

文章编号 1004-924X(2012)08-1684-07

808 nm 高亮度半导体激光器光纤耦合器件

朱洪波^{1,2}, 郝明明^{1,2}, 刘云^{1*}, 秦莉¹, 彭航宇¹, 单肖楠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, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对单个 808 nm 单管半导体激光器输出功率低, 采用端面泵浦方式对光纤激光器进行泵浦时受到限制的问题, 本文利用空间合束技术制成高亮度半导体激光器光纤耦合模块来提高 808 nm 单管半导体激光器泵浦掺 Nd³⁺ 双包层光纤激光器的效率。首先, 通过微透镜对每个单管半导体激光器进行快慢轴准直; 然后, 使用反射棱镜对每个激光器发出的光进行空间合束; 最后, 利用自行设计的扩束系统将合束后的光束进行扩束, 聚焦进入光纤, 从而极大地提高光纤耦合模块的亮度。实验中将 4 只连续输出功率为 5 W 的单管半导体激光器发出的光束耦合进芯径为 105 μm、数值孔径(NA)为 0.2 的光纤, 当工作电流为 5.8 A 时, 通过光纤输出的功率为 15.22 W, 耦合效率达到 74%, 亮度超过 1.4 MW/cm² · sr。

关键词: 半导体激光器; 光纤激光器; 激光泵浦; 光纤耦合

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122008.1684

808 nm high brightness module of fiber coupled diode laser

ZHU Hong-bo^{1,2}, HAO Ming-ming^{1,2}, LIU Yun^{1*}, QIN Li¹,

PENG Hang-yu¹, SHAN Xiao-nan¹, WANG Li-jun¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and*

Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

** Corresponding author, E-mail: hx5252@sohu.com*

Abstract: As 808 nm single emitter diode lasers have low output powers, they are limited to pump neodymium-doped double-cladding fiber lasers in end pumping. In order to enhance the pumping efficiency of the fiber laser by using single emitters, a fiber coupled module with several single emitter diode lasers was developed. First, the fast axis and slow axis of each diode laser were collimated by a micro-lens. Then, the output beams of diode lasers were combined with reflecting prisms. Finally, a suit of optical system designed by ourselves was utilized to expand and focus the beam into a optical fiber. Experiments show that this approach can greatly increase the brightness of the module with fiber coupled LDs. Four LDs with continuous output power of 5 W are coupled in a 105 μm multimode optical fiber with a core diameter of 105 μm and a numerical aperture of 0.2 when the working current is 5.8

收稿日期: 2012-01-20; 修订日期: 2012-02-27.

基金项目: 吉林省科技厅重大项目 (No. 10ZDGG001)

A, it can offer the fiber output power of 15.22 W, coupling efficiency of 74% and the brightness over $1.4 \text{ MW/cm}^2 \cdot \text{sr}$.

Key words: diode laser; fiber laser; laser pumping; fiber coupling

1 引言

目前,光纤激光器的研究极受业界关注。光纤激光器多采用分散式端面泵浦^[1-3],它是将双包层光纤的两端各熔接多个半导体激光器光纤耦合模块,将泵浦光从双包层光纤的两端直接入射到内包层以对增益介质进行泵浦。以往单管半导体激光器的光纤耦合是采用光纤束耦合^[4],但是要实现光纤激光器的大功率输出甚至是千瓦级输出就必须增加光纤耦合模块的数量以获得更大的泵浦光功率,这使得泵浦光的光纤束直径可能达到双包层光纤直径的数倍。而且通过光纤束输出的激光会由于光纤之间的空隙降低亮度,光束质量变差,泵浦效果不够理想。所以要想将泵浦光有效地耦合到双包层光纤中还要求半导体激光器光纤耦合模块具有很高的亮度。单管合束技术是利用光学折反射原理将多只单管半导体激光器发出的光束进行合束,然后根据光束质量不变原理对快慢轴光斑和发散角进行处理,最后聚焦耦合进一根光纤。这种方法具有很高的耦合效率,可以极大地提高光纤耦合模块的亮度^[5-8]。

