

三波长合束高亮度半导体激光光源

张 俊^{1,2} 彭航宇^{1*} 刘 云¹ 秦 莉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 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 半导体激光器以其突出的优点具有广泛的应用前景,但受光束质量限制,使其很难作为直接光源应用在对功率和光束质量均有较高要求的领域。采用斜 45°柱透镜阵列光束整形技术、自偏振合束技术和三波长合束技术,将 3 种波长的 8 个半导体激光阵列合束,研制出一种连续功率为 500 W、电光转换效率为 39.5%、光参量为 12.44 mm·mrad、亮度为 42.8 MW/(cm²·sr)的半导体激光光源,可作为直接光源应用于工业和国防等领域。

关键词 激光器;高亮度;光束整形;自偏振合束;波长合束

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0402011

High Brightness Diode Laser Source Based on Three-Wavelength Multiplexing

Zhang Jun^{1,2} Peng Hangyu¹ Liu Yun¹ Qin Li¹ Shan Xiaonan¹ Wang Lijun¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Because of the prominent advantages, diode lasers have a significant prospect of application. But limited by the beam quality, it is difficult to be a direct source applied in the fields demanding for power, beam quality and brightness at the same time. The technologies of beam shaping of 45° tilted cylindrical lens, self-polarization multiplexing and three-wavelength multiplexing are employed to couple 8 bars with three wavelengths into a laser beam, and a diode laser source is developed with continuous wave (CW) power of 500 W, electro-optical conversion efficiency of 39.5%, holistic beam quality of 12.44 mm·mrad and brightness of 42.8 MW/(cm²·sr), which can be applied directly in the fields of materials processing and defense.

Key words lasers; high brightness; beam shaping; self-polarization multiplexing; wavelength multiplexing

OCIS codes 140.2020; 140.3298; 140.3300; 140.3320

1 引 言

近年来,随着半导体激光技术的快速发展,激光器件的性能也实现了重大突破:电光转换效率达 70%以上^[1~7]、单阵列连续输出功率超过千瓦^[8]、100 μm 条宽单管输出功率超过 20 W^[9~14]、高功率

连续工作寿命长达数万小时^[15~18]等。但由于自身结构原因导致的光场分布不均匀、光束质量差和功率密度低等缺点^[19],使得高功率半导体激光器很难作为直接光源应用在激光加工和国防领域,这也成了半导体激光发展的瓶颈问题。激光合束技术被证

收稿日期: 2012-10-24; 收到修改稿日期: 2012-12-03

基金项目: 国家 863 计划(2012AA040210)、吉林省科技厅发展计划项目(20112106)和院地合作项目(2011CJT0003)资助课题。

作者简介: 张 俊(1986—),男,博士,主要从事大功率半导体激光器线阵合束技术方面的研究。

E-mail: jzh_ciomp@163.com

导师简介: 王立军(1946—),男,研究员,博士生导师,主要从事大功率半导体激光技术方面的研究。

E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: imphy@163.com

明是解决该问题的有效途径之一。

国际上激光合束技术的研究发展十分迅速,基于激光阵列的半导体激光合束光源已实现数千瓦甚至上万瓦功率连续输出^[20~22],作为直接光源已应用于激光焊接、激光熔覆和表面硬化等加工领域^[23,24],研制出芯径为 400 μm 、数值孔径(NA)为 0.1 的光纤连续输出的 2000 W 商用激光光源,光束质量为 20 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$,亮度达到 50.7 $\text{MW}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr})$ 。国内发展相对滞后,西安炬光开发的激光光源在 76.5 mm 工作距离处实现了尺寸为 2 $\text{mm}\times 8\text{ mm}$ 、功率为 4000 W 的激光输出,未提供光束质量指标。北京工业大学研制的 1 kW 半导体激光光源快轴方向光束质量为 26.1 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$,未提供慢轴方向的光束质量^[25]。电子十三所研制的激光迭阵实现 1600 W 功率输出,快轴发散角准直到 6 mrad ^[26]。本实验组开展了系列激光合束的研究^[27~29],其中采用 20 个激光阵列实现了 1030 W 功率、两轴光参量积(BPP)分别为 18.3 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 和 17.7 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 的激光输出,亮度为 19.9 $\text{MW}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr})$ ^[29]。

