

文章编号 1004-924X(2013)05-1137-07

基于偏振复用技术的半导体激光加工光纤耦合模块

朱洪波^{1,2}, 李艳华^{1,3}, 郝明明^{1,2}, 刘云^{1*}, 秦莉¹, 宁永强¹, 王立军¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用重点实验室, 吉林长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 武汉工业学院电气与电子工程学院, 湖北武汉 430023)

摘要:与半导体激光 Bar 条相比, 单管半导体激光器具有光束质量好, 寿命长等优点, 但由于其输出功率小, 故在激光加工等领域的应用受到限制。为提高单管半导体激光器的输出功率, 提出了基于偏振复用技术对多个单管半导体激光器进行光纤耦合的方法。首先, 将 16 只 808 nm 单管半导体激光器分成两个单元, 通过空间合束将每个单元上的激光器发出的光合成一路; 然后, 利用偏振复用技术将两个单元发出的光束再次合束, 通过自行设计的聚焦系统将合束后的光束耦合进光纤实现光纤输出, 从而提高了半导体激光器光纤耦合模块的功率水平。实验显示, 当工作电流为 5.8 A 时, 通过芯径为 200 μm 、数值孔径(NA)为 0.2 的光纤的输出功率为 67 W, 耦合效率达到 84%。此模块在功率和光束质量方面满足激光塑料焊接等应用的要求。

关键词:单管半导体激光器; 偏振合束; 光纤耦合; 激光加工

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132105.1137

Fiber coupled diode laser module for laser processing by polarization multiplexing

ZHU Hong-bo^{1,2}, LI Yan-hua^{1,3}, HAO Ming-ming^{1,2}, LIU Yun^{1*},
QIN Li¹, NING Yong-qiang¹, WANG Li-jun²

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

* Corresponding author, E-mail: lx5252@sohu.com

Abstract: Single emitter diode laser has better beam quality and longer lifetime as compared with a diode laser bar. However, its application to the material processing is limited by its lower output powers. To improve the output power of the single emitter diode laser, this paper proposed an optical fiber coupling method for single emitter diode lasers based on the polarization multiplexing. Firstly, 16 single emitters were divided into two laser groups, and the laser beam from the two groups was combined into one by spacial multiplexing technology. Then the beam was combined by polarization multiplexing again. Finally, a focusing system developed by ourselves was used to couple the combined

收稿日期: 2012-09-06; **修订日期:** 2012-11-07.

基金项目: 吉林省科技厅资助项目 (No. 10ZDGG001, No. 20112106, No. 20116011); 长吉图科技项目 (No. 2011CJT0003)

beam into an optical fiber to improve the output power of the optical fiber coupling module. Experimental results show that the laser output of the module can reach 67 W from a fiber with a fiber core of 200 μm and a Numerical Aperture (NA) of 0.2 when the working current is 5.8 A. Moreover, the coupling efficiency of the module has reached 84%. This high power LD module can meet the requirements of plastic processing in power and beam quality.

Key words: single emitter diode laser; polarization multiplexing; fiber coupling; laser processing

1 引言

随着半导体激光器在输出功率、转换效率、可靠性以及耗费等方面的持续提高和改进,采用高功率半导体激光器进行材料加工逐渐成为国际热点^[1]。与金属焊接不同,激光塑料焊接中对激光功率的要求不是很高,因为焊接激光功率越大,塑料件上的热作用区就越大、越深,这会导致材料过热、变形、甚至损坏。因此,塑料焊接中,激光功率一般在 50~200 W,光束质量小于 100 mm·mrad,这样焊接不会破坏其表面,且局部加热降低了塑料零件上的热应力,可以得到较好的焊接效果^[2]。与半导体激光 Bar 条相比,单管半导体激光器具有光束质量好,寿命长等优点,而且耦合时不需要对光束进行分割重排,因此基于单管合束技术制成的光纤耦合模块在光束质量、耦合效率以及可靠性等方面要比半导体激光 Bar 条光纤耦合模块更具优势。德国 Fraunhofer 研究所采用偏振复用技术将 10 只 976 nm 的单管半导体激光器合束,耦合进 105 μm 光纤,使输出功率达到 100 W,耦合效率达 80%,插头效率达到 40%^[3]。美国 OCLARO 公司将 12 只 976 nm 单管半导体激光器利用偏振复用技术制成光纤耦合模块,光纤芯径为 105 μm ,出光功率为 100 W,数值孔径 (NA) 为 0.15,耦合效率为 73%^[4]。由于 808 nm 的半导体激光器转换效率低,同等功率下慢轴光束质量比 976 nm 差,所以 808 nm 单管激光器的合束水平落后于 976 nm 单管激光器。目前,国内还鲜有关于 808 nm 单管半导体激光器偏振合束的文献报道。

