

# 千瓦级高光束质量半导体激光线阵合束光源

张俊<sup>1,2</sup> 单肖楠<sup>1</sup> 刘云<sup>1\*</sup> 张金龙<sup>1</sup> 彭航宇<sup>1</sup> 王立军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 低光束质量严重限制了大功率半导体激光器的应用, 为了满足日益增长的工业和国防领域应用需求, 发展兼具高功率和高光束质量激光输出的半导体激光光源具有重要意义。采用线阵合束方式集成 20 个传导热沉封装半导体激光单元, 结合斜 45° 柱透镜阵列整形方法和准直技术, 直接均衡激光束快慢轴方向的光斑和发散角, 通过波长合束和偏振合束, 研制出一种可实用化、连续输出功率 1030 W、快慢轴方向光参量积分别为 18.3 mm·mrad 和 17.7 mm·mrad、最大电-光转换效率 44% 的 808 nm 和 870 nm 双波长半导体激光合束光源, 实现了高效率、高功率和高光束质量激光输出, 可作为直接光源应用于工业和国防领域。

**关键词** 激光光学; 半导体激光; 高光束质量; 线阵合束; 斜 45° 柱透镜阵列

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0202010

## Kilowatt-Output and High Beam Quality Diode Laser Linear Array Coupling Source

Zhang Jun<sup>1,2</sup> Shan Xiaonan<sup>1</sup> Liu Yun<sup>1</sup> Zhang Jinlong<sup>1</sup> Peng Hangyu<sup>1</sup> Wang Lijun<sup>1</sup>

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

**Abstract** The application of high power diode lasers is severely limited by their poor beam quality. In order to meet the increasing demands for industrial and defense applications, it is important to develop diode laser sources with both high power and high beam quality. The technology of linear array coupling is applied to multiplex twenty passively cooled diode lasers. 45° tilted cylindrical lens arrays and collimators are recommended to make the beam sizes and divergences of fast and slow axes equal, respectively. Wavelength coupling and polarization coupling finally are followed. A dual-wavelength of 808 nm and 870 nm diode laser coupling source is successfully developed, with continuous output power of 1030 W, beam parameter products of fast and slow axes of 18.3 mm·mrad and 17.7 mm·mrad, respectively, and maximum electro-optical conversion efficiency up to 44%. High efficiency, high power and high beam quality laser output is achieved. It can be used as direct source in industrial and defense areas.

**Key words** laser optics; diode laser; high beam quality; linear array coupling; 45° tilted cylindrical lens array

**OCIS codes** 140.2020; 140.3298; 140.3300; 140.3320; 140.3325; 140.5960

## 1 引言

半导体激光器具有电-光转换效率高、使用寿命

长、体积小和重量轻等优点。小功率半导体激光器已普遍应用于光通信和光存储等领域<sup>[1]</sup>, 但大功率

收稿日期: 2011-09-05; 收到修改稿日期: 2011-11-17

基金项目: 国家 863 计划(20069AA032705)、吉林省科技厅重大项目(10ZDGG001)和吉林省科技发展计划项目(20080517)资助课题。

作者简介: 张俊(1986—), 男, 博士研究生, 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: hx5252@sohu.com

半导体激光器受光束质量限制,作为直接光源尚不能满足工业和国防领域的应用需求。为了扩展半导体激光器的应用市场,研制具有高功率和高光束质量激光输出的半导体激光光源具有重要的意义,这也是近年来半导体激光技术研究的重要方向之一<sup>[2]</sup>。

国际上关于高功率高光束质量半导体激光器的研制已取得重大进展,其实现方式多样化,德国 Laserline 公司基于迭阵合束已开发出多种型号的半导体激光加工光源,其中 2 kW 功率光参量积仅为 20 mm·mrad。德国 Limo 公司采用线阵实现了 1200 W 功率、光参量积 22 mm·mrad 的激光输出<sup>[3]</sup>。其他如美国 TeraDiode 公司<sup>[4,5]</sup>、德国 Trumf 公司<sup>[6,7]</sup>和德国 Dilas 公司<sup>[8,9]</sup>等研究机构也取得了较好的成果。国内关于该技术的研究相对落后,主要通过迭阵合束实现。北京工业大学采用 8 个迭阵合束,实现 1050 W 功率、光参量积 12 mm·mrad 的激光输出<sup>[10]</sup>。西安矩光开发的激光系统在 150 mm 工作距处实现尺寸 3 mm×7 mm、功率 3000 W 的激光输出。电子十三所研制的激光迭阵实现了 1600 W 功率输出,快轴发散角准直到 6 mrad<sup>[11]</sup>。本课题组先前采用 20 层激光迭阵实现了 1000 W 功率,光参量积为 79.3 mm·mrad×81.2 mm·mrad 的激光输出<sup>[12]</sup>。