本文在前期工作的基础上,通过自偏振合束和三波长合束技术,将 3 种波长的 8 个半导体激光阵列激光合束,实现连续功率 500 W、电光转换效率 39.5%、X 方向和 Y 方向的光参量积分别为 8.58 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 和 8.51 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、整体光参量积为 12.44 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、亮度为 42.8 $\text{MW}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr})$ 的激光输出,进一步提高了半导体激光亮度。

2 理论设计

半导体激光器的光束质量一般用光参量积 Q 来评价,定义为束腰半径 W_0 与远场发散半角 $\theta/2$ 的乘积^[19]:

$$Q = W_0 \cdot \theta/2, \quad (1)$$

表 1 半导体激光阵列结构参数表

Table 1 Structure parameters of the diode laser bar

Wavelength / nm	Width of bars / mm	Number of emitters	Width of emitters / μm	Filling factor / %	Θ_x (95% of power) / ($^\circ$)	Θ_y (95% of power) / ($^\circ$)	Diffraction limited Q / ($\text{mm}\cdot\text{mrad}$)
793	10	19	1 \times 100	20	7	63	0.253
825	10	19	1 \times 150	30	7	63	0.263
870	10	19	1.5 \times 100	20	7	46	0.277

斜 45 $^\circ$ 柱透镜阵列首先被用来对半导体激光阵列整形^[28],如图 1 所示,它将激光阵列上每个发光点输出的光束直接翻转 90 $^\circ$,使得激光束 Y 方向变为慢轴方向,而 X 方向转变为若干个发光点快轴方向的叠加,呈 19 条竖线,该方向整个光斑尺寸约为 9.4 mm,由于快

Q 值越小,光束质量越好。

亮度(B)表示单位面积单位立体角内的激光功率,用来评价激光束能够被聚焦的能力。相同功率条件下,亮度越高,代表能够被聚焦的光斑越小,获得的功率密度就越大,因此不论是作为抽运源还是直接光源,都具有非常重要的意义^[19]。亮度具体定义为

$$B = \frac{P}{A \cdot \Omega}, \quad (2)$$

式中 A 为激光束腰处的光斑面积, Ω 为激光束的立体角。

由于半导体激光为非旋转对称分布,在相互垂直的 X 和 Y 方向的束腰半径 W_{x0} 和 W_{y0} 与发散角 θ_{x0} 和 θ_{y0} 均各不相同,近似于矩形分布,则其光斑束腰面积和立体角分布分别为 $A = 4W_{x0}W_{y0}$, $\Omega = \theta_{x0}\theta_{y0}$,对应的亮度 B 变为

$$B = \frac{P}{16Q_xQ_y}, \quad (3)$$

式中 $Q_x = W_{x0}\theta_{x0}/2$, $Q_y = W_{y0}\theta_{y0}/2$,分别为两个方向的光参量积。

实验采用的半导体激光器结构参数如表 1 所示。为了便于说明,坐标定义如下: X 轴平行于激光条外延层,Y 轴垂直于外延层,激光出射方向为 Z 轴。 Θ_x 表示平行于外延层方向的发散角,即慢轴方向发散角; Θ_y 为垂直于外延层的发散角,即快轴发散角。

在未进行光束变换之前,X 为慢轴方向,Y 为快轴方向。根据(1)式可知,三种波长激光器快轴方向光参量积 Q_f 为 0.275~0.3 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$,接近衍射极限($Q_d = \lambda/\pi \approx 0.263\text{ mm}\cdot\text{mrad}$),慢轴方向光参量积 $Q_s = 349\text{ mm}\cdot\text{mrad}$,约为快轴方向的 1269 倍,两轴光参量积差别大。另外 793 nm 和 870 nm 激光器上发光点的慢轴方向光束质量均为 3.05 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$,825 nm 为 4.58 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$,是 793 nm 和 870 nm 的 1.5 倍。

