

文章编号 1004-924X(2015)05-1279-09

## 激光加工用 5 kW 光纤耦合半导体激光器

刘友强<sup>1\*</sup>, 曹银花<sup>1</sup>, 李 景<sup>1</sup>, 邱运涛<sup>1</sup>, 秦文斌<sup>1</sup>, 王智勇<sup>1</sup>, 王大勇<sup>2</sup>, 杨光辉<sup>1,3</sup>

(1. 北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124;

2. 北京工业大学 应用数理学院, 北京 100124;

3. 中国人民解放军 96658 部队, 北京 100094)

**摘要:**针对国内大功率半导体激光光纤耦合存在的问题,设计了光纤耦合聚焦系统,研制了 5 kW 光纤耦合半导体激光器。比较了常见圆光斑光纤耦合与半导体激光方光斑光纤耦合的区别;对国产阵列型半导体激光堆栈,采用光束质量均匀化、偏振合束、多波长合束多路耦合等方式增加能量,将激光耦合进芯径为 800  $\mu\text{m}$ ,数值孔径(NA)为 0.2 的传能光纤中,实现了光纤耦合半导体激光输出光功率 5 109 W,光纤耦合效率 85.69%,系统整体电光转换效率 49.48%;在聚焦焦距为 250 mm 时其激光功率密度达到  $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ ,可以用于金属的表面重熔、合金化、熔覆和焊接等领域。该激光器除了传能光纤外,其余部件均为为国产和自主研发,对我国国产大功率光纤耦合半导体激光器的开发具有重要的推动作用。

**关键词:**激光加工;半导体激光器;光纤耦合;激光焊接;激光熔覆

**中图分类号:** TN248.4; TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152305.1279

## 5 kW fiber coupling diode laser for laser processing

LIU You-qiang<sup>1\*</sup>, CAO Yin-hua<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, QIU Yun-tao<sup>1</sup>, QIN Wen-bin<sup>1</sup>,  
WANG Zhi-yong<sup>1</sup>, WANG Da-yong<sup>2</sup>, YANG Guang-hui<sup>1,3</sup>

(1. *Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;*

2. *College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;*

3. *Troop 96658, the Chinese People's Liberation Army, Beijing 100094, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: liuyouqiang@bjut.edu.cn*

**Abstract:** To overcome the shortcomings of the optical fiber coupling of a domestic higher power diode laser, an optical fiber coupling focusing system was designed and a 5 kW optical coupling diode laser was developed. The optical fiber coupling methods by common circle spot and diode laser squarespot were compared. For a domestic array diode laser stack, the optical quality homogenization, polarization beam bunching, multi-wavelength bunching were used to increase the energies, by which the laser can be coupled into the optical fiber with a core diameter of 800  $\mu\text{m}$  and a Numerical Aperture (NA) of 0.2. Thus, the fiber coupled output power reaches 5 109 W, the fiber coupling efficiency is

**收稿日期:** 2015-01-16; **修订日期:** 2015-03-13.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(No. 61006040); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(No. NCET-09-0002); 北京市教委面上项目(No. KM201110005017); 科研基地建设-科技创新平台-光纤激光器研究平台-高功率全光纤激光器的开发项目(No. PXM2011-014204-09-000060)

85.69%, and the electro-optic conversion efficiency of overall system is 49.48%. Moreover, the power density reaches  $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  when focal length is 250 mm. The laser has been used in multi-wavelength surface remelting, metal alloying, laser cladding and laser welding fields. All the parts of the laser are made in China except the optical fiber for energy transfer, so it promotes the progress of higher power domestic optical fiber coupling lasers.

**Key words:** laser processing; diode laser; fiber coupling; laser welding; laser cladding

## 1 引言

在同等焊接条件下,光纤耦合半导体激光器的焊接速度比快轴流  $\text{CO}_2$  激光器高 1.2 倍以上<sup>[1]</sup>;焊接厚板金属材料时,其焊缝成型及焊接过程的稳定性也优于光纤激光器<sup>[2]</sup>。目前,用半导体激光实现光纤传输进行柔性加工是半导体激光加工的发展方向,国外已经有 10 kW 的光纤耦合产品,但国内 4 kW 以上的光纤耦合半导体激光器还未见报道。