近年来,随着国内外对高功率掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的研究进展加快^[9-10],其泵浦源 975 nm 单管半导体激光器合束技术发展更加迅速。如德国 JENOPTIK 公司采用慢轴整体准直法实现了 $105 \mu\text{m}$ 、65 W 光纤耦合模块,其波长为 976 nm,亮度可以达到 $4.9 \text{ MW/cm}^2 \cdot \text{sr}$ ^[11]; 弗朗和菲研究所采用锥形单管半导体激光器制成光纤耦合模块, $105 \mu\text{m}$ 光纤的输出功率达 50 W,波长为 975 nm,亮度达 $4.6 \text{ MW/cm}^2 \cdot \text{sr}$ ^[12]。虽然掺 Yb³⁺ 光纤激光器在许多方面具有优越性,但是由于 Yb³⁺ 吸收谱很宽,激光器中存在信号光的再吸收,这导致了严重的自脉动现象,容易出现光学非线性效应(如受激 Brillouin 散射和受激 Raman 散射),其产生的高强度信号成为高功率光纤激光器的主要噪声来源,影响了激光输出的特性和稳定性^[13]。而掺 Nd³⁺ 双包层光纤具有吸收带窄,

非线性效应弱,调 Q 和锁模也较易控制和实现的优点,掺 Nd³⁺ 双包层光纤激光器作为良好的连续激光光源具有广泛的应用前景。因此,作为掺 Nd³⁺ 双包层光纤激光器必不可少的泵浦源,808 nm 高亮度单管半导体激光器合束技术也成为了很重要的研究方向。不过 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 975 nm 差,所以 808 nm 单管激光器合束技术落后于 975 nm 单管激光器合束技术。美国 Nlight 公司采用 16 只 808 nm 单管半导体激光器通过合束制成了单管合束光纤耦合模块,其输出功率达 100 W,芯径为 $400 \mu\text{m}$,亮度仅为 $0.5 \text{ MW/cm}^2 \cdot \text{sr}$,除此之外,国内外尚无其它 808 nm 单管半导体激光器合束光纤耦合模块方面的相关报道。

本文将 4 只连续输出 5 W 的 808 nm 单管半导体激光器耦合进芯径为 $105 \mu\text{m}$ 、NA 为 0.2 的光纤,在 5.8 A 的电流激励下,模块输出功率为 15.22 W,耦合效率达到 74%,亮度超过 $1.4 \text{ MW/cm}^2 \cdot \text{sr}$,此亮度完全可以满足掺 Nd³⁺ 双包层光纤激光器的泵浦需求。

2 基本原理

在半导体激光器光纤耦合中,通常使用光参数积(Beam Parameter Product, BPP)^[14]来评价光束质量,光参数积定义为:

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

式中: $d_0/2$ 为光斑束腰半径, θ_0 为远场发散半角。作为光纤激光器的泵浦源,半导体激光器光纤耦合模块不仅要具有很高的功率,而且还要具有很高的亮度,这是能否输出大功率光纤激光的重要因素。为了获得更高的亮度,选取芯径为 $105 \mu\text{m}$ 、NA=0.2 的光纤,即 $d_F = 105 \mu\text{m}$, $\theta_F = 0.2$,光纤的 BPP 为:

$$\text{BPP}_F = d_F/2 \cdot \theta_F = 10.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (2)$$

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^[15],而光纤的芯径和 NA 均为轴

对称分布,所以聚焦后快慢轴的 BPP 需满足:

$$BPP_{FA-SA} = \frac{d_F/2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\theta_F}{\sqrt{2}} = BPP_F/2 = 5.25 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, \quad (3)$$

