反射率、激光入射角。镀膜的透过率和反射率一般都达不到 100%, 不可避免地在合束过程中存在能量损失。另外是激光的入射角,镀膜要求 45°入射, 半导体激光堆栈虽然经过微透镜准直,但是毕竟还存在较小的发散角,所以,也有一部分激光的入射角跟 45°存在误差,这也造成了一部分能量损失。

影响光斑大小因素为: 半导体激光堆栈的光束质量,聚焦系统的像差,焦距长短等因素。根据聚焦光路原理的分析,可以看出,光束质量越好,最终的聚焦光斑就越小,所以,要想进一步缩小聚焦光斑,就应该提升光束质量。另外聚焦系统最后的聚焦镜 L3、L4 是球面透镜,这样就引入了球差,也一定程度上增大了焦点光斑。最后,根据光参数积原理,焦距越长,聚焦光尺寸会越大。

## 5 结论

文中通过对大功率半导体激光堆栈的双波长合束及聚焦系统的理论分析,ZEMAX 软件模拟,实验验证和讨论,最终可得出这种双波长合束及聚焦方法是可行的。经过 FAC 和 SAC 初步准直后的两种

波长(808 nm, 976 nm)的半导体激光堆栈,利用二向色镜进行了合束,提高了激光堆栈的总功率,利用倒置开普勒望远系统原理与柱透镜结合进一步扩束准直了慢轴方向光束,实现了慢轴光束的长焦距聚焦。最终,聚焦光学系统实现了 300 mm 焦距的快慢轴同步聚焦效果,焦点光斑大小为 2.0 mm×4.0 mm,焦深为 25.4 mm,峰值光功率密度达到  $9.075 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 。最终的聚焦光斑可用于激光熔覆、表面处理等工艺。今后半导体激光堆栈本身的光束质量如果能够进一步提高,光学系统的聚焦效果将更好。整个光学系统效率高、结构简单、实用性强。

## 参考文献:

- [1] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun. Advance on high power diode laser coupling [J]. Chinese Optics, 2015, 8(4): 517-534. (in Chinese)  
王立军, 彭宇航, 张俊. 大功率半导体激光合束进展 [J]. 中国光学, 2015, 8(4): 517-534.
- [2] Hai Yina, Zou Yonggang, Tian Kun, et al. Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers [J]. Chinese Optics, 2017, 10(2): 194-206. (in Chinese)  
海一娜, 邹永刚, 田锟, 等. 水平腔面发射半导体激光器研究进展 [J]. 中国光学, 2017, 10(2): 194-206.
- [3] Paul D Mason, Saumyabrata Banerjee, Klaus Ertel, et al. High energy diode-pumped solid-state laser development at the central laser facility [C]//Proceedings of SPIE, 2016, 9893: 989309.
- [4] Pietrzak A, Woelz M, Huelsewede R, et al. Progress in the development of kilowatt-class diode laser bars for pump applications [C]//Advanced Solid State Lasers Conference (Optical Society of America), 2015.
- [5] Zhu Hongbo, Hao Mingming, Zhang Jianwei, et al. Development and thermal management of 10 kW CW, direct diode laser source[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 76: 101-105.
- [6] Stephan Schneider, Ihab Kardosh, Michael Vob, et al. Power scaling of kW-diode lasers optimized for material processing applications [C]//Proceedings of SPIE, 2015, 9348: 934808.
- [7] Gao Xin, Ohashi Hiroyuki, Okamoto Hiroshi, et al. Beam-shaping technique for improving the beam quality of a high-power laser-diode stack [J]. Optics Letters, 2006, 31(11): 1654-1656.
- [8] Wang Baohua, Guo Weirong, Guo Zhijie, et al. Spectral

- beam combining of multi-single emitters [C]//Proceedings of SPIE, 2016, 9733: 97330F.
- [9] Zhu Hongbo, Li Yanhua, Hao Mingming, et al. Fiber coupled diode laser module for laser processing by polarization multiplexing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1137-1143. (in Chinese)  
朱洪波, 李艳华, 郝明明, 等. 基于偏振复用技术的半导体激光加工光纤耦合模块 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1137-1143.
- [10] Wu Yulong, Dong Zhiyong, Chen Yongqi, et al. Beam shaping for kilowatt fiber-coupled diode lasers by using one-step beam cutting-rotating of prisms [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(34): 9769-9773.
- [11] Wu Hualing, Guo Linhui, Yu Junhong, et al. Design of 500 W-output fiber-coupled diode laser module [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1005005. (in Chinese)  
吴华玲, 郭林辉, 余俊宏, 等. 500 W 级半导体激光器光纤耦合输出模块设计 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(10): 1005005.
- [12] Wu Hualing, Guo Linhui, Wang Zhao, et al. Design of a high brightness fiber-coupled diode laser based on dual-emitters [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1001012. (in Chinese)  
吴华玲, 郭林辉, 王昭, 等. 基于双管的高亮度半导体激光器光纤耦合系统设计 [J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1001012.
- [13] Yu He, Ma Xiaohui, Zhao Xin, et al. Fiber coupling module with kilowatt-output based on mini-bars [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 44(11): 1101006. (in Chinese)  
于贺, 马晓辉, 赵鑫, 等. 基于半导体激光堆栈光纤耦合技术研究 [J]. *中国激光*, 2016, 44(11): 1101006.
- [14] Shi Guanghui. Improved method for semiconductor laser coupling [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 343-352. (in Chinese)  
史光辉. 半导体激光耦合新方法 [J]. *中国光学*, 2013, 6(3): 343-352.
- [15] Zhu Hongbo, Hao Mingming, Liu Yun, et al. 808 nm high brightness module of fiber coupled diode laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(8): 1684-1690. (in Chinese)  
朱洪波, 郝明明, 刘云, 等. 808 nm 高亮度半导体激光器光纤耦合器件 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1684-1690.
- [16] Xu Dan, Huang Xuesong, Jiang Menghua, et al. 500 W fiber-coupled semiconductor laser module [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0606003. (in Chinese)  
徐丹, 黄雪松, 姜梦华, 等. 500 W 光纤耦合半导体激光模块 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(6): 0606003.
- [17] Wang Yingshun, Ren Yongxue, An Zhenfeng. Study of high brightness fiber coupled diode lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S2): S206004. (in Chinese)  
王英顺, 任永学, 安振峰. 高亮度半导体激光器的研制 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(S2): S206004.