轴准直,该方向的发散角可达到 7 mrad ,则 X 方向的光束质量变为 16.45 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。Y 方向的光参量积由自身结构决定,分别为 3.05、4.58、3.05 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$,两轴的光束质量差别由上千倍降至几倍,有利于两轴光束质量均衡。

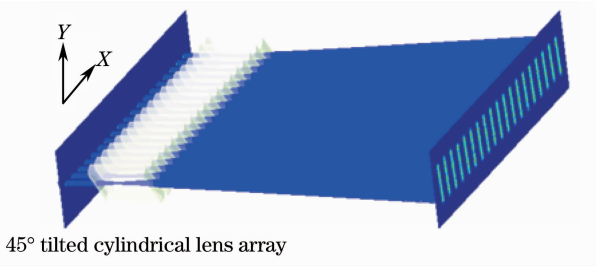


图 1 经过斜 45°柱透镜阵列对快慢轴光束翻转
Fig. 1 Beam shaping with a 45° tilted cylindrical lens array

为了使三者在 Y 方向的 Q 值一致,825 nm 激光器在该方向叠加 2 层,793 nm 和 870 nm 激光器分别叠加 3 层,在不考虑中间缝隙的条件下,三者在此 Y 方向的 Q 值均为 9.16 mm·mrad,如图 2 所示。

为了降低激光束在 X 方向的 Q 值,利用半导体激光输出线偏振光特性,采用如图 3 所示的自偏振合束方式,将宽度为 d 的 p 偏振激光,一半经过半波片变为 s 偏振光,与另一半 p 偏振光合束,在发散角不变的条件下,激光光斑减小一半变为 d/2,从而将 Q 值减小一半,变为 8.3 mm·mrad。

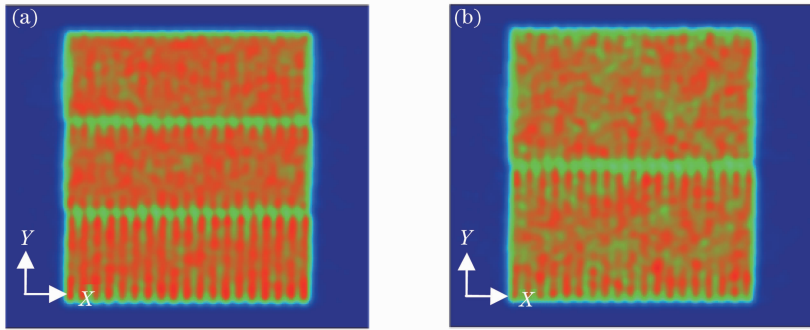


图 2 (a) 792 nm 和 870 nm 激光在 Y 轴方向叠加 3 层; (b) 825 nm 激光在 Y 轴方向叠加 2 层
Fig. 2 (a) Overlap 3 layers at the Y axis of 792 nm and 870 nm; (b) overlap 2 layers at the Y axis of 825 nm