式中: BPP_{FA} , BPP_{SA} 分别为快、慢轴方向的 BPP。公式(3)给出了最佳耦合效率的边界值,如果要想让合束后的光束高效率地耦合进 $105 \mu\text{m}$ 的光纤,则光束快慢轴的 BPP 应小于 $5.25 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。

通常半导体激光器在快慢轴方向的光束质量相差很大,以实验中所用到的 808 nm 半导体激光器为例,快轴发光尺寸为 $1.5 \mu\text{m}$,慢轴发光尺寸为 $100 \mu\text{m}$,相应的发散角为 $60^\circ \times 11^\circ$ (95% 能量),由单管半导体激光器快慢轴方向的尺寸及发散角得出快慢轴的光束质量为:

$$BPP_{FA} = 1.5 \times 10^{-3} / 2 \times 60 / 2 \times 17.5 = 0.39 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, \quad (4)$$

$$BPP_{SA} = 0.1 / 2 \times 11 / 2 \times 17.5 = 4.81 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (5)$$

由此可知,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 Collimation, FAC)对快轴发散角进行压缩。由于快轴发散角过大,实验使用的 FAC 为非球面柱面镜,以便减小准直时产生的像差, $EFL_{FAC} = 0.85 \text{ mm}$, $cc = -0.8$,面型为椭圆面型;慢轴发散角相对较小,所使用的慢轴准直镜(Slow Axis Collimation, SAC)面型为柱面镜, $EFL_{SAC} = 20 \text{ mm}$,具体结构如图 1 所示。

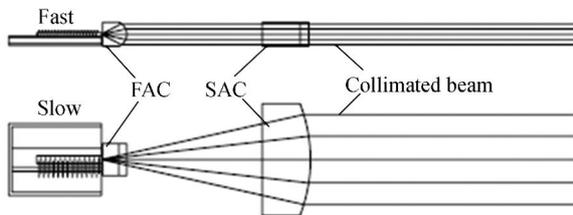


图 1 单管半导体激光器快慢轴准直原理图
Fig. 1 Collimation scheme of Laser Diode(LD)

利用软件模拟得到准直后的光束发散角如图 2 所示,准直后快慢轴发散角分别为 $2.2 \text{ mrad} \times 4.6 \text{ mrad}$ (95% 能量),相应的光束质量如表 1 所示。

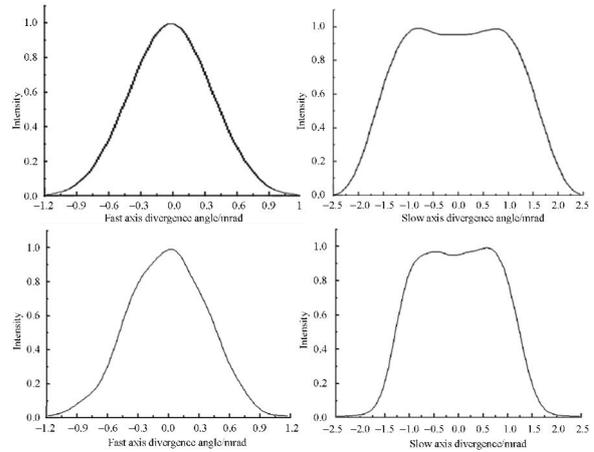


图 2 准直后 808 nm 半导体激光器的发散角
Fig. 2 Divergence angle of 808 nm LD after collimation

表 1 准直前后 808 nm 半导体激光器的光束质量

	d_0 /mm	$2\theta_0$ /mrad	BPP/ (mm · mrad)
Before collimation in fast axis	0.001 5	1 050	0.39
After collimation in fast axis	0.98	2.2	0.54
Before collimation in slow axis	0.1	192.5	4.81
After collimation in slow axis	4.3	4.6	4.95

可以看出,慢轴光束 $BPP < 5.25 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,但是比快轴大很多,因此需要通过在快轴方向叠加光束来使快慢轴方向的 BPP 相等。