美国 nLIGHT 公司利用半导体激光单管进行光纤耦合的研究,目前该公司光纤模块的输出光功率可达 1 kW,芯径为 400  $\mu\text{m}$ ,数值孔径(NA)为 0.2<sup>[3]</sup>。2011 年,德国 DILAS 曾经利用 mini-bar 进行光纤耦合的研究,把 1 200 W 的单波长激光耦合到 400  $\mu\text{m}$ ,NA 为 0.22 的光纤中<sup>[4]</sup>。2013 年 5 月,DILAS 推出了一款采用微通道冷却的光纤耦合多阵列模块,其最大输出功率高达 6 kW,采用 NA 为 0.22,芯径为 1 000  $\mu\text{m}$  的光纤<sup>[5]</sup>。德国 Laserline 公司利用自行研制的扇形平板光束质量整形系统对半导体激光阵列进行了光纤耦合的研究,研制出的光纤耦合模块是目前光纤出射半导体激光功率最高的器件,并且实现了商业化应用。该激光器的出光功率为 2 kW,光纤芯径仅为 400  $\mu\text{m}$ ,NA 为 0.1;出光功率甚至可达 10 kW,光纤芯径为 600  $\mu\text{m}$ ,NA 为 0.2<sup>[6]</sup>。美国 Apollo instrument 公司利用传导冷却半导体激光阵列进行光纤耦合,报道的最大输出功率达到 10 kW,光纤芯径为 1 mm<sup>[7]</sup>。德国 LIMO 公司也使用传导冷却半导体激光阵列来进行光纤耦合,将 1 200 W 的激光耦合到 200  $\mu\text{m}$  的光纤中,NA 为 0.22<sup>[8]</sup>,美国 TeraDiode 公司则利用光栅光谱合束技术(WBC)对垂直叠阵进行了光纤耦合,将 2 030 W 的激光耦合到芯径为 50  $\mu\text{m}$ ,NA 为 0.15 的光纤中,光束质量仅为 3.75 mm $\cdot$ mrad<sup>[9]</sup>。

国内对半导体激光光纤耦合技术的研究与国外相比虽有较大差距,但也取得了一定的进展,并已获得千瓦量级的激光耦合输出。长春光机所的科研人员利用光束准直、光束分割重排和偏振合束技术将两个 CS 封装的半导体激光阵列耦合到芯径为 400  $\mu\text{m}$ ,NA 为 0.22 的光纤中,出光功率为 55.8 W<sup>[10]</sup>。2012 年,郝明明通过 BTS 转换技术将 107 W 的半导体激光耦合进 22 mm $\cdot$ mrad 的光纤中<sup>[11]</sup>。2013 年,张志军仍然通过 BTS 技术和波长耦合技术将 4 波长 2 218 W 的激光耦合进芯径为 600  $\mu\text{m}$ ,NA 为 0.22 的光纤中<sup>[12]</sup>。长春理工大学通过激光准直、光束整形等技术将垂直叠阵出射的激光耦合到芯径为 400  $\mu\text{m}$ ,NA 为 0.22 的光纤中,输出功率为 195 W。北京工业大学利用光束整形、波长耦合和偏振耦合技术将垂直叠阵的半导体激光耦合进芯径为 600  $\mu\text{m}$ ,NA 为 0.22 的光纤中,实现了 664 W 的激光输出,光纤耦合效率为 85.9%<sup>[13]</sup>。中国工程物理研究院利用 mini-bar 叠阵空间耦合将两个还有 20 个 mini-bar 的叠阵耦合进 1 mm,NA 为 0.22 的光纤中,输出功率为 1 360 W,光纤耦合效率接近 80%<sup>[14]</sup>。张俊等通过三波长合束实现了输出功率为 500 W,光束质量为 12.44 mm $\cdot$ mrad 的半导体激光光源<sup>[15]</sup>。

比较国内外光纤耦合半导体激光模块的输出功率和光束质量可以看出,国内在半导体激光器技术方面的研究相对比较落后,因此目前国内的光纤耦合模块大部分依赖进口,从而制约了国内光纤激光器、全固态激光器、半导体激光加工业的发展。为了振兴国民经济、提高自主研发能力,需要加大半导体激光光纤耦合技术的研究力度。本文设计了半导体激光光纤耦合聚焦系统,实现了 5 kW 左右的光纤耦合输出。

## 2 激光光纤耦合理论

根据几何光学的原理,若要把激光耦合进光

纤并且达到较为理想的耦合效率,必须满足一定的耦合条件,即激光光束的入射直径应小于光纤的芯径,并且进入光纤中的光在传输过程中必须满足全反射条件。

激光的光纤耦合条件可以表示为:

$$D_{in} < D_{core}, \quad (1)$$

$$\frac{\theta_{in}}{2} < \arcsin(NA). \quad (2)$$

激光光纤耦合条件如图 1 所示。

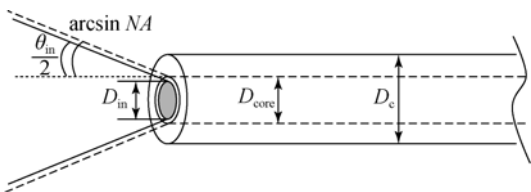


图 1 激光光纤耦合条件

Fig. 1 Fiber coupling conditions for lasers

传能光纤有自身的光束参数乘积,可以表示为:

$$BPP_{fiber} = \frac{D_{core}}{2} \times NA. \quad (3)$$

因此,如果将大功率激光耦合进传能光纤,必须满足入射光束的光束参数乘积  $BPP_{laser}$  小于光纤固有的光束参数乘积  $BPP_{fiber}$ ,即:

$$\frac{D_{in}}{2} \cdot \frac{\theta_{in}}{2} < \frac{D_{core} \cdot NA}{2}. \quad (4)$$

