

基于 808 nm 半导体激光器单管合束技术的光纤耦合模块

朱洪波^{1,2} 郝明明^{1,2} 彭航宇¹ 张志军^{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国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

²中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 由于单管半导体激光器比半导体激光线阵、叠阵具有更好的光束质量及散热特性, 因此更适用于光电干扰光源。针对于电荷耦合器件(CCD)光谱响应曲线特征, 采用 808 nm 单管半导体激光器为光源, 将 24 只单管半导体激光器分组集成, 通过空间合束和偏振合束以提高其输出功率密度, 采用自行设计的光学系统对光束进行扩束聚焦, 耦合进芯径为 300 μm , 数值孔径 0.22 的光纤中, 所有激光器都采用串联方式, 在 8.5 A 电流下通过光纤输出功率为 162 W, 耦合效率达到 84%。

关键词 激光器; 半导体激光器; 光纤耦合; 光束质量; 偏振合束

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0502001

Module of Fiber Coupled Diode Laser Based on 808 nm Single Emitters Combination

Zhu Hongbo^{1,2} Hao Mingming^{1,2} Peng Hangyu¹ Zhang Zhijun^{1,2}

Liu Yun¹ Qin Li¹ Ning Yongqiang¹ Wang Lijun¹

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

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Because of the good beam quality and heat dissipation of single emitter diode laser, it is more suitable to be used in the source of electro-optic countermeasure. Aim at the response curve of charge-coupled device (CCD) spectrum, 808 nm single emitter is used as unit source and 24 single emitters are divided into four groups. In order to increase the output power intensity, space combination and polarization combination are used in the experiment. Combined beam is focused in an optical fiber through the focused lens group designed by ourself. All the single emitters are connected in series. When the drive current is 8.5 A, 162 W output power is obtained from a 300 μm fiber core with a numerical aperture of 0.22 at 808 nm and coupling efficiency of 84%.

Key words lasers; diode laser; fiber coupling; beam quality; polarization combination

OCIS codes 140.2010; 140.3300; 140.5960

1 引 言

电荷耦合器件(CCD)作为一种固体成像器件,

广泛应用于各种光电设备中,承担着侦察、监控和识别等重要作用, CCD的损伤将导致光电设备的功能

收稿日期: 2011-12-31; 收到修改稿日期: 2012-02-08

基金项目: 吉林省科技厅重大项目(10ZDGG001)资助课题。

作者简介: 朱洪波(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事大功率半导体激光合束及光纤耦合等方面的研究。

E-mail: zhbciomp@163.com

导师简介: 王立军(1946—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事半导体激光及其应用技术等方面的研究。

E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: hx5252@sohu.com

削弱甚至整体丧失。因此强激光对 CCD 干扰作用已成为国内外的研究重点^[1,2]。以往采用半导体激光叠阵作为光电干扰光源^[3,4],叠阵的光束质量差,需要水冷进行散热^[5],整机系统较大等缺陷使其在车载、机载光电干扰光源方面的应用受到限制。而单管半导体激光器(LD)由于具有光束质量高、容易散热等优点,基于单管半导体激光器合束制成的光纤耦合光源在光电干扰中有着广阔的应用空间。由于 976 nm 单管半导体激光器转换效率高,光束质量好,目前单管半导体激光器研究重点主要都集中在 976 nm 波段范围。德国夫琅禾费研究所采用阶梯镜反射法^[6]将两种偏振态的波长为 975 nm 的单管半导体激光器进行合束制成光纤耦合模块,105 μm 光纤输出功率达 100 W,耦合效率达 80%。美国 Oclaro 公司也采用偏振合束技术将波长为 980 nm 的单管半导体激光器制成光纤耦合模块^[7],105 μm 光纤输出功率 100 W,耦合效率为 73%。通过光纤合束器将多个光纤耦合模块进行合束,功率可达上千瓦^[8,9]。而波长为 808 nm 的单管半导体激光器合束技术相对滞后,目前国外还没有文献报道。从光电干扰实验中所用 CCD 光谱响应曲线来看,硅 CCD 的响应波段为 200~1100 nm,在相同的辐照度下,波长 976 nm 处的光谱响应度只有 808 nm 处的 40% 左右^[10]。显然,为了提高对 CCD 器件的干扰效率,将 808 nm 半导体激光应用于光电干扰光源是一种有效的途径。本文将 24 只 8 W 的单管半导体激光器分成 4 组,每组 6 只,通过快慢轴准直,空间合束和偏振合束,最后扩束聚焦并实现光纤耦合输出。所有激光器采用串联方式连接,在 8.5 A 的电流激励下通过 300 μm 光纤输出 162 W 激光,耦合效率达到 84%,可应用于光电干扰实验中。