由于每个 FAC 的高度为 1.5 mm ,使得每 2 个半导体激光器之间的高度差为 1.5 mm ,这会使 FAC 在装调和固定时会产生指向性误差,且通常在 $\pm 0.5 \text{ mrad}$ 范围内^[16],设计时需要考虑这个误差,因此合束后光源快轴方向的分散角为 3.2 mrad 。按照公式(3)计算,快轴方向上可以排放 4 只半导体激光器,在阶梯热沉的每个台阶上各排列一只单管半导体激光器,每个台阶高度为 1.5 mm 。每只激光器经过 FAC 和 SAC 准直后,通过一个反射棱镜进行全反射,使 4 只激光器发出的光束在快轴叠加,如图 3 所示。

叠加后的光束快慢轴尺寸为 $6 \text{ mm} \times 4.3 \text{ mm}$,发散角为 $3.2 \text{ mrad} \times 4.6 \text{ mrad}$,快慢轴的光

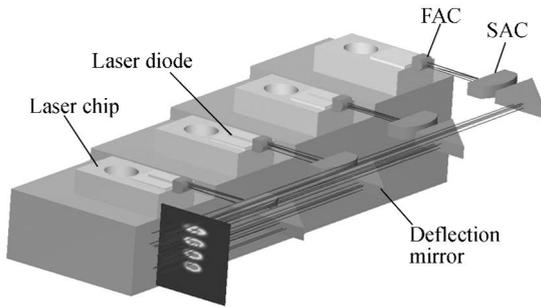


图 3 单管半导体激光器合束原理图
Fig. 3 Combination scheme of LDs

束质量为:

$$BPP_{FA} = 6/2 \times 3.2/2 = 4.8 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \leq 5.25 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, \quad (6)$$

$$BPP_{SA} = 4.3/2 \times 4.6/2 = 4.95 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \leq 5.25 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, \quad (7)$$

此时,快轴方向的 BPP 和慢轴方向的 BPP 最接近,但是此时快轴发散角为 3.2 mrad,慢轴发散角为 4.6 mrad,慢轴发散角是快轴的 1.44 倍,因此需要设计一套扩束系统,对慢轴光束进行扩束,使得快慢轴发散角相等,这样聚焦后才能在光纤端面获得一个正方形的光斑。本文采用倒置伽利略望远系统设计了一套 1.44 倍的柱面扩束系统,如图 4 所示。该系统由一个凹柱面镜和一个凸柱面镜组成,面型分别为平凹和平凸面型。 $r_1 = 13.6 \text{ mm}$, $r_2 = 19.58 \text{ mm}$,慢轴扩束前后的 BPP 如表 2 所示。

表 2 扩束前后 808 nm 半导体激光器的光束质量

Tab. 2 Beam quality of 808 nm LD before and after beam expansion

	d_0/mm	$2\theta_0/\text{mrad}$	BPP/(mm · mrad)
Slow axis before beam expanding	4.3	4.6	4.95
Slow axis after beam expanding	6.49	3.2	5.19

通过扩束系统后,慢轴发散角缩小了 1.44 倍,实现了与快轴发散角相等,而慢轴 BPP 增大了 0.05 倍,这是由于慢轴扩束镜采用了 2 片单片镜结构,而且为平凸和平凹面型,无法消除扩束过程中产生的像差所致。

在对光束聚焦时,要求聚焦光斑很小,如果聚焦时产生球差,会使聚焦光斑尺寸大于光纤芯径,

从而降低耦合效率。光束聚焦时必须进行消球差,因此消球差聚焦透镜组为整套耦合系统的设计关键。本文利用 ZEMAX 光学设计软件对聚焦透镜组进行函数优化并限制其焦距为 47 mm,透镜的材料选用融石英 JGS1 光学玻璃,选取 3 片透镜的初始结构,经过优化,得到了最佳结构,聚焦镜组的结构如图 4 中所示。