光束质量满足要求后,还要设计合理的扩束和聚焦系统,使得聚焦光斑和发散角分别满足光纤耦合的条件。如果入射光斑的直径大于传能光纤的芯径,比芯径大的光将直接入射到传能光纤的包层中,造成光功率的损失和耦合效率的降低,包层材料中的光在传输过程中很可能会泄露到涂层中烧毁光纤。同样地,如果入射光束的发散角大于光纤的 NA,部分激光在光纤传输过程中将不满足全反射条件,这部分光将从纤芯溢出到包层中,造成光功率的损失和耦合效率的降低,而包层材料中的光在传输过程中很可能会泄露到涂层中烧毁光纤。

与传统激光的圆光斑不同,经过光束均匀化并准直聚焦后的半导体激光在焦点处近似为矩形光斑,而典型的光纤纤芯为圆形,矩形光斑与圆形光纤的匹配成为影响光纤耦合效率的一个关键因素。如果单纯为了提高耦合效率,可以增加光纤的芯径和 NA,但是这样将使光纤输出端的光束质量变差,经过传输后激光的功率密度降低。因

此,必须在保证输出激光功率密度的基础上来提高光纤的耦合效率。

通过传能光纤来传输大功率激光的目的是为了增加激光的柔性加工能力,不能以降低功率密度为代价,应该在保证激光功率密度和提高激光的光纤耦合效率之间找一个平衡点。

大功率传能光纤的 NA 为 0.18~0.23,随波长的不同会略有区别,半导体激光用传能光纤的 NA 一般为 0.2。因此在半导体激光的光纤耦合设计时,首先考虑 NA 的要求,然后根据不同激光的光束质量,得到不同的聚焦光斑尺寸,再根据聚焦光斑尺寸来选择合适芯径的光纤。

光纤选择时需要考虑以下几个原则:

- (1) 半导体激光聚焦光斑的任意一边的长度要小于光纤直径,否则会造成较大的功率损耗;
- (2) 半导体激光聚焦光斑的对角线长度不能大于光纤直径,否则会大大降低光功率密度;
- (3) 要保证传能光纤对损耗激光的承受能力和系统的稳定性与寿命;

在保证上述条件的基础上,尽量选择小芯径的光纤,从而保证出射激光的光功率密度。

### 3 5 kW 光纤耦合半导体激光器的设计

#### 3.1 整体设计思路

在高光束质量直接大功率半导体激光器技术的基础上,本文采用平板玻璃堆与棱镜组合式均匀化装置<sup>[16]</sup>和多光束合成技术获得了大功率半导体激光输出,再经过光学聚焦系统,实现了大功率激光的光纤耦合输出。最后通过对激光器激光头、光纤耦合系统、激光电源和冷却系统等进行实时计算机集成控制,研制出工业实用型 5 kW 光纤耦合输出大功率半导体激光器,其核心的光路系统工艺流程如图 2 所示。

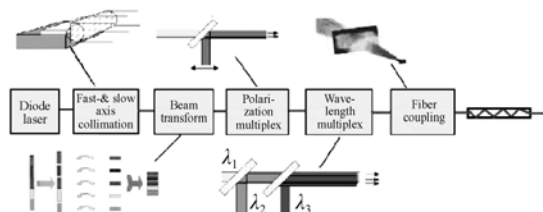


图 2 大功率光纤耦合半导体激光器的总体结构图

Fig. 2 Overall design concept of high-power fiber-coupled diode laser

阵列型大功率光纤耦合半导体激光器主要由激光阵列、光束均匀化装置、激光合束系统、光纤耦合系统、准直聚焦输出系统 5 部分组成。

初始激光阵列光源为典型的 20% 填充因子的 cm-bar, 每个 bar 包含 19 个发光点, 发光单元宽度为 100  $\mu\text{m}$ , 发光点的间距为 500  $\mu\text{m}$ 。慢轴发散角(全角)按照  $12^\circ$ , 半角  $6^\circ=104.7 \text{ mrad}$ 。

单个发光点慢轴的光束质量为:

$$BPP_{\text{emitter,slow}} = 0.05 \text{ mm} \times 104.7 \text{ mrad} = 5.235 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (5)$$

未加慢轴准直镜的慢轴光束质量为:

$$BPP_{\text{bar,slow}} = \frac{5.235 \times 19}{20\%} = 497.325 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (6)$$

放慢轴准直后,慢轴的填充因子接近 100%, 此时慢轴的光束质量为:

$$BPP_{\text{bar,slow}} = 5.235 \times 19 = 99.465 \approx 99 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (7)$$