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(BPP, f_{BPP})^[11]这个概念来评价光束质量,光参数积定义为

$$f_{BPP} = \frac{d_0}{2} \theta_0, \quad (1)$$

式中 $d_0/2$ 为光斑束腰半径, θ_0 为远场发散半角。在半导体激光器光纤耦合中,要求聚焦光斑的尺寸和发散角小于光纤芯径和数值孔径(NA),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^[12],而光纤的芯径和 NA 均为轴对称分布,所以聚焦光束快慢轴的光束质量需满足以下条件

$$\begin{cases} f_{BPP-FA} \leq \frac{d_F/2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\theta_F}{\sqrt{2}} = f_{BPP-F}/2 \\ f_{BPP-SA} \leq \frac{d_F/2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\theta_F}{\sqrt{2}} = f_{BPP-F}/2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中 f_{BPP-FA} 、 f_{BPP-SA} 分别为半导体激光器的快轴和慢轴光束质量, f_{BPP-F} 为光纤的光参数积。(2)式给出了聚焦光束与光纤最佳耦合关系。

通常半导体激光器在快慢轴方向光束质量相差很大,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 μm,慢轴发光尺寸为 200 μm,相应的发散角为 70°×11°(95%能量),通过(1)式可以看出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(FAC)对快轴发散角进行压缩。由于半导体激光器快轴发散角过大,实验中使用的 FAC 为非球面柱面镜,以减小准直时产生的像差,慢轴发散角相对较小,所以慢轴准直镜(SAC)可使用球面柱面镜。图 1 为单管半导体激光器快慢轴准直原理图。

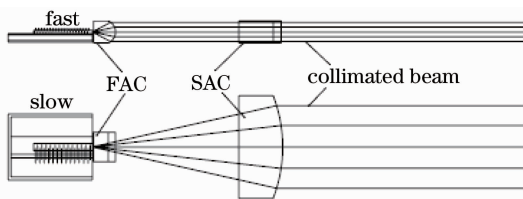


图 1 单管半导体激光器快慢轴准直原理图

Fig. 1 Collimation scheme of single LD

表 1 为单管半导体激光器准直前后快慢轴方向的光束质量,可以看出慢轴方向光束质量比快轴差很多,因此需要在快轴方向叠加光束来使快慢轴方向光束质量相等。由于每个 FAC 的高度为 1.5 mm,因此使得每两个半导体激光器之间的高度差为 1.5 mm。通过计算可知快轴方向上可以叠加 12 只半导体激光器,实验中采用阶梯式排列结构,每层台阶高度为 1.5 mm,考虑到机械结构及激光传输的光程差等因素,在设计中将 12 只半导体激光

表 1 准直前后 808 nm 半导体激光器的光束质量

Table 1 Beam quality of 808 nm LD before and after collimation

	$d_0/$ mm	$2\theta_0/$ mrad	$f_{BPP}/$ (mm·mrad)
Before collimation in fast axis	0.001	1222	0.31
After collimation in fast axis	0.98	3	0.735
Before collimation in slow axis	0.2	192.5	9.625
After collimation in slow axis	5.6	8.8	12.32

器分别焊接在两个阶梯热沉上,每个阶梯热沉上含有 6 只激光器,这样叠加后快慢轴尺寸为 9 mm × 5.6 mm,发散角为 3 mrad × 8.8 mrad,快慢轴的光束质量分别为

$$f_{\text{BPP-FA}} = 9/2 \text{ mm} \times 3/2 \text{ mrad} = 6.75 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, \quad (3)$$

$$f_{\text{BPP-SA}} = 5.6/2 \text{ mm} \times 8.8/2 \text{ mrad} = 12.32 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (4)$$