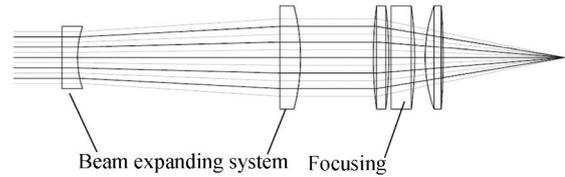


图 4 扩束系统和聚焦系统
Fig. 4 Beam expansion and focusing system

图 5 是聚焦镜组在 0°角视场的点列图和波前图,从图中可知在视场角为 0°时点列图的几何弥散圆直径小于艾里斑,波前图中的 PV 值为 0.05λ ,证明了此设计是接近衍射极限的,完全满足使用要求。

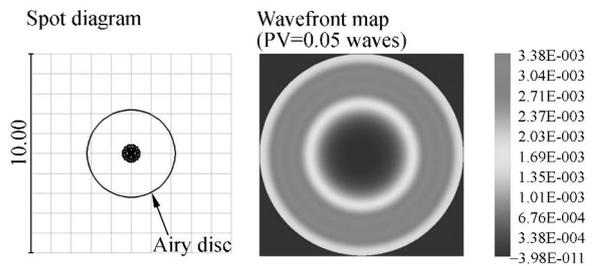


图 5 聚焦镜组的光斑图和波前图
Fig. 5 Spot diagram and wavefront map of focusing unit

3 实验结果

本文采用波长为 808 nm 的单管半导体激光器,每个激光器在 5.8 A 电流激励下连续输出功率为 5 W,斜率效率为 1.05 W/A,电光转换效率为 45%。将 4 个单管半导体激光器焊接到阶梯热沉上,采用快慢轴准直镜对每个激光器分别进行准直,准直后激光器快轴方向的发散角为 3 mrad,慢轴方向的发散角为 6 mrad,快轴测量得到的数据在表 1 理论计算值之内,慢轴测量得到的数据大于表 1 理论计算值。其原因是由于在将半导体激光器进行焊接时,低温焊料熔化产生的

热应力使激光器水平方向的位置偏离理想位置, 这样 SAC 在安装调试时出现困难, 导致每只激光器准直后慢轴方向的光束出现指向性误差, 光束质量下降。

$$BPP_{SA} = 4.3/2 \times 6/2 = 6.45 \text{ mm} \cdot \text{mrad} > 5.25 \text{ mm} \cdot \text{mrad} . \quad (8)$$

慢轴光束质量为 $6.45 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 超过理论计算值, 这样会使耦合效率下降。

将每只半导体激光器进行串联并实现光纤耦合, 在室温下选取不同工作电流测量模块的光纤输出功率, 根据测试数据与激光器原始功率的比较得到模块的 $P-I$ 特性曲线和耦合效率。表 3 为 4 只激光器光纤耦合前后的测量数据, 图 6 为根据测量数据绘制的模块输出特性曲线。如图所示, 当模块工作电流为 5.8 A 时, 光纤输出功率为 15.22 W , 耦合效率达到 74% 。光纤端面没有镀膜, 产生菲涅尔反射, 使得光纤耦合时的效率降低大约 7% 。

表 3 模块耦合前后的测量数据

Tab. 3 Output powers of different current range

Current/A	P_o/W	P_{Fiber}/W
1.0	0.42	0.33
2.0	4.55	3.76
3.0	8.91	7.06
4.0	13.10	10.15
5.0	17.10	12.92
5.8	20.56	15.22