激光阵列中激光 bar 的排列方式即快轴的间距决定了激光阵列快轴的光束质量。激光 cm-bar 的额定输出功率为 80 W/bar, 考虑到“Smile”效应以及快轴指向性的影响,快轴光束质量约为 1.3 mm · mrad,慢轴经过消暗区后的光束质量约为 99 mm · mrad。考虑到系统的损耗,5 kW 系统采用 6 路激光进行合束,选用比较成熟的 940,980,1 020 nm 3 个波长的激光阵列,每个阵列包含 13 个 bar,所有 bar 裸堆的输出功率理论上可以达到 6 240 W。

系统中所用 bar 的焊接、快慢轴准直微透镜的安装及激光阵列的封装均在北京工业大学完成,所有单元器件都实现了可控、可选,为光纤耦合提供了强有力的保证。

均匀化后的两个相同波长的半导体激光阵列发出的激光通过偏振耦合的方式实现了耦合合束,在不改变光束质量的情况下实现功率加倍。经过偏振合束的半导体激光再通过波长合束系统实现 3 波长的合束,最终实现 6 路激光阵列的多路合束。

大功率半导体激光经过光纤耦合系统聚焦,

光斑尺寸和 NA 必须同时满足光纤的芯径和数值孔径。为满足设计要求,光纤的芯径为 800  $\mu\text{m}$ , NA 为 0.2。经过前期 ZEMAX 模拟,聚焦耦合前的光斑尺寸为 25 mm × 25 mm,采用焦距为 100 mm 的聚焦耦合系统,经过聚焦后的光斑尺寸约为 0.56 mm × 0.56 mm(由于聚焦光斑两个方向的能量分布是不一样的,慢轴方向近似为平顶分布,快轴方向近似为高斯分布,从能量的分布图上显示的视觉效果是长方形。光斑尺寸严格按照光斑半径的定义获得,一个方向为 0.562 mm,另一个方向为 0.564 mm,这里均近似为 0.56 mm,对角线为 0.792 mm,NA 也满足要求,能够实现光纤耦合,如图 3 所示。

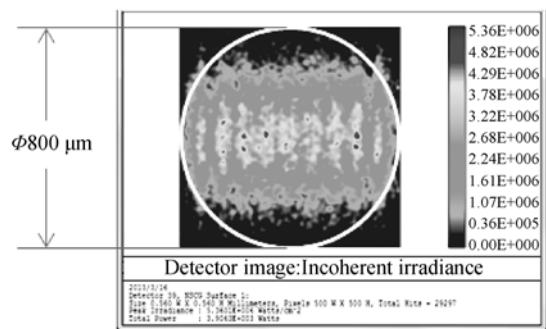


图 3 光纤耦合聚焦系统的聚焦光斑模拟图

Fig. 3 Focal spot diagram of fiber coupling focusing system

### 3.2 光纤耦合聚焦系统设计

聚焦耦合的设计是实现光纤耦合,保证光纤耦合效率的关键步骤。首先需要确定聚焦系统的焦距,焦距需要根据合束后准直光的光斑尺寸、合束后的光束质量、光纤的芯径共同来决定。

光束进行光纤耦合时,必须满足公式(4),那么理论上应该有:

$$BPP_{\text{beam}} \leq BPP_{\text{fiber}} = \frac{d_{\text{core}}}{2} \cdot NA_{\text{fiber}}. \quad (8)$$

聚焦光束的数值孔径可以表示为:

$$NA_{\text{beam}} = \frac{\Phi_{0.98}}{2 \times f_f}, \quad (9)$$

其中:  $NA_{\text{fiber}}$  为光纤的数值孔径,  $NA_{\text{beam}}$  为聚焦光束的数值孔径,  $\Phi_{0.98}$  为聚焦前光束的光斑直径,  $f_f$  为聚焦耦合光学系统的焦距。

光束耦合进光纤的条件为:  $NA_{\text{beam}} \leq NA_{\text{fiber}}$ 。由公式(8)和公式(9)可以得出聚焦耦合光学系统的焦距为:

$$f_i \leq 0.25 \times \frac{d_{\text{core}} \cdot \Phi_{0.98}}{BPP_{\text{beam}}} \quad (10)$$

根据光学设计模拟和光束质量的计算结果,聚焦前的光斑尺寸大约为  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ ,快慢轴的光束质量大约为  $50 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,通过式(10)可得:

$$f_i \leq 0.25 \times \frac{d_{\text{core}} \cdot \Phi_{0.98}}{BPP_{\text{beam}}} = 100 \text{ mm}. \quad (11)$$

该耦合系统的设计难度较大,主要体现在以下几个方面:(1)多波长:该系统中有多个波长,设计过程中必须考虑色差的影响;(2)慢轴的发散角随功率的增加和热效率而变化,设计过程中必须考虑发散角的影响;(3)入射光斑大,聚焦耦合前的光斑尺寸与焦距的比例较大,设计过程中的像差校正难度大;(4)功率高,该系统是为 5 kW 以上大功率激光器设计的,设计过程中必须考虑镜片的损伤阈值、耐热性等因素。