本文利用偏振复用技术将 16 只波长为 808 nm、连续输出 5 W 的单管半导体激光器合束制成光纤耦合模块,光纤芯径为 200 μm ,NA 为 0.2,连续输出为 67 W,耦合效率达 84%,可用于激光塑料焊接等加工领域。

2 实验原理

在半导体激光器光纤耦合中,通常使用光参数积 (Beam Parameter Product, BPP)^[5] 来评价光束质量,光参数积定义为:

$$BPP = d_0/2 \cdot \theta_0, \quad (1)$$

式中: $d_0/2$ 为光斑束腰半径, θ_0 为远场发散半角。由于半导体激光合束后的光斑呈方形,且远场分布也呈方形,而光纤的芯径和 NA 均为轴对称分布,所以光束聚焦前快慢轴的光束质量需满足:

$$BPP_{FA,SA} \leq \frac{d_F/2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\theta_F}{\sqrt{2}} = BPP_F/2. \quad (2)$$

公式(2)给出了聚焦光束与光纤的最佳耦合关系,式中 BPP_{FA} 、 BPP_{SA} 分别为半导体激光器的快轴和慢轴的光束质量, BPP_F 为光纤的光参数积。

半导体激光器快轴方向的光束质量较好,但是发散角很大,不利于单管半导体激光器在快轴方向的叠加,需要使用快轴准直镜 (Fast Axis Collimator, FAC) 对快轴发散角进行压缩。实验使用的 FAC 为非球面柱面镜,用于减小准直时产生的像差,其焦距 $EFL_{FAC} = 0.85 \text{ mm}$, $cc = -0.8$,面型为椭圆;慢轴发散角相对较小,所使用的慢轴准直镜 (Slow Axis Collimator, SAC) 面型为柱面镜, $EFL_{SAC} = 20 \text{ mm}$ 。通过快慢轴准直后每个激光器的光束质量如表 1 所示^[6-7]。

表 1 半导体激光器准直前后的光束质量

Tab. 1 Beam quality of LD before and after collimations

	d_0/mm	$2\theta_0/\text{mrad}$	$BPP/(\text{mm} \cdot \text{mrad})$
快轴准直前	0.001 5	1 050	0.39
快轴准直后	0.98	2.2	0.54
慢轴准直前	0.1	210	5.25
慢轴准直后	4.8	5.2	6.24

由表可以看出,光束准直后慢轴的光束质量比快轴差很多,因此需要通过在快轴方向叠加光束来使快慢轴方向BPP相等。由于每个FAC的高度为1.5 mm,因此每两个半导体激光器之间的高度差为1.5 mm。通过模拟计算,在快轴叠加8只激光器,叠加后快轴BPP变为:

$$BPP_{FA} = 12 \text{ mm}/2 \times 2.2 \text{ mrad}/2 = 6.6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (3)$$

实验中选取芯径为200 μm,NA为0.2的光纤。通过公式(3)可知,叠加后的光束质量满足200 μm光纤耦合的理论要求。

为了在光束质量不变的情况下提高半导体激光器光纤耦合模块的输出功率,将在快轴叠加了8只激光器的两个准直单元通过偏振合束棱镜(Polarized Beam Splitter, PBS)进行合束。实验中,808 nm 半导体激光器均为TE模式,即磁场矢量振动方向垂直于p-n结平面,为p偏振光。需要通过半波片将其中一个单元中的8只激光器的偏振态改为s偏振。激光以其线偏振光的振动方向与波片的快轴成45°角入射到半波片上,由于半波片的相位延迟作用使入射光在传播过程中产生π的相位差,出射光的偏振方向与快轴夹角为-45°,与入射光线振动方向的夹角为90°,因此光的偏振方向就被改变了90°,对应的半导体激光器的偏振方向由p偏振变成s偏振^[8]。