迭阵合束采用若干微通道热沉封装的激光单元,在快轴方向直接堆叠而成。尽管该合束方式具有易实现高功率输出和结构紧凑等优点,但受冷却方式和热沉厚度等条件限制,它存在如冷却成本高、热沉易腐蚀、激光单元与光学元件装调困难和叠加后光斑存在暗区等固有缺点<sup>[13]</sup>。

本文采用线阵合束方式,利用其特殊结构,有效解决迭阵合束散热和装调等问题,同时引入了斜 45°柱透镜阵列整形方法,结合偏振合束和波长合束技术,在大通道工业水冷条件下,实现室温连续输出光功率 1030 W,快慢轴方向的光参量积分别为 18.3 mm·mrad 和 17.7 mm·mrad,电-光转换效率达 44% 的总体输出水平,成功研制出高效节能、千瓦级高功率和高光束质量的半导体激光光源。

## 2 实验原理及设计

线阵合束是将激光单元在物理位置上分离,通过后续的光学元件实现光叠加而成,图 1 为采用台阶方式实现线阵合束。这种特殊的物理结构使得激光单元间装调互不影响,不存在公差积累问题;允许

各个单元光路独自准直,光学元件易装调且精度高;热源被分散,采用大通道工业水冷即可实现有效散热;单元光束通过棱镜或反射镜可实现合束方向上无暗区叠加。因此,无论装调还是热管理或者合束效果,线阵合束都具有明显优势。

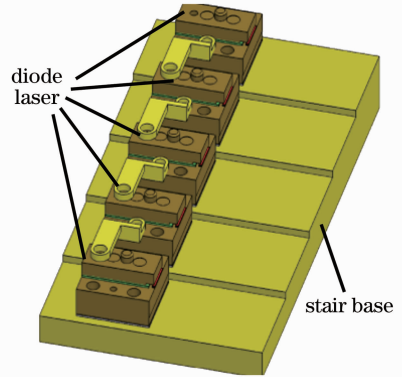


图 1 台阶方式实现线阵合束

Fig. 1 Structure of linear array coupling in step-stair manner

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  $\omega_0$  与远场发散半角  $\theta_0/2$  的乘积。光参量积值越小,光束质量越好。为了便于说明,坐标定义如下:平行于激光条外延层为  $X$ ,垂直于外延层为  $Y$ ,激光出射方向为  $Z$ 。

实验采用的激光条参数: $X$  方向尺寸为 10 mm,填充因子为 20%,发光点 19 个,每个发光点的尺寸( $X \times Y$ )为  $100 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ ,相应发散角(包含 95% 总功率)为  $8^\circ \times 63^\circ$ ,此时  $X$  为慢轴方向, $Y$  为快轴方向。则快轴光参量积  $Q_f = 0.275 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,接近衍射极限,慢轴光参量积  $Q_s = 349 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,为快轴方向的 1269 倍,不利于半导体激光器的直接应用。

区别于常规阶梯镜<sup>[14]</sup>或平行平板堆<sup>[15]</sup>等整形方法,该光源结合线阵合束激光单元光路独自调节、可调空间大的优点,每个激光条在经过快轴准直后,直接采用斜 45°柱透镜阵列进行光束整形,如图 2 所示。图 2(a) 未经过斜 45°柱透镜阵列整形,远场是一条水平直线。图 2(b) 经过斜 45°柱透镜阵列整形,它将激光条上每个发光点输出的光束直接翻转 90°,使得激光束  $Y$  方向变为一个发光点的慢轴方向,而  $X$  方向转变为若干个发光点快轴方向的叠加,在远场为 19 条竖线,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的均衡。完成光束整形后,用于慢轴准直的柱透镜阵列被单一柱透镜所取代,准直后的慢轴发散角可降至几毫弧度,