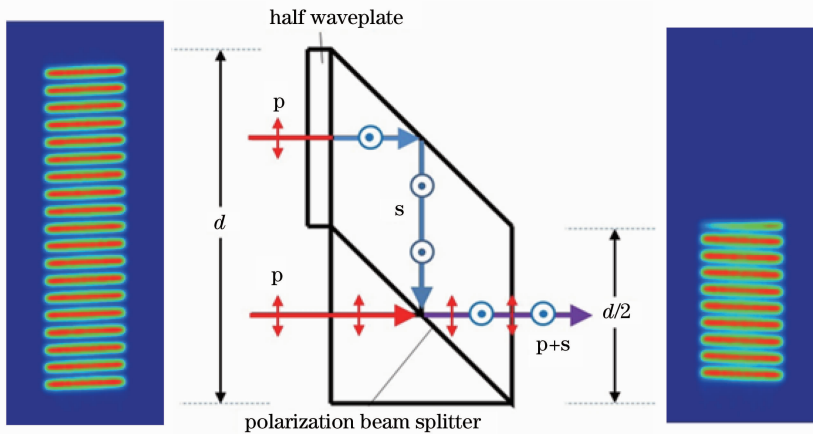


图 3 自偏振合束光斑整形
Fig. 3 Beam shaping by self-polarization multiplexing

为了提高输出功率,采用两次波长合束实现三束不同波长的激光完全重叠在一起的方案。考虑到所使用的波长合束镜透射效率明显低于反射效率,为提高合束效率,尽量减小透射光的数量,采用图 4 所示方式合束,其中 793 nm 激光经过一次透射(T),825 nm 激光经过一次透射和一次反射(R),870 nm 激光经过两次反射。

为了均衡两个方向的发散角和光斑尺寸,在合束后采用倒置式望远镜系统对激光束进行扩束,压缩 X 方向的发散角。

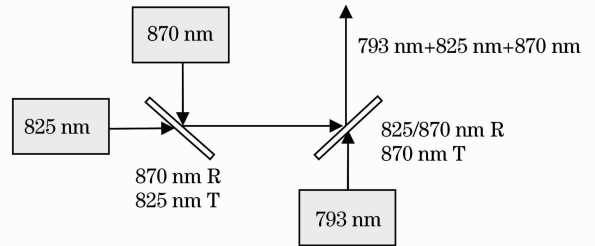


图 4 波长合束过程
Fig. 4 Process of wavelength multiplexing

3 实验结果及分析

实验采用 8 个传导冷却热沉封装的半导体激光阵列,其中 793 nm 和 870 nm 激光器各 3 个,825 nm 为 2 个,固定在台阶底座热沉上,每个激光器首先经过快轴准直,45°斜柱透镜阵列光束变换和慢轴准直,然后通过相应的反射镜 90°偏折光路,在 Y 方向实现空间叠加。图 5(a)为 3 个 870 nm 激光器空间合束后

光斑图,X 方向为 10 mm,为快轴方向,Y 方向的空间间隔主要由该方向慢轴准直后的光斑宽度决定,对于 793 nm 和 870 nm 激光器,其间隔为 4.5 mm,而对于 825 nm 激光器,其间隔为 6.8 mm。合束之后的光束经过自偏振合束棱镜,实现光斑在 X 方向的对折,在 X 方向的光斑宽度变为 5 mm,如图 5(b)所示。

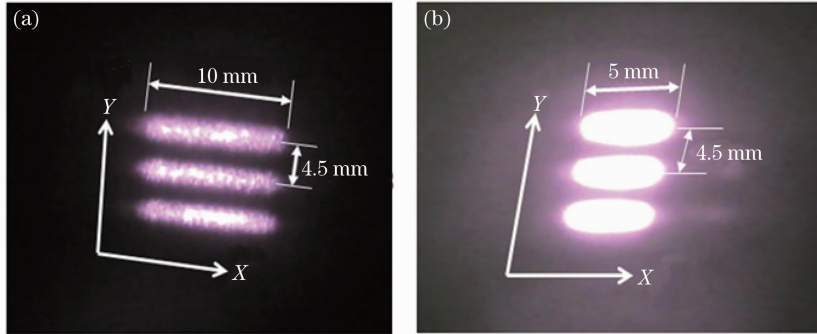


图 5 3 个 870 nm 激光器。(a)空间合束光斑图;(b)自偏振合束后光斑图

Fig. 5 Laser spots of (a) spatial overlapping and (b) self-polarization multiplexing by 3 laser bars of 870 nm

以下测试均在冷却液流量为 11 L/min,温度为 18 °C 的条件下进行。

沿光轴方向、距出光口 0.1 m 处,采用 Ophir 5000 W 水冷功率计测激光连续输出功率,功率效率曲线如图 6 所示。当驱动电流达到 87 A 时,连续输出功率为 500 W,此时电光转换效率为 37.5%,当电流为 50 A 时,获得的最高转换效率为 39.5%。