在偏振合束中常用的合束器件为薄膜干涉型偏振分束镜(PBS棱镜),是由两个等腰直角棱镜胶合而成,利用光束以布儒斯特角入射到薄膜界面上时,p偏振光的反射率为0这一性质,在等腰直角棱镜的斜面上镀上折射率高低交替的多层介质膜。当光束经过多层薄膜后,p偏振光绝大部分透过,而s偏振光绝大部分被反射,如图1所示。由菲涅耳定律可以导出薄膜材料折射率与入射角须满足:

$$n_0 \sin \theta_0 = \frac{n_1 n_2}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2}}, \quad (4)$$

其中: n_0 为基底材料折射率, θ_0 为入射角, n_1 和 n_2 分别为两种薄膜材料的折射率。PBS棱镜的基底玻璃为融石英,折射率 $n_0 = 1.45$,镀有TiO₂/SiO₂多层薄膜,SiO₂的折射率 $n_1 = 1.45$,TiO₂的折射率 $n_2 = 2.3$ 。

图2是PBS棱镜的透过率和反射率曲线。当半导体激光光束以45°角入射到多层膜系上

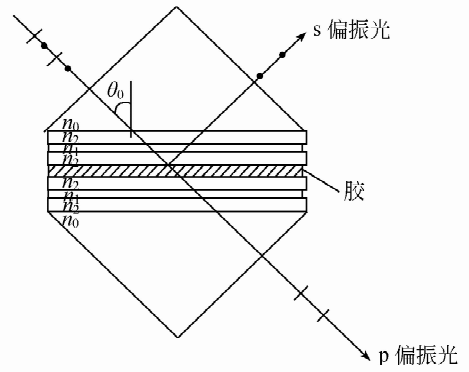


图1 多层膜偏振干涉分束镜

Fig. 1 Polarization beam splitter of multilayer films

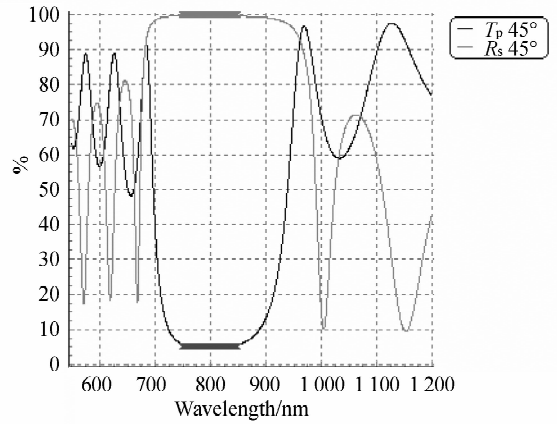


图2 偏振合束镜的透过率和反射率曲线

Fig. 2 Transmission and reflection curves of PBS

时,p偏振光束的透射率超过95%,s偏振光束的反射率超过99%,这样就可以使两束光分别透射和反射,进而实现偏振合束。

在光束聚焦时,聚焦透镜球差过大,会使聚焦光斑尺寸大于光纤芯径,这样会降低耦合效率,因此消球差聚焦透镜组为整套耦合系统的设计关键。通常采用两种结构对半导体激光进行聚焦,第一种为在快慢轴方向采用双片柱面镜对光束进行聚焦以消除球差。由于快慢轴的光束分别被聚焦,两个方向不会互相影响,因此不需要统一快慢轴的光束尺寸和发散角;第二种为三片式球面镜聚焦结构,系统中快轴发散角为2.2 mrad,慢轴发散角为5.2 mrad,慢轴发散角是快轴的2.4倍,因此采用这种结构需要对合束后的光束在慢轴方向上进行扩束,以统一快慢轴的光束尺寸和发散角,使聚焦后的光斑在光纤端面呈方形。采用倒置伽利略望远系统结构设计了一套2.4倍的

柱面扩束系统,通过扩束系统后,慢轴发散角缩小了 2.4 倍,与快轴发散角相等。利用 ZEMAX 光学设计软件对两种结构进行了分析和比较,图 3 是两种聚焦结构的原理图。