降低光程差对系统的影响,非常适用于线阵合束。

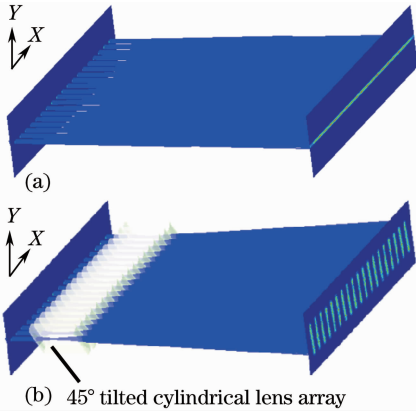


图 2 未经过(a)与经过(b)斜 45°柱透镜阵列对快慢轴光束翻转

Fig. 2 Beam propagation (a) without and (b) with a 45° tilted cylindrical lens array

Zemax 模拟单元光路图和输出光斑如图 3 所示。激光束先经过焦距为 0.286 mm 的快轴准直镜准直,考虑实际装调,准直后发散角能保证到 7 mrad,再经斜 45°柱透镜阵列翻转,X 方向呈 19 个发光点快轴方向叠加,线宽变为 9.4 mm,其 $Q_r = 16.45 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,而 Y 方向变为单个发光点的慢轴方向, $Q_s = 3.49 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,则慢轴光参量积值约为快轴方向的 1/5。然后 Y 方向采用焦距为 14.3 mm 的柱透镜准直,其输出发散角为 7 mrad,线宽为 2 mm。这样快慢轴方向的发散角直接实现均衡,此时 X 为快轴方向,Y 为慢轴方向。

而后在 Y 方向,以空间周期 2 mm 线阵合束 5 个激光束,实现两轴光斑均衡,从而也实现了两轴光束质量的均衡。在线阵合束的基础上引入偏振合束和波长合束,以实现高功率高光束质量激光输出。

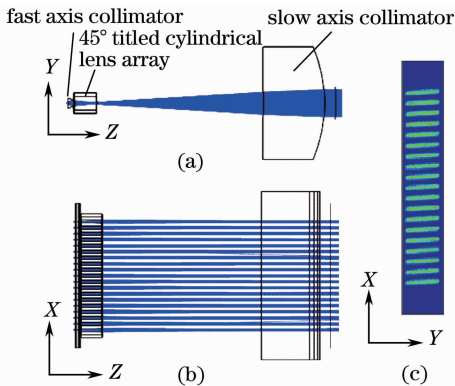


图 3 单元光路。(a)快轴方向;(b)慢轴方向;(c)输出光斑

Fig. 3 Optical trace of a single bar. (a) Fast axis; (b) slow axis; (c) output spot

### 3 实验装置

此光源共包括 20 个传导冷却热沉封装的激光条,其中波长 808 nm 和 870 nm 各 10 个,当驱动电流为 70 A 时,两种激光条连续输出功率均达到 70 W。斜 45°柱透镜阵列选用德国 Limo 公司微光学元件 BTS-150/500,它与焦距为 0.286 mm 的快轴准直镜直接集成在一起。激光束经过该元件后,快轴方向被准直,各个发光点的快慢轴方向翻转。然后采用焦距为 14.3 mm 的柱透镜进行慢轴准直。

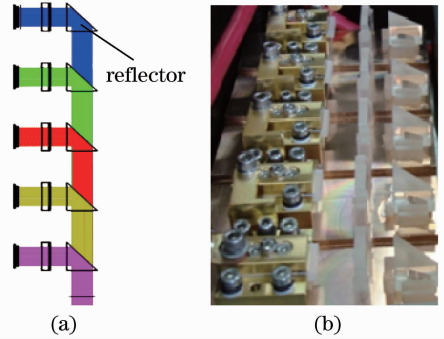


图 4 线阵单元模拟光路图(a)和实物图(b)

Fig. 4 (a) Optical path simulation and (b) experimental setup of a coupling module