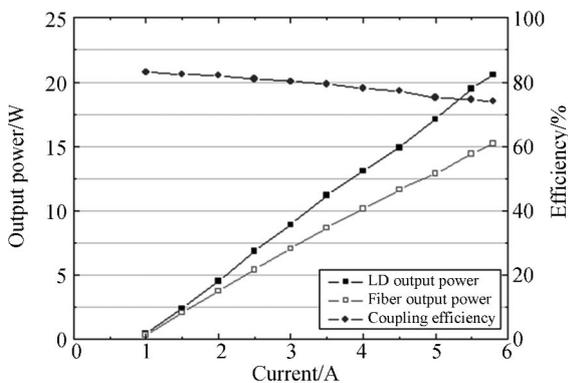


图 6 模块 $P-I$ 曲线及耦合效率曲线

Fig. 6 $P-I$ curves and coupling efficiency curves

$$B = \frac{P}{\pi \frac{D^2}{4} \pi \theta^2} , \quad (9)$$

通过公式(9)可以计算出光纤耦合模块的输出亮度, 式中 B 是亮度, P 是输出功率, D 是光纤的芯径, θ 是光纤的数值孔径。经过计算, 在光纤耦合连续输出达 15.22 W 时, 此模块亮度可以达到 $1.4 \text{ MW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ 。

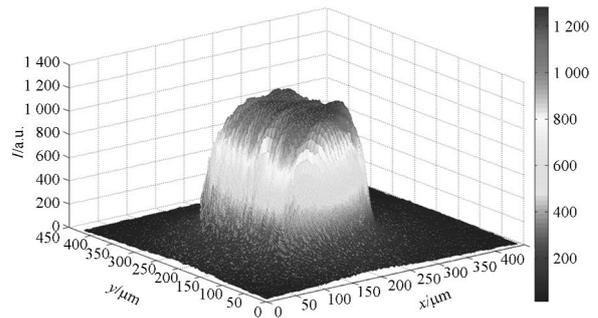


图 7 聚焦后获得的光斑轮廓图

Fig. 7 Profile of spot size after focusing

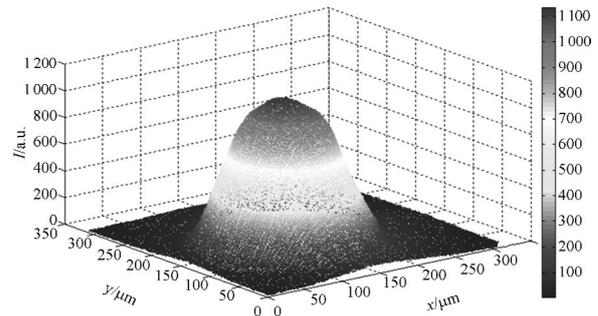


图 8 光纤输出获得的光斑轮廓图

Fig. 8 Profile of spot size after fiber output

通过 Matlab 处理, 在束腰位置得到相应的光斑轮廓如图 7 所示, 聚焦光斑呈平顶分布。图 8 为光纤耦合输出的光斑强度分布图, 可以看出通过光纤传输后, 光强分布发生变化, 由平顶分布变成高斯分布, 光强分布更均匀。

4 结 论

采用单管合束技术实现了多个单管半导体激光器的光纤耦合, 模块中每个半导体激光器采用串联方式, 在 5.8 A 电流下, 通过 $105 \mu\text{m}$ 、 0.2 NA 的光纤输出功率为 15.22 W , 效率达 74% , 亮度为 $1.4 \text{ MW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ (国内首次报道), 可用于泵浦光纤激光器。下一步的主要工作是分析实验中产生的误差, 进一步提高耦合效率。

参考文献:

- [1] SHUPENG Y, PING Y, MALI G. End-pumped 300 W continuous-wave ytterbium-doped all-fiber laser with master oscillator multistage power amplifiers configuration[J]. *Optics Express*, 2008, 16(22):17864-17869.
- [2] 阮义,宁提纲,裴丽,等. 高功率双包层光纤激光器的泵浦技术[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2009, 1:22-24.
- RUAN Y, NING T G, PEI L, *et al.*. Pumping technology for high-power double-clad fiber optic lasers[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2009, 1: 22-24. (in Chinese)
- [3] MUENDEL M H, FARROW R, LIAO K H, *et al.*. Fused fiber pump and signal combiners for a 4-KW ytterbium fiber laser[J]. *SPIE*, 2011, 7914: 791431-1-791431-7.
- [4] WESSLING C, HENGESBACH S T, GEIGER J, *et al.*. 50 W passively cooled, fiber coupled diode laser at 976 nm for pumping fiber lasers using 100 μm fiber bundles[J]. *SPIE*, 2008, 6876:687614-1-687614-11.
- [5] CRUM T, ROMERO O, HANXUAN L, *et al.*. Advances in fiber combined pump modules for fiber lasers[J]. *SPIE*, 2009, 7198:71980V-1-71980V-5.
- [6] REVERMANN M, TIMMERMANN A, MEIN-SCHIEN J, *et al.*. Efficient high-brightness diode laser modules offer new industrial applications[J]. *SPIE*, 2007, 6456:64560Q-1-64560Q-7.
- [7] 顾媛媛,冯广智,王立军,等. 808 nm 和 980 nm 半导体激光选波长耦合技术[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1):8-13.
- GU Y Y, FENG G ZH, WANG L J, *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)
- [8] 王祥鹏,梁雪梅,王立军,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):1022-1027.
- WANG X P, LIANG X M, WANG L J, *et al.*. 880 nm semiconductor laser diode arrays and fiber coupling module[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5):1022-1027. (in Chinese)
- [9] 张帆,王春灿,宁提纲,等. 多点侧面泵浦双包层光纤激光器的对称夹层结构[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(4):543-547.
- ZHANG F, WANG C C, NING T G, *et al.*. Pump light leakage at coupler of side-pumped double-clad fiber laser with a novel dielectric-metal-dielectric sandwich structure [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(4):543-547. (in Chinese)
- [10] 赵玉辉,郑义,詹仪,等. 高功率掺镱双包层光纤激光器[J]. *激光与红外*, 2006, 36(9):833-836.
- ZHAO Y H, ZHENG Y, ZHAN Y, *et al.*. High-power Yb-doped double-clad fiber laser[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(9):833-836. (in Chinese)
- [11] SCHRODER D, WERNER E, FRANKE A, *et al.*. Roadmap to low cost, high brightness diode laser power out of the fiber[J]. *SPIE*, 2010, 7583:758309-1-758309-7.
- [12] GAPONTSEV V, MOSHEGOV N, TRUBENKO P, *et al.*. High-Brightness 9XX nm pumps with wavelength stabilization[J]. *SPIE*, 2010, 7853: 75830A-1-75830A-9.
- [13] 董法杰,樊亚仙,吕福云,等. LD 泵浦的掺 Nd 双包层光纤激光器[J]. *南开大学学报*, 2004, 37(2): 53-55.
- DONG F J, FAN Y X, LU F Y, *et al.*. Nd³⁺ doped double-clad fiber laser pumped by LD[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2004, 37(2):53-55. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] WERNER M, WESSLING C, HENGESBACH S, *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.

- [16] KARLSEN S R, PRICE R K, REYNOLDS M, *et al.*. 100 W, 105 μm , 0.15NA fiber coupled laser

diode module[J]. *SPIE*, 2009, 7198: 71980T-1-71980T-8.

作者简介:



朱洪波(1984—),男,吉林长春人,博士研究生,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的研究。E-mail: zhbciomp@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,现在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所攻读博士学位,主要从事大功率半导体激光列阵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



单肖楠(1979—)男,吉林长春人,副研究员,主要研究大功率半导体激光叠阵。E-mail: shanxiaon@sina.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



张立平(1957—),男,吉林长春人,学士,研究员,于1982年毕业于长春光学精密机械学院,获学士学位。现在中科院院长春光机所空间二部从事航天遥感器的研制工作。E-mail: zhang_lp2005@163.com

通讯作者:



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列阵技术的研究。E-mail: hx5252@sohu.com