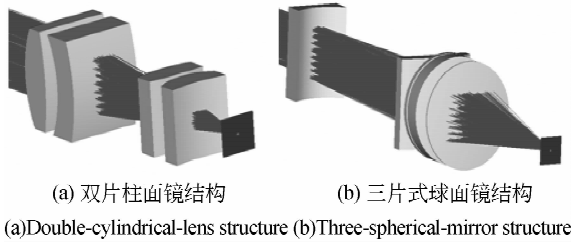


图 3 两种聚焦结构原理图

Fig. 3 Principle of two focus modules

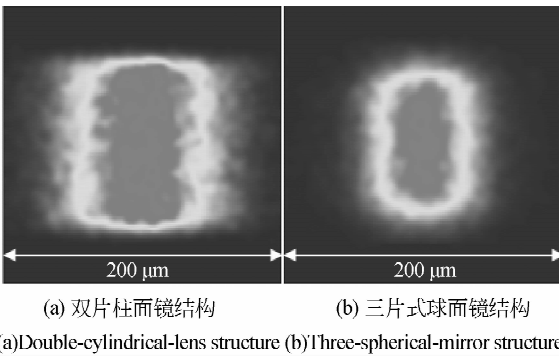


图 4 两种聚焦结构在焦平面上的聚焦光斑模拟图

Fig. 4 Simulated intensity distribution of two modules at focal plane

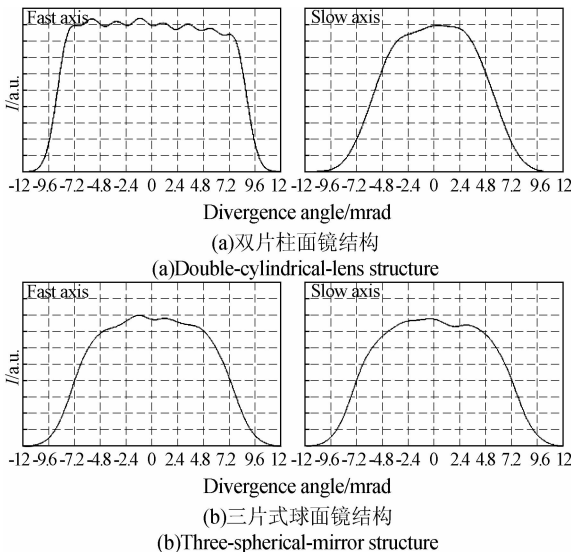


图 5 利用两种聚焦结构进行聚焦的发散角模拟图

Fig. 5 Simulated divergences of two focusing modules

图 4 为通过两种聚焦透镜结构聚焦后的光斑

模拟图,图 5 为采用两种聚焦结构对光束进行聚焦后的发散角模拟图。从图中可知,两种结构的聚焦光斑都小于 $200\ \mu\text{m}$,但是第二种结构的聚焦光斑更小,消球差效果更好。但在装调过程中柱面镜的曲率中心线也很难完全重合,容易引起误差。采用第二种结构进行聚焦,快慢轴的光束发散角更为对称,因此在实验中选择三片式球面镜聚焦结构。

3 实验结果

实验中采用波长为 808 nm 的单管半导体激光器。当注入电流为 5.8 A 时,每个激光器的输出功率达到 5 W,斜率效率为 1.05 W/A。经过精密调试,最终将 16 只单管半导体激光器合束并耦合进芯径为 $200\ \mu\text{m}$,NA 为 0.22 的光纤中。在室温下选取不同的工作电流测得光纤耦合模块的输出功率,将测试数据与激光器原始功率进行比较,得到模块的 $P-I$ 特性曲线和耦合效率,如图 6 所示。系统中所有的半导体激光器采用串联连接,当模块工作电流为 5.8 A 时,光纤输出功率为 67 W,耦合效率达到 84%。