将两个阶梯热沉同等高度固定,通过平移棱镜将其中一路激光光束在快轴方向提高 9 mm,使其高于另外一路激光光束,然后通过反射棱镜使两路光束在快轴方向叠加,从而实现空间合束。

$$\Delta L' = d \left(1 - \frac{\cos I}{n \cos I'} \right), \quad (5)$$

(5)式为平移棱镜位移计算公式。式中 d 为平移棱镜的厚度, n 为材料的折射率, I 为光束的入射角, I' 为光束的折射角。图 2 为光束水平移原理图。若一路激光光束与棱镜的斜面呈 45° 入射,若在竖直方向上平移 9 mm,棱镜选用融石英 JGS1 光学玻璃,棱镜的角度为 45° ,则可以算出棱镜的长度应该为 24.7 mm,高度尺寸为 20 mm。

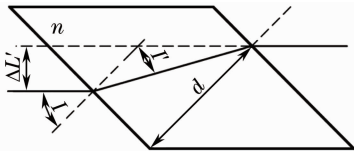


图 2 光束水平移原理图

Fig. 2 Schematic of beam displacement

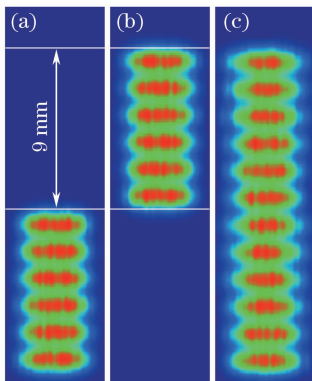


图 3 半导体激光合束原理图。(a)空间合束前的光束；(b)平移后的光束；(c)空间合束后的光束

Fig. 3 Principle of the diode laser combination. (a) Beam before space combination; (b) beam after displacement; (c) beam after space combination

图 3 为半导体激光的合束原理图。空间合束后在快轴上形成了 12 层激光叠加的光源,此时快轴方向的光束质量为

$$f_{\text{BPP-FA}} = 18/2 \text{ mm} \times 3/2 \text{ mrad} = 13.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (6)$$

为了保证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,将两个空间合束后形成的单元通过偏振合束棱镜(PBS)进行合束。由于实验中所使用的半导体激光器均为 P 偏振光,首先通过 $\lambda/2$ 波片将其中一个单元转变为 S 偏振光,然后经过 PBS 棱镜时,P 偏振光透过,S 偏振光反射,两路入射光束在 PBS 的偏振合束膜上同等面积下功率加倍,所以理论上偏振合束后光束质量不变。

偏振合束后的快轴和慢轴方向光束质量接近,但是此时快轴发散角为 3 mrad,慢轴发散角为 8.8 mrad,慢轴发散角近似于快轴的 3 倍,因此需要设计一套扩束系统,将慢轴光束进行扩束,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。实验中采用倒置伽利略望远结构设计了一套 3 倍的柱面扩束系统,由一个平凹柱面镜和一个平凸柱面镜组成,曲率分别为 $r_1 = 11.33 \text{ mm}$, $r_2 = 48.72 \text{ mm}$ 。通过扩束系统后,慢轴发散角缩小了 3 倍,与快轴发散角近似相等。利用 Zemax 光学设计软件设计了一套消球差聚焦透镜组对合束后的光束进行聚焦,透镜焦距为 74 mm,传递函数接近衍射极限,保证了高的耦合效率。

3 实验结果分析

实验中采用波长为 808 nm 的单管半导体激光器,每个激光器在 8.5 A 电流激励下连续输出功率为 8 W,斜率效率 1.1 W/A,电光转换效率 45%。将 24 只激光器分成 4 组分别焊接到 4 个阶梯热沉上,每个阶梯热沉在快轴方向上有 6 只激光器。首先通过 FAC 和 SAC 将所有激光器进行快慢轴准直;采用 OPHIR 公司的 CCD 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 4 计算出