将输出相同波长的 5 个单元激光束进行如图 4 所示的线阵合束,每个单元经过与之对应的小反射镜 90°偏折光路后光叠加,实现单波长线偏振激光输出。再将 4 个线阵合束单元采用如图 5 所示的先波长后偏振方式合束,实现高功率高光束质量激光束输出。

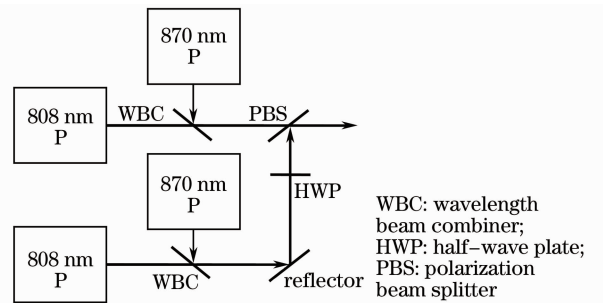


图 5 半导体激光源的合束方式

Fig. 5 Multiplexing sketch of the diode laser coupling source

经过装调,半导体激光线阵合束光源的实物如图 6 所示,整个光源尺寸为 320 mm × 190 mm × 160 mm,其中白色部分为大通道水冷板。

### 4 实验结果及分析

图 7 为单元光束翻转后距出光面 15 mm 处的

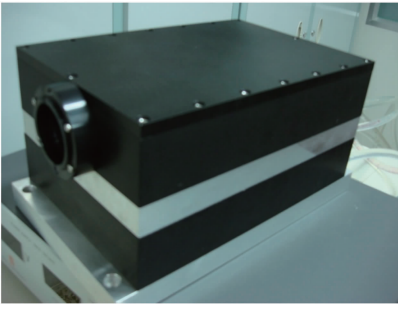


图 6 半导体激光线阵合束光源外形图片

Fig. 6 Photograph of the diode laser coupling source

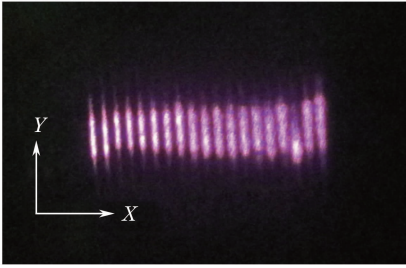


图 7 快慢轴翻转后光斑

Fig. 7 Output spot after beam transformation

光斑, X 方向为 19 条清晰竖线, Y 方向为单一发光点, 与理论模拟结果图 3(c) 一致。但受 smile 效应、发光点激射差别和微透镜缺陷的影响, 观察屏上 19 条竖线略有差异。

在冷却液温度 20 °C, 流量 13 L/min 条件下, 采用 Ophir 公司 5000 W 功率计测得合束光源的输出功率如图 8 所示, 当驱动电流为 70 A 时, 测得连续输出功率为 1030 W, 光-光转换效率为 73.6%, 电-光转换效率为 42%, 斜率效率为 16.3 W/A。驱动电流为 45 A 时, 获得最大电-光转换效率 44%。

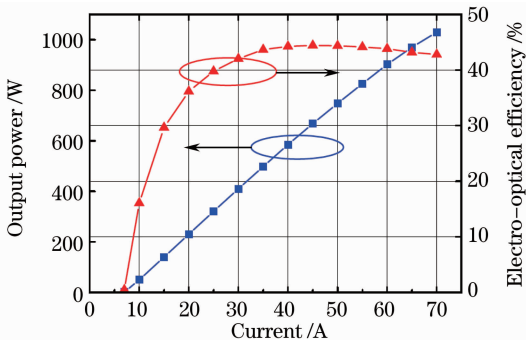


图 8 半导体激光合束光源的功率效率曲线

Fig. 8 Power and efficiency versus current of the diode laser coupling source

采用 Spiricon 公司光束质量分析仪, 以包含 95% 总功率的全宽标定光斑尺寸, 在出光口处测得一个 XY 方向尺寸为 10.5 mm × 10.2 mm 的光斑, 距出光口 10 m 处测得如图 9 所示的远场光斑, XY

方向尺寸为 80.3 mm × 79.8 mm, 由此计算出 XY 方向的发散角为 6.98 mrad × 6.96 mrad, 光参量积值分别为 18.3 mm · mrad 和 17.7 mm · mrad。上述数据说明, 快慢轴方向的光斑尺寸、发散角和光束质量均得到均衡, 这对于下一步耦合入光纤非常有利。受各个激光器光程差的影响, 最终激光束的光束质量比理论模拟值稍大。