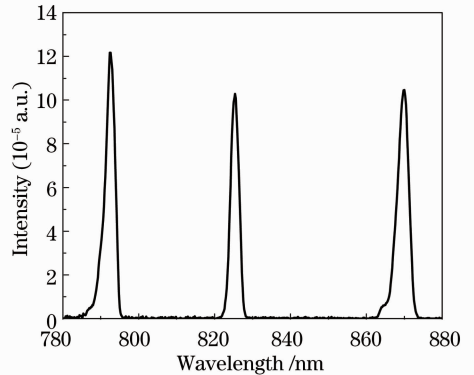


图 7 当 $I=70$ A 时半导体激光光源输出激光光谱, 3 个中心波长分别为 792.5、825.4、870.0 nm

Fig. 7 Spectrum of the diode laser source at current of 70 A at the central wavelengths of 792.5, 825.4, 870.0 nm

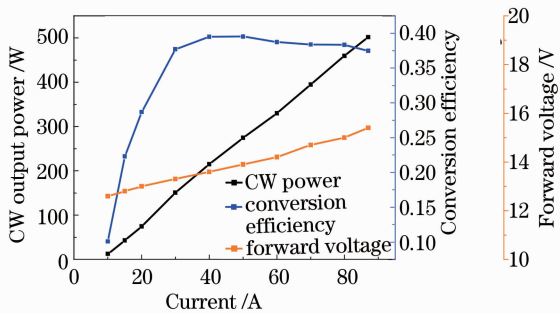


图 6 半导体激光光源的功率、效率和电压随电流的变化曲线

Fig. 6 Curve of the diode laser coupling source of optical power, forward voltage and conversion efficiency versus operating current

采用 Ando AQ6317B 光纤光谱仪测量激光器输出光谱,在 $I=70$ A 时,输出激光光谱如图 7 所示。3 个中心波长分别为 792.5、825.4、870.0 nm,其半峰全宽光谱宽度分别为 2.8、2.7、3.4 nm。

在未进行任何衰减的条件下测量激光光束质量。激光束首先经过焦距为 100 mm 的透镜聚焦,然后利用光束质量分析仪,扫描焦点处前后共 6 倍瑞利距离的光斑并拟合,当电流为 50 A 时,测试结果如图 8 所示,以二阶距法标定光斑尺寸^[30],测得整体光束质量为 12.4 mm·mrad。

聚焦光束焦点处光斑如图 9 所示,X 和 Y 方向的光斑尺寸分别为 0.264 mm 和 0.252 mm,由光场分布可知,X 为快轴方向,Y 为慢轴方向,聚焦前激光束在快轴和慢轴方向的发散角分别为 2.64 mrad 和 2.52 mrad。