由于大功率半导体激光器的稳定性是一项至关重要的指标,因此在聚焦镜系统镜片材料的选取上需要考虑镜片的损伤阈值、耐热性、热膨胀系数等指标。

在光纤耦合聚焦镜系统的设计中,由于光斑的尺寸和焦距的比例较大,球差成为影响优化效果的重要指标。校正球差需要正负透镜的结合,并且原则上透镜数量越多,像差校正的质量越好;但是镜片数量越多,其加工成本和功率损耗将越大,所以综合考虑以上因素,本系统采用三片式物镜作为模拟优化的初始结构。

将系统的焦距和数值孔径设为优化参数,将初始结构中的镜片曲率和镜片间距设为初始变量进行优化。焦距设为 100 mm,最后一面到达焦点位置的 NA 设为 0.2,优化权重都设为 1,最终得到的优化结构如图 4 所示。优化后的总列图如图 5 所示,塞德尔系数如表 1 所示。

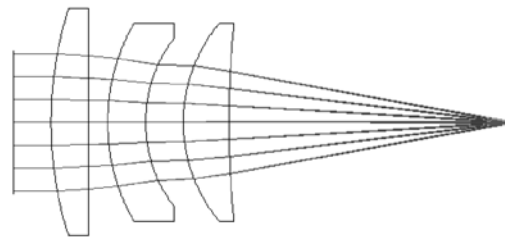


图 4 光纤耦合聚焦系统的优化结构

Fig. 4 Optimized structure of fiber coupling focusing system

表 1 优化后的塞德尔系数

Tab. 1 Optimized Seidel aberration coefficients

Surf	SPHA	S1	COMA	S2	ASTI	S3	FCUR	S4	DIST	S5	CLA (CL)	CTR (CT)
1	-0.000 000		-0.000 000		-0.000 000		-0.000 000		-0.000 000		-0.000 000	-0.000 000
STO	0.024 413		0.000 396		0.000 006		0.000 009		0.000 000		-0.002 369	-0.000 038
3	0.005 302		-0.000 191		0.000 007		-0.000 000		-0.000 000		-0.001 034	-0.000 037
4	0.024 238		0.000 374		0.000 006		0.000 017		0.000 000		-0.002 882	-0.000 044
5	-0.164 779		-0.002 071		-0.000 026		-0.000 025		-0.000 001		0.004 248	0.000 053
6	0.100 070		0.001 662		0.000 028		0.000 022		0.000 001		-0.003 571	-0.000 059
7	0.017 749		-0.000 424		0.000 010		-0.000 004		-0.000 000		-0.001 203	0.000 029
IMA	0.000 000		0.000 000		0.000 000		0.000 000		0.000 000		0.000 000	0.000 000
TOT	0.006 992		-0.000 253		0.000 031		0.000 020		0.000 000		-0.006 810	-0.000 023

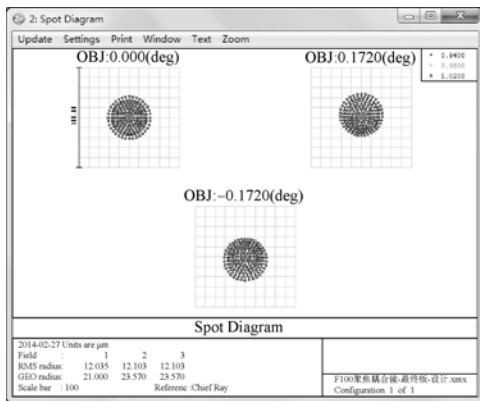


图 5 优化后的点列图  
Fig. 5 Optimized spot diagram

光纤连接器是高功率光纤耦合激光器系统的关键部分,本文中的光纤连接器选用瑞典 Optoskand 提供的芯径为  $800\ \mu\text{m}$ , NA 为 0.2 的 QBH 传能光纤。该光纤连接器的入射端和出射端均能进行水冷,可以有效防止光纤耦合过程中激光能量损耗对光纤本身的损伤。

#### 4 测量实验与结果

##### 4.1 光束质量的测量结果与分析

首先,将 6 路激光进行合束,光束质量的测量结果如图 6 所示。

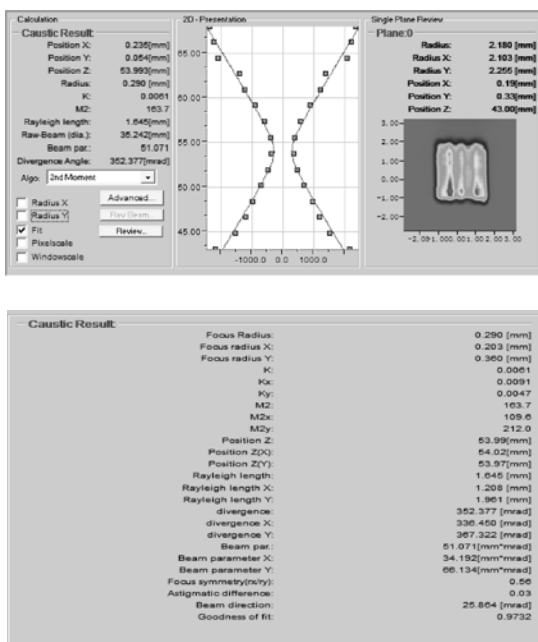


图 6 半导体激光器光纤耦合前光束质量的测量结果  
Fig. 6 Measurement results of beam quality of diode laser before fiber coupling