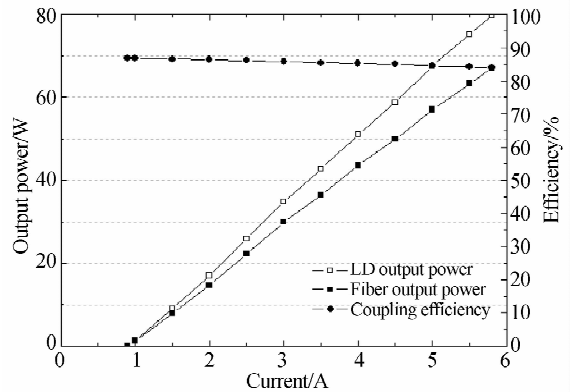


图 6 根据测量数据绘制的 $P-I$ 曲线和 $E-I$ 曲线

Fig. 6 $P-I$ and $E-I$ curves based on measuring values

实验所得结果与设计结果略有偏差的主要原因:

(1)经测定,实验中所使用的半导体激光器偏振度的平均值为 97.8%,这样就会有一部分光经过偏振复用后损失掉,而光束在偏振合束膜上的透过和反射也存在一定的能量损耗^[9]。

(2)光学透镜的定位失调也是造成能量损失的主要原因之一^[10]。在装调和固定 FAC 时会产

生指向性误差,通常在 ± 0.5 mrad 内;采用 O-PHIR 公司的光束质量分析仪对单管半导体激光器远场光束准直情况进行观察测量,通过图 7 计算出单管半导体激光器准直后快轴方向的发散角为 3 mrad,大于理论值。这主要是由于紫外胶在固化过程中收缩产生位移使 FAC 发生离焦造成的。

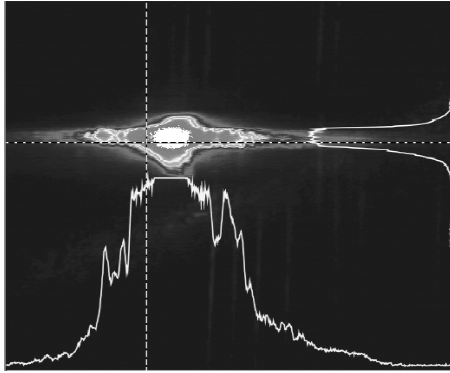


图 7 CCD 测量的光束准直图

Fig. 7 Beam collimation measured by CCD

这样 SAC 在安装调试中产量误差,导致每只激光器准直后慢轴方向光束出现微小的指向性误差。而在扩束过程中指向性误差的增大会导致光斑尺寸变大,在聚焦过程中使得聚焦光束的数值孔径值大于理论值,这部分能量在光纤的传输过程中损耗掉。

图 8 为采用 Focus Monitor 光束质量分析仪测量的光纤端面处的聚焦光斑和光强分布。从图中可以看出,快轴的光斑尺寸与慢轴的光斑尺寸几乎相等。

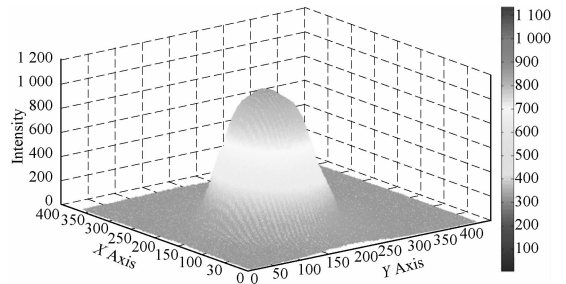


图 9 光纤输出获得的光斑轮廓图

Fig. 9 Profile of spot size of fiber output

图 9 为光纤输出的光斑强度分布图。通过 Matlab 处理可以看出通过光纤传输后,光强分布均匀。如果光纤端连接可变焦光学系统,可以通过改变光斑的大小和聚焦光束的焦深,来满足塑料焊接等方面的应用。

4 结 论

本文采用单管半导体激光器偏振复用技术实现了 16 只单管半导体激光器的光纤耦合,模块中半导体激光器采用串联方式,在 5.8 A 电流下,通过芯径为 200 μm 、NA 为 0.2 的光纤时输出功率为 67 W,效率达 84%。该模块在光束质量和功率要求上满足塑料加工等方面的要求。

参考文献:

[1] DORSCH F, DAIMINGER F X, HENNING P, et al.. 2 kW cw fiber-coupled diode laser system [J]. SPIE, 2000,3889: 45-53.