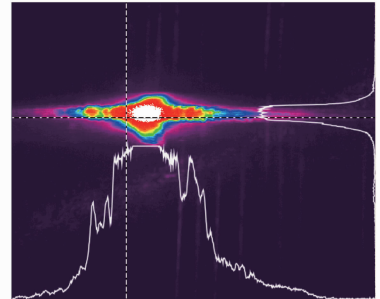


图 4 CCD 测量的光束准直图

Fig. 4 Beam collimation figure measured by CCD

单管半导体激光器准直后快轴方向的发散角为 4 mrad, 超过实验设计值, 这也导致了快轴光束质量大于设计值。这一误差主要是因为单管半导体激光器的快轴呈高斯分布, 准直后仍然会有一部分能量分布在主光强范围以外, 导致发散角变大。由于慢轴准直镜在加工的时候不能绝对地保证垂直度, 也影响了快轴的准直效果。将每两个阶梯热沉上的激光器发出的准直激光在快轴方向上进行空间合束; 再将两个空间合束后形成的单元进行偏振合束; 最后通过自行设计的扩束聚焦系统耦合进芯径为 300 μm 、NA 为 0.22 的光纤中。

图 5 和图 6 分别为采用 Focus Monitor 光束质量分析仪测量的聚焦光斑和光束质量 M^2 因子。从图 5 中可以看出快轴光斑尺寸比慢轴大, 主要是由于之前分析的准直时快轴发散角超出设计值引起的。

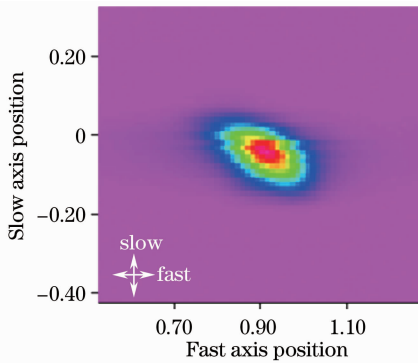


图 5 聚焦光斑强度分布图

Fig. 5 Measured intensity distribution of beam focus spot

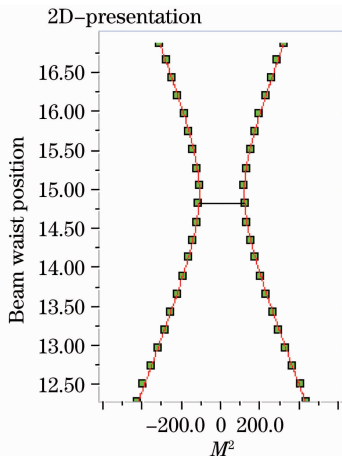


图 6 光束质量测量图

Fig. 6 Measured diagram of beam quality

通常 BPP 值是通过测量 M^2 因子来计算得到的, 图 6 可得出 M^2 为 72,

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} f_{\text{BPP}} \quad (7)$$

由(6)式推算出快轴方向光束质量为 18.5 $\text{mm} \cdot \text{mrad}$, 慢轴方向光束质量为 14.2 $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。慢轴光束质量大于设计值, 一方面是由于慢轴发散角随着电流的增加而变大, 光束质量变差; 另一方面是在将半导体激光器进行焊接时, 低温焊料熔化产生热应力使激光器在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光束出现微小的指向性误差, 但在扩束的过程中指向性误差增大导致光斑尺寸变大, 在聚焦过程中使得聚焦光束的数值孔径值大于设计值, 这部分能量在光纤的传输过程中损耗。

实验中所有的半导体激光器采用串联方式, 在室温下选取不同工作电流测得光纤输出功率, 根据测试数据与激光器原始功率的比较得到模块的功率-电流特性曲线和耦合效率。如图 7 所示, 当模块工作电流为 8.5 A 时, 光纤输出功率为 162 W, 耦合效率达到 84%。实验中所使用的高能光纤端面没有镀膜, 产生菲涅耳反射, 两个端面各损失了 4% 的能量^[13]。