根据光束质量诊断仪的放置方式,图 6 中 X 方向为半导体激光的快轴方向, Y 方向为半导体激光的慢轴方向。从图 6 可以看出,快慢轴的光束质量分别为  $34.19, 66.13\ \text{mm} \cdot \text{mrad}$ , 均小于芯径为  $800\ \mu\text{m}$ , NA 为 0.2 的传能光纤所对应的光束质量  $80\ \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。因此,从光束质量的角度考虑,该激光光束可以耦合进该传能光纤。经过聚焦后快慢轴的焦点光斑半径分别为  $0.2, 0.36\ \text{mm}$ , 均小于光纤的芯径  $800\ \mu\text{m}$ 。因此,从聚焦光斑尺寸的角度考虑,该激光光束可以耦合进该传能光纤。

##### 4.2 单路激光光纤耦合实验及分析

将合束后的 6 路激光耦合进芯径为  $800\ \mu\text{m}$ , NA 为 0.2 的传能光纤,调整耦合系统与光束对准,当整体出光功率达到最大时,每一路激光的出光功率及耦合效率的测量结果如表 2 所示。

表 2 单路耦合效率的实验测量结果

Tab. 2 Experimental results of coupling efficiency of every single stack

	Power/W			Fiber coupling efficiency/%
	Bare stack	Before fiber coupling	After fiber coupling	
1	1 153	1 019	846	83.02
2	1 148	986	833	84.48
3	1 080	997	929	93.18
4	1 094	999	857	85.79
5	1 080	980	864	88.16
6	1 072	981	872	88.89
Total	6 627	5 962	5 201	87.24

从表 2 可以看出,每一路的光纤耦合效率并不完全相同,其中第 3 路的光纤耦合效率最高,这是因为在光纤耦合过程中,选用了第 3 路激光作为基准进行光路调整。由此可知,每一路激光的耦合效率都有提高的空间,如果单独以某一路进行光纤耦合,都可以达到更高的耦合效率。通过优化结构以及调整方式,可以进一步提高系统的光纤耦合效率。

##### 4.3 5 kW 激光光纤耦合输出结果及分析

将 6 路激光同时输出,在不同电流下测量输出功率及对应的耦合效率,结果如表 3 和图 7 所示。

表 3 不同电流下光纤耦合效率的测量数据

Tab. 3 Measurement data of coupling efficiency under different currents

Current/A	Input power/W	Output power/W	Coupling efficiency/%
10	239.3	213	89.01
20	1 002.6	886	88.37
30	1 801	1 586	88.06
40	2 612	2 286	87.52
50	3 443	2 999	87.10
60	4 287	3 716	86.68
70	5 129	4 416	86.10
80	5 962	5 109	85.69

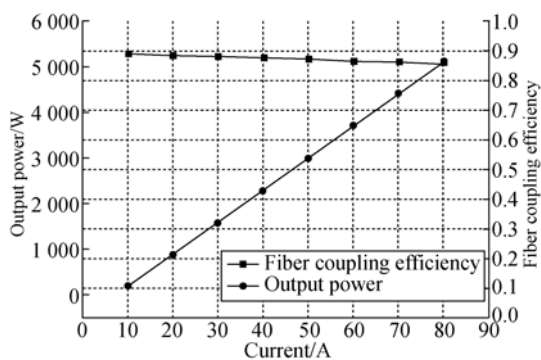


图 7 5 kW 光纤耦合半导体激光器的输出功率与耦合效率曲线

Fig. 7 Output power and coupling efficiency curves of 5 kW fiber coupled diode laser

从图 7 可以看出,光纤耦合的输出功率随电流的增加呈线性增长,当电流为 80 A 时,最大输出功率为 5 109 W,光纤聚焦耦合效率为 85.69%。

由表 2 可知,分别测量单路激光后求和得到的总功率为 5 201 W;由表 3 可知,多路激光同时输出激光得到的功率为 5 109 W。单路激光分别测得的功率求和与多路激光同时输出激光得到的功率是不同的,其原因有多种;但有一种是确定的,即合束镜片的效率随着激光功率的增加会略有降低,比如偏振镜片、波长合束镜片。