采用 Primes Focus Monitor 光束质量分析仪,

presentation: 2nd moment

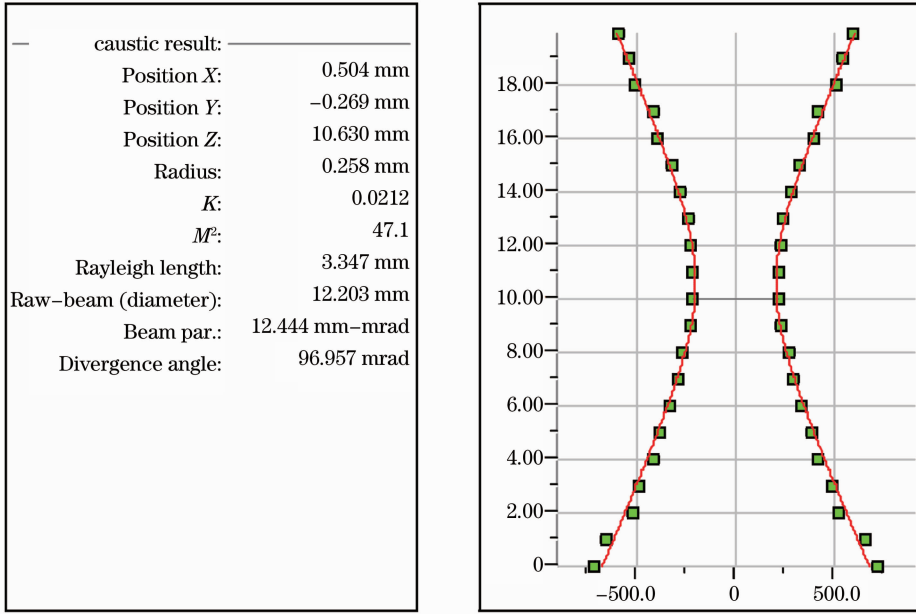


图 8 $I=50$ A 时,整体光束质量为 $12.4 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ (测试仪器:Primes Focus Monitor)

Fig. 8 Holistic beam quality of $12.4 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ at current of 50 A tested by Primes Focus Monitor

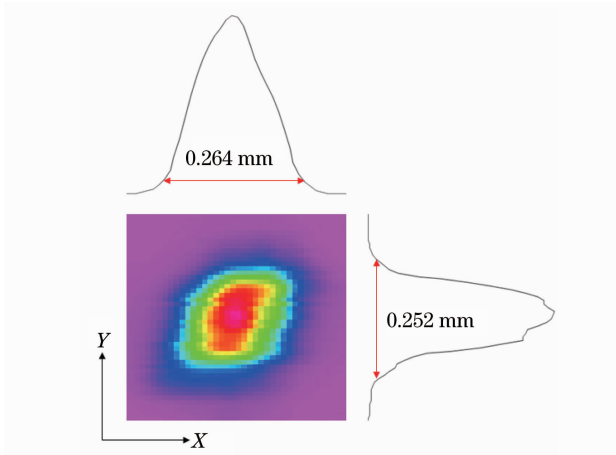


图 9 $I=50$ A 时焦点处的光强分布

Fig. 9 Intensity distribution of the spot in the focus at current of 50 A

距出光口 0.1 m 处的光斑由 Spiricon CCD 成像方式测得,电流为 7.2 A 时的测试结果如图 10 所示,在 Y 方向可明显看到 3 个光斑,相邻光斑间隔为 4.5 mm ,由于测试电流在 870 nm 激光器的阈值附近, 825 nm 激光器的阈值较高,光斑不明显,此时光斑外形尺寸为 $13 \text{ mm}\times 13.5 \text{ mm}$ 。

根据(1)式可得到两个方向的光束质量: $Q_x = 8.58 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$; $Q_y = 8.51 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 。对角线的光束质量为 $12.1 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$,与测试的整体光束质量 $12.4 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 匹配。

由激光亮度(3)式,得到该半导体激光光源亮度

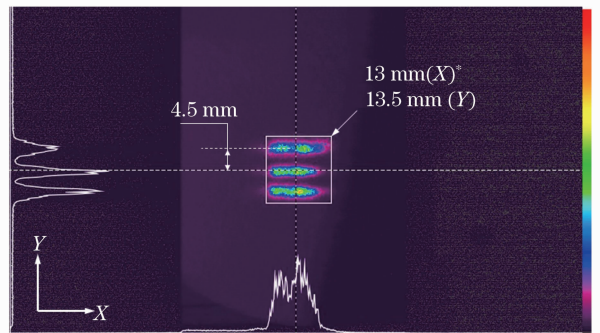


图 10 $I=7.2$ A 时,距出光口 0.1 m 处的光场分布

(测试仪器:Spiricon CCD)

Fig. 10 Intensity distribution of the spot at 0.1 m from the outlet at the current of 7.2 A , measured by Spiricon CCD

为 $42.8 \text{ MW}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr})$,若聚焦成数值孔径为 0.22 的光束,其束腰处功率密度将达到 $6.51 \text{ MW}/\text{cm}^2$ 。该激光源既可耦合进光纤柔性输出,也可以作为直接光源应用。在该激光源的基础上,耦合更多的波长,如 915 、 940 、 980 、 1060 nm 等,在光束质量不变的条件,输出功率和亮度将获得倍数增加。