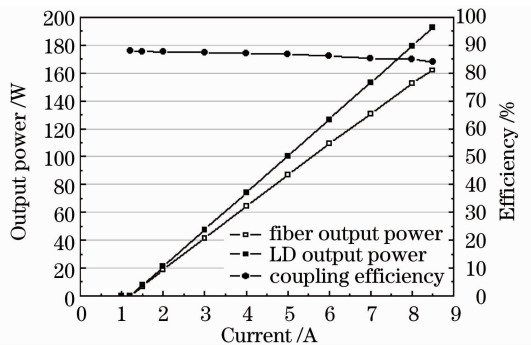


图 7 模块功率-电流曲线及耦合效率曲线

Fig. 7 Power-current curves and coupling efficiency

4 结 论

采用单管合束技术实现了多只激光器的集成, 多路半导体激光合束并耦合进光纤, 模块中所有半导体激光器采用串联方式, 在 8.5 A 电流激励下, 通过芯径为 300 μm 、NA 为 0.22 的光纤输出功率为 162 W, 耦合效率达 84%。目前正在解决快轴光束质量偏差的问题, 以使快轴光束质量接近设计值。

参 考 文 献

1 Cheng Xiangai, Fu Xiquan, Sun Yunqiang *et al.*. Failure of array CCD irradiated by high-repetitive femto-second laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(11): 1783~1786

- 程湘爱, 傅喜泉, 孙运强等. 高重复频率飞秒激光对面阵 CCD 的干扰和破坏[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(11): 1783~1786
- 2 Cai Yue, Ye Xisheng, Ma Zhiliang *et al.*. Experiment of 170 ps laser pulse irradiation effect on visible plane array Si-CCD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(2): 457~462
- 蔡跃, 叶锡生, 马志亮等. 170 ps 激光脉冲辐照可见光面阵 Si-CCD 的实验[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(2): 457~462
- 3 Wang Siwen, Guo Lihong, Zhao Shuai *et al.*. Experiments of high-power CO₂ laser disturbance to far-field HgCdTe detectors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(4): 798~804
- 王思雯, 郭立红, 赵帅等. 高功率 CO₂ 激光对远场 HgCdTe 探测器的干扰实验[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(4): 798~804
- 4 Zhou Jianmin, Fu Youyu, Guo Jin *et al.*. Research on the soft damage of CCD induced by pulse laser[J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(2): 20~21
- 周建民, 付有余, 郭劲等. 脉冲激光对 CCD 的软损伤技术研究[J]. 激光杂志, 2005, **26**(2): 20~21
- 5 Wang Xiangpeng, Li Zaijin, Wang Lijun *et al.*. Smile effect and package technique for diode laser arrays[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(3): 552~557
- 王祥鹏, 李再金, 王立军等. 半导体激光器列阵的 Smile 效应与封装技术[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(3): 552~557
- 6 D. Schroder, E. Werner, A. Franke *et al.*. Roadmap to low cost, high brightness diode laser power out of the fiber[C]. *SPIE*, 2010, **7583**: 758309
- 7 J. Pierer, S. Grossmann, G. Spinola Durante *et al.*. Automated assembly processes of high power single emitter diode lasers for 100 W in 105 $\mu\text{m}/\text{NA}$ 0.15 fiber module[C]. *SPIE*, 2011, **7918**: 791801
- 8 Kirk Price, Frank Pfeffer, Paul Leisher *et al.*. kW-class industrial diode lasers comprised of single emitters[C]. *SPIE*, 2010, **7583**: 75830E
- 9 David Havrilla, Marco Holzer, Rüdiger Brockmann *et al.*. Dramatic advances in direct diode lasers [C]. *SPIE*, 2010, **7583**: 75830B
- 10 Wang Xiangpeng, Peng Hangyu, Wang Lijun *et al.*. 880 nm high-power fiber-coupled diode laser module for active illumination[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(7): 1500~1504
- 王祥鹏, 彭航宇, 王立军等. 880 nm 半导体激光主动照明光纤耦合模块[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(7): 1500~1504
- 11 Peng Hangyu, Gu Yuanyuan, Zhu Hongbo *et al.*. Study on beam shaping of high power diode lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0202010
- 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
- 12 M. Werner, C. Wessling, S. Hengesbach *et al.*. 100 W/100 μm passively cooled, fiber coupled diode laser at 976 nm based on multiple 100 μm single emitters[C]. *SPIE*, 2009, **7198**: 71980P
- 13 Zhu Hongbo, Hao Mingming, Wang Lijun *et al.*. High efficiency module of fiber coupled diode laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, **32**(11): 1147~1151
- 朱洪波, 郝明明, 王立军等. 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

栏目编辑: 宋梅梅