5 kW 光纤耦合半导体激光器系统整体出光时的照片如图 8 和图 9 所示。

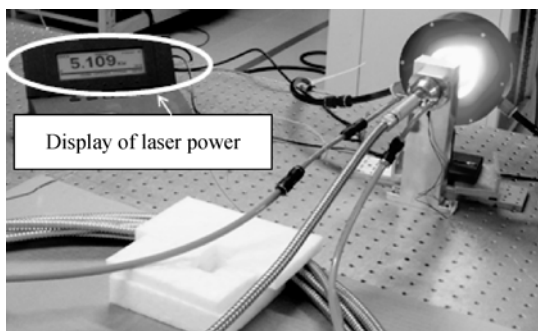


图 8 5 kW 光纤耦合半导体激光器输出功率的测量实物图

Fig. 8 Output power measurement of 5 kW fiber coupled diode laser

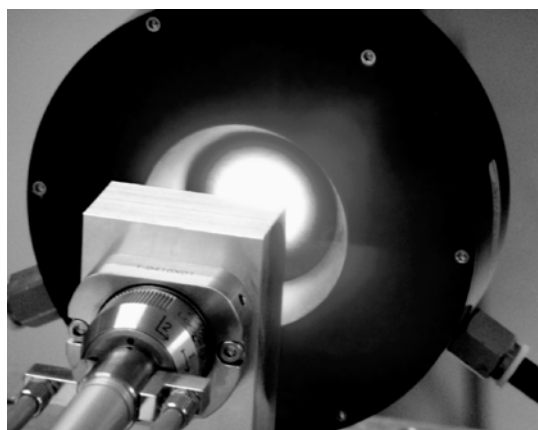


图 9 半导体激光光纤耦合输出光斑实物图

Fig. 9 Output diode laser spot after fiber coupling

采用 6 路激光合束,裸堆整体的输出功率为 6 627 W,光纤耦合前的功率为 5 962 W,耦合前系统的光-光效率达到 89.97%。将合束后的激光耦合进芯径为 800 μm,NA 为 0.2 的传能光纤中,当输出电流为 80 A 时,光纤耦合输出的激光功率达到 5 109 W,光纤耦合效率为 85.69%。

5 kW 光纤耦合半导体激光器如图 10 所示。

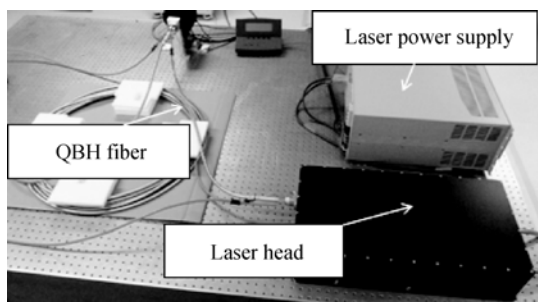


图 10 5 kW 光纤耦合半导体激光器实物图

Fig. 10 Photo of 5 kW fiber-coupled diode laser

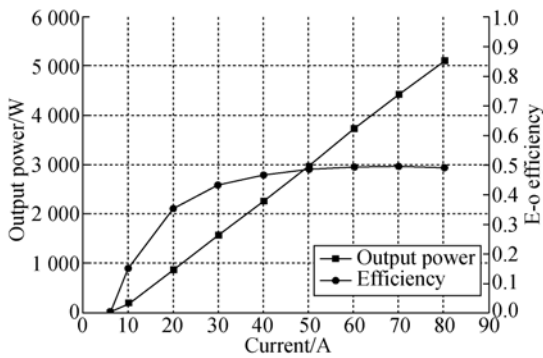


图 11 5 kW 光纤耦合半导体激光器的电光效率曲线

Fig. 11 Electro-optical efficiency curves of 5 kW fiber-coupled diode laser

5 kW 光纤耦合半导体激光器的电光效率曲线如图 11 所示。当电流的额定输出为 80 A 时,系统整体的电光转换效率可达 49%;在输出电流为 70 A 时,光纤耦合的输出功率为 4 416 W,此时系统整体的电光转换效率最高,达到 49.48%。

为了考察激光器连续工作的稳定性,对激光器进行了连续开机测试。首先将激光器的输出功率设置为总输出功率的 70%,即 3.5 kW,不间断连续出光时间为 1.5 h,功率在 3.51 kW 与 3.49 kW 之间波动;然后在持续出光的情况下将输出功率提高到总输出功率的 80%,即 4 kW,继续不间断连续出光 1 h,功率稳定在 3.99 ~

4.0 kW,功率稳定性在 0.3%之内,由此达到了工业加工的要求。目前,该激光器已经交付使用。

## 5 结 论

本文针对国内大功率半导体激光光纤耦合存在的难题,结合工业应用需求和半导体激光器的结构特性,研制了 5 kW 光纤耦合半导体激光器。比较了传统圆光斑光纤耦合与半导体激光方光斑光纤耦合的区别,对国产阵列型半导体激光进行堆栈,采用光束质量均匀化、偏振合束、多波长合束等多路耦合增加能量的方式,通过自行设计的光纤耦合聚焦系统,实现了光纤耦合输出功率为 5 109 W 的大功率半导体激光器系统。其耦合光纤芯径为 800  $\mu\text{m}$ , NA 为 0.2,光纤耦合效率为 85.69%,系统整体的电光转换效率为 49.48%。加工头聚焦镜焦距为 250 mm 时该激光器的功率密度能达到  $2 \times 10^5 \text{ W}/\text{cm}^2$ ,可以用于金属的表面重熔、合金化、熔覆和焊接等领域。该激光器除传能光纤外,激光堆栈、光束均匀化装置、光纤耦合聚焦系统均为自主研发,本研究推动了我国国产大功率光纤耦合半导体激光器的发展。