测得的数据中, Y 方向的 Q 值低于理论值,主要原因分析如下:慢轴准直镜设计焦距为 36.8 mm ,准直后的发散角和光斑尺寸分别为 2.72 mrad 和 4.50 mm 。而根据实际测得慢轴方向的发散角为 2.52 mrad ,低于设计值,则推测慢轴准直镜的焦距大于设计值,约为 40 mm ,相应的准直光斑为 4.85 mm 。

而在经过与之对应的反射镜反射时,由于预留空间保持 4.5 mm,大于 4.5 mm 的光直接被反射镜漏掉或挡掉而损失,最终输出光斑仍保持 4.5 mm,因此相应的单束激光输出光束质量就小于理论值,实际为 2.835 mm·mrad,三束光合束后为 8.51 mm·mrad。

4 结 论

综合应用光束整形、空间合束、自偏振合束和三波长合束技术,将 3 种不同波长的 8 只半导体激光阵列耦合成一束光,实现连续功率为 500 W、整体光束质量为 12.44 mm·mrad、亮度达到 42.8 MW/(cm²·sr)的高功率、高光束质量、高亮度的激光输出。

目前,基于半导体激光器的直接光源已成功应用在激光加工、激光医疗等领域。随着高功率半导体激光器光束质量和亮度的提高,具有高效节能、高功率、高光束质量、高亮度的半导体激光光源将在未来激光加工领域占有重要地位,并将在国防领域发挥重要作用。