[2] 王霄,丁国民,刘会霞,等. 激光塑料焊接技术的研究[J]. 激光杂志, 2007,28(4):68-69.
WANG X, DING G M, LIU H X. Investigation on laser welding plastics technology[J]. Laser Journal, 2007,28(4):68-69. (in Chinese)
[3] WERNER M, WESSLING C, HENGESBACH S,

图 8 聚焦光斑轮廓图

Fig. 8 Profile of spot size after beam focus

(3)在半导体激光器烧结时,低温焊料熔化时产生的应力使激光器在水平方向偏离理想位置,

- et al.*, 100 W/100 μm passively cooled, fiber coupled diode laser at 976 nm based on multiple 100 μm single emitters[J]. *SPIE*, 2009, 7198: 71980P-1-71980P-7.
- [4] PIERER J, LÜTZELSCHWAB M, GROSSMANN S, *et al.*. Automated assembly processes of high power single emitter diode lasers for 100 W in 105 μm / NA 0.15 fiber module[J]. *SPIE*, 2011, 7918: 79180I-1-79180I-8.
- [5] 彭航宇, 顾媛媛, 朱洪波, 等. 大功率半导体激光光源光束整形技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0202010-1-0202010-6.
PENG H Y, GU Y Y, ZHU H B, *et al.*. Study on beam shaping of high power diode lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, 38(2): 0202010-1-0202010-6. (in Chinese)
- [6] 王祥鹏, 梁雪梅, 李再全, 等. 880 nm 半导体激光器阵列及光纤耦合模块[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1021-1027.
WANG X P, LIANG X M, LI Z J, *et al.*. 880 nm semiconductor laser diode arrays and fiber coupling module[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1021-1027. (in Chinese)
- [7] 单肖楠, 刘云, 曹军胜, 等. 808 nm 千瓦级高效大功率半导体激光光源[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 452-456.
SHAN X N, LIU Y, CAO J SH, *et al.*. 808 nm kW-output high-efficiency diode laser sources[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 452-456. (in Chinese)
- [8] 顾媛媛, 冯广智, 单肖楠, 等. 808 nm 和 980 nm 半导体激光迭阵波长耦合技术[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 8-13.
GU Y Y, FENG G ZH, SHAN X N, *et al.*. 808 nm and 980 nm high power laser diode stack with wavelength coupling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 8-13. (in Chinese)
- [9] 郝明明, 朱洪波, 秦莉, 等. 百瓦级高亮度光纤耦合半导体激光模块的研制[J]. 发光学报, 2012, 33(6): 651-659.
HAO M M, ZHU H B, QIN L, *et al.*. Reearch on high brightness fiber coupled diode laser module with hundred watts class output power [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(6): 651-659. (in Chinese)
- [10] 王鹏程, 郝明明, 朱洪波, 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.
WANG P CH, HAO M M, ZHU H B, *et al.*. High brightness fiber coupled diode laser module [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(12): 1335-1341. (in Chinese)

作者简介:



朱洪波(1984—),男,吉林长春人,博士,2003年于长春理工大学获得学士学位,主要从事大功率半导体激光器光纤耦合技术的研究。E-mail: zhbciomp@163.com



李艳华(1983—),女,河北衡水人,硕士,2011年于河北工业大学获得硕士学位,目前主要从事于光电子技术研究。E-mail: henryhulm2003@163.com



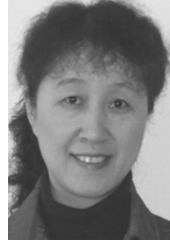
郝明明(1984—),男,内蒙古包头人,博士,2006年于内蒙古大学获得学士学位,主要从事大功率半导体激光阵列的光纤耦合及应用的研究。E-mail: ciomp2007@163.com



秦莉(1969—),女,黑龙江鹤岗人,研究员,主要从事大功率垂直腔面发射激光器及应用方面的研究。E-mail: qinlicomp@yahoo.com.cn



宁永强(1965—),男,吉林图们人,研究员,博士生导师,1999 年于中科院长春物理所获得博士学位,主要从事半导体光电子器件等方面的研究。E-mail: ningyq@ciomp. ac. cn



刘云(1960—),女,吉林长春人,副研究员,主要从事大功率半导体激光阵列技术的研究。E-mail: hx5252@sohu. com



王立军(1946—),男,吉林舒兰人,研究员,博士生导师,主要从事大功率半导体激光器及其应用方面的研究。E-mail: wanglj@ciomp. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)