## 参考文献:

- [1] 徐国建,钟立明,杭争翔,等. 镀锌钢板的光纤耦合半导体激光焊接性能[J]. 激光与光电子学进展, 2014,51:071402.  
XU G J, ZHONG L M, HANG ZH X, *et al.*. Welding performances of galvanized sheet using the fiber coupled diode laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51: 071402. (in Chinese)
- [2] 徐国建,钟立明,杭争翔,等. 光纤耦合半导体激光的焊接性能[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51:061404.  
XU G J, ZHONG L M, HANG ZH X, *et al.*. Welding performances of fiber coupled diode laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51: 061404. (in Chinese)
- [3] PRICE K, PFEFFER F, LEISHER P, *et al.*. KW-class industrial diode lasers comprised of single emitters [J]. *SPIE*, 2010,7583:75830E.

- [4] KOENNING T, ALEGRIA K. Macro-channel cooled, high power, fiber coupling diode lasers exceeding 1.2 W of output power [J]. *SPIE*, 2011,7918:79180E.
- [5] OFweek 激光网. 德国 DILAS 最新光纤耦合多阵列模块最大输出功率可达 6 kW [N/OL]. <http://laser.ofweek.com/2013-06/ART-240002-8220-28696388.html>. [2013-06-28].  
Ofweek laser net. The output power of latest optical fiber coupling multi array module maximum up to 6 kW by Germany DILAS [N/OL]. <http://laser.ofweek.com/2013-06/ART-240002-8220-28696388.html>. [2013-06-28]. (in Chinese)
- [6] BACHERT C, REHMANN G, LUFT A, *et al.*. Fiber lasers based on beam quality converters for diode lasers [J]. *SPIE*, 2013, 8603:86030A-1.
- [7] >10 kw fiber coupled laser diodes [Z/OL]. [http://www.apolloinstruments.com/product\\_fc-module.html](http://www.apolloinstruments.com/product_fc-module.html). [2014-05-24].
- [8] TIMMERMANN A, BARTOSCHEWSKI D,

- SCHLÜTER S, *et al.*. Intensity increasing up to 4 MW/cm<sup>2</sup> with BALB's *via* wavelengths coupling [J]. SPIE, 2009, 7198:7198X.
- [9] ROBIN K H, BIEN CH, JAMES B, *et al.*. Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber, CO<sub>2</sub>, and solidstate lasers [J]. SPIE, 2012, 8241:824102.
- [10] 朱洪波, 刘云, 郝明明, 等. 高效率半导体激光器光纤耦合模块 [J]. 发光学报, 2011, 32(11): 1147-1151
- ZHU H B, LIU Y, HAO M M, *et al.*. High efficiency module of fiber coupled diode laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32(11): 1147-1151. (in Chinese)
- [11] 郝明明. 大功率半导体激光短阵列合束及光纤耦合技术研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2012:4-7
- HAO M M. *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, 2012:4-7. (in Chinese)
- [12] 张志军. 大功率半导体激光器合束技术及应用研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013:28-32
- ZHANG ZH J. *Research on High-power semiconductor laser beam combiner technology and application* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine-Mechanics and Physics, 2013:28-32. (in Chinese)
- [13] LIU Y Q, CAO Y H, GAO J, *et al.*. The re-research of fiber-coupled high power diode laser [J]. SPIE, 2011, 8192:81922X.
- [14] 谭昊, 郭林辉, 高松信, 等. kW级光纤耦合输出二极管激光器模块 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(11):2581-2584
- TAN H, GUO L H, GAO S X, *et al.*. kW-output fiber coupled diode laser module [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(11): 2581-2584. (in Chinese)
- [15] 张俊, 彭航宇, 刘云, 等. 三波长合束高亮度半导体激光光源 [J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402011
- ZHANG J, PENG H Y, LIU Y, *et al.*. High brightness diode laser source based on three-wavelength multiplexing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(4): 0402011. (in Chinese)
- [16] 曹银花, 刘友强, 王智勇. 大功率半导体激光阵列整形装置, 中国: 200810246844. 9 [P]. 2011-09-07.
- CAO Y H, LIU Y Q, WANG ZH Y. Beam shaping device of high power diode laser array, China: 00810246844. 9 [P]. 2011-09-07. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘友强(1982—),男,山东潍坊人,博士后,2014年于北京工业大学获得博士学位,主要从事高功率半导体激光技术及光纤耦合技术的研究。E-mail: liuyouqiang@bjut.edu.cn



曹银花(1964—),女,吉林长春人,副研究员,硕士生导师,2005年于北京理工大学获得博士学位,主要从事大功率半导体激光光束控制与光纤耦合技术的研究。E-mail: caoyh@bjut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)