参 考 文 献

- 1 N. A. Pikhtin, S. O. Slipchenko, Z. N. Sokolova *et al.*. 16 W continuous-wave output power from 100 μm -aperture laser with quantum well asymmetric heterostructure[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(22): 1413~1414
- 2 M. Kanskar, T. Earles, T. J. Goodnough *et al.*. 73% CW power conversion efficiency at 50 W from 970 nm diode laser bars[J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(5): 245~247
- 3 Matthew Peters, Victor Rossin, Matthew Everett *et al.*. High-power, high-efficiency laser diodes at JDSU[C]. *SPIE*, 2007, **6456**: 64560G
- 4 Paul Crump, Weimin Dong, Mike Grimshaw *et al.*. 100-W + diode laser bars show >71% power conversion from 790-nm to 1000-nm and have clear route to >85%[C]. *SPIE*, 2007, **6456**: 64560M
- 5 Götz Erbert, Frank Bugge, Andrea Knigge *et al.*. Highly reliable 75 W InGaAs/AlGaAs laser bars with over 70% conversion efficiency[C]. *SPIE*, 2006, **6133**: 61330B
- 6 Hanxuan Li, Irving Chyr, Denny Brown *et al.*. Ongoing development of high-efficiency and high-reliability laser diodes at Spectra-Physics[C]. *SPIE*, 2007, **6456**: 64560C
- 7 P. A. Crump, M. Grimshaw, J. Wang *et al.*. 85% power conversion efficiency 975-nm broad area diode lasers at -50 °C, 76% at 10 °C [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, 2006. JWB24
- 8 V. V. Bezotosnyi, V. Yu. Bondarev, O. N. Krokhin *et al.*. Laser diodes emitting up to 25 W at 808 nm [J]. *Quantum Electron.*, 2009, **39**(3): 241~243
- 9 M. Zorn, R. Hülsewede, H. Schulze *et al.*. New developments of high-power single emitters and laser bars at JENOPTIK[C]. *SPIE*, 2011, **7918**: 79180S
- 10 P. Crump, C. Roder, R. Staske *et al.*. Limitations to peak continuous wave power in high power broad area single emitter 980 nm diode lasers[C]. Lasers and Electro-Optics 2009 and the European Quantum Electronics Conference, 2009
- 11 B. Petrescu-Prahova, P. Modak, E. Goutain *et al.*. 253 mW/ μm maximum power density from 9xx nm epitaxial laser structures with d/Γ greater than 1 μm [C]. IEEE 21st Int. Semicond. Laser Conf., 2008. 135~136
- 12 Norbert Lichtenstein, Martin Krejci, Yvonne Manz *et al.*. Recent developments for BAR and BASE: setting the trends [C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 68760C
- 13 Zuntu Xu, Wei Gao, Lisen Cheng *et al.*. Highly reliable, high brightness, 915 nm laser diodes for fiber laser applications[C]. *SPIE*, 2008, **6909**: 69090Q
- 14 P. Crump, G. Blume, K. Paschke *et al.*. 20 W continuous wave reliable operation of 980 nm broad-area single emitter diode lasers with an aperture of 96 μm [C]. *SPIE*, 2009, **7198**: 719814
- 15 D. Lorenzen, Jens Meusel, Dominic Schröder *et al.*. Passively cooled diode lasers in the CW power range of 120 to 200 W[C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 68760Q
- 16 R. Hülsewede, H. Schulze, J. Sebastian *et al.*. High brilliance and high efficiency: optimized high power diode laser bars[C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 68760F
- 17 M. Zorn, R. Hülsewede, H. Schulze *et al.*. JENOPTIK diode lasers and bars optimized for high-power applications in the NIR range[C]. *SPIE*, 2010, **7583**: 75830U
- 18 Victor Rossin, Matthew Peters, Erik Zucker *et al.*. Highly reliable high-power broad area laser diodes [C]. *SPIE*, 2006, **6104**: 610407
- 19 F. Bachmann, P. Loosen, R. Poprawe. High Power Diode Lasers Technology and Applications [M]. New York: Springer, 2007. 121~125
- 20 David G. Matthews, Klaus Kleine, Volker Krause *et al.*. A 15 kW fiber-coupled diode laser for pumping applications [C]. *SPIE*, 2012, **8241**: 824103
- 21 David Havrilla, Marco Holzer, Rüdiger Brockmann *et al.*. Dramatic advances in direct diode lasers[C]. *SPIE*, 2010, **7583**: 75830B
- 22 Harald König, Günther Grönninger, Christian Lauer *et al.*. Scaling brilliance of high power laser diodes[C]. *SPIE*, 2010, **7583**: 75830T
- 23 Andre Timmermann, Jens Meinschien, Peter Bruns *et al.*. Next generation high-brightness diode lasers offer new industrial applications[C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 68760U
- 24 Stephan Strohmaier, Christoph Tillkorn, Peter Olschowsky *et al.*. High-power, high-brightness direct-diode lasers[J]. *Optics & Photonics News*, 2010, **21**(10): 25~29
- 25 Ding Peng, Cao Yinhua, Su Guoqiang *et al.*. 1 kW high power diode laser with polarization coupled by Gran-Taylor prism[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 290~293
丁鹏,曹银花,苏国强等. 使用格兰-泰勒棱镜偏振耦合的 1 kW 大功率半导体激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 290~293
- 26 Xu Huiwu, Ren Yongxue, An Zhenfeng *et al.*. Packaging of 808 nm 1500 W continuous wave operation perpendicularity laser diode stack [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2769~2773
徐会武,任永学,安振峰等. 808 nm 连续 1500 W 阵列激光器封装[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2769~2773
- 27 Peng Hangyu, Gu Yuanyuan, Shan Xiaonan *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,单肖楠等. 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
- 28 Peng Hangyu, Shan Xiaonan, Ma Junlong *et al.*. 2600 W high efficiency laser diode source with polarization coupling [J]. *Chinese J. Luminescence*, 2011, **32**(10): 1036~1040
彭航宇,单肖楠,马军龙等. 2600 W 偏振耦合高效率半导体激光光源[J]. *发光学报*, 2011, **32**(10): 1036~1040
- 29 Zhang Jun, Shan Xiaonan, Liu Yu *et al.*. kW-output high beam quality diode laser linear array coupling source [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0202010
张俊,单肖楠,刘云等. 千瓦级高光束质量半导体激光阵列合束光源[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0202010
- 30 ISO 11146-2005, Laser and Laser-Related Equipment-Test Methods for Laser Beam Widths, Divergence Angles and Beam Propagation ratios [S]. Switzerland: ISO, 2005

栏目编辑: 宋梅梅