从远场分布来看, X 方向为高斯分布, Y 方向为平顶分布, 由于它反映了光束发散角分布, 对照半导体激光器的角分布特性, 可确定 X 为快轴方向, Y 为慢轴方向, 从而也验证了斜 45° 柱透镜阵列对快慢轴方向的有效翻转。

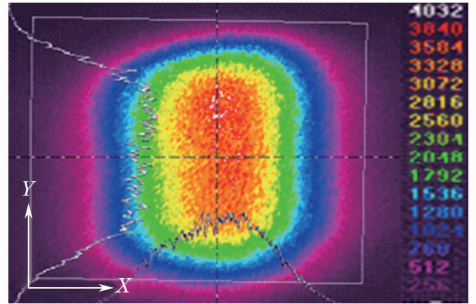


图 9 距出光面 10m 处的光场分布

Fig. 9 Output intensity distribution of 10 m apart from the output end of the source

该合束光源功率损失主要包括以下几方面: 1) 线阵合束, 由于激光器 smile 效应、台阶机械公差和光学元件装调精度等条件的影响, 造成合束处出现漏光或挡光, 本光源此处效率约为 90%; 2) 偏振合束, 此光源中偏振合束棱镜由两个 45° 直角三棱柱胶合而成, 高功率工作时, 胶合面发热影响偏振膜效率, 同时受偏振膜本身效率、激光器的偏振度和反射镜改变激光偏振态等影响, 造成本光源该处效率也仅 90% 左右; 3) 由于镀膜原因, 波长合束效率为 93%; 4) 光学表面, 包括快慢轴准直镜和斜 45° 柱透镜阵列对激光的反射和散射, 其整体效率为 98%。

接下来的工作中将有针对性地优化光源结构, 如增加光束叠加方向的自由度、冷却偏振合束棱镜和采用平板反射镜反射等方法, 以提高输出功率和效率。

## 5 结 论

采用线阵合束技术, 引入斜 45° 柱透镜阵列整形方法, 结合偏振合束和波长合束技术, 成功研制出连续输出功率为 1030 W, 快慢轴方向光参量积值分别为 18.3 mm · mrad 和 17.7 mm · mrad, 电-光转换

效率达 44% 的高效节能、高功率和高光束质量的半导体激光光源。下一步工作主要是将此合束光源通过聚焦耦合进 400  $\mu\text{m}$  芯径的光纤中, 实现柔性输出。以此为核心光源的激光系统将为工业和国防等领域提供先进的直接光源。

### 参 考 文 献

- 1 R. Diehl. High-Power Diode Lasers: Fundamentals, Technology, Applications[M]. Freiburg: Springer, 2000
- 2 F. Bachmann, P. Loosen, R. Poprawe. High Power Diode Lasers Technology and Applications[M]. New York: Springer, 2007. 38~39, 215~217
- 3 A. Timmermann, D. Bartoschewski. Intensity increasing up to 4 MW/cm<sup>2</sup> with BALB's via wavelengths coupling [C]. *SPIE*, 2009, **7198**: 71980X
- 4 R. K. Huang, B. Chann, J. D. Glenn. Ultra-high brightness, wavelength-stabilized, kW-class fiber coupled diode laser [C]. *SPIE*, 2011, **7918**: 791810
- 5 R. K. Huang, B. Chann, J. D. Glenn. Extremely high brightness, kW-class fiber coupled diode lasers with wavelength stabilization [C]. *SPIE*, 2011, **8039**: 80390N
- 6 David Havrilla, Marco Holzer, Rüdiger Brockmann *et al.*. Dramatic advances in direct diode lasers [C]. *SPIE*, 2010, **7583**: 75830B
- 7 Stephan Strohmaier, Christoph Tillkorn, Peter Olschowsky *et al.*. High-power, high-brightness direct-diode laser [J]. *Optics & Photonics News*, 2010, **21**(10): 24~29
- 8 Tobias Koenning, Kim Alegria, Zoulan Wang *et al.*. Macro-channel cooled, high power, fiber coupled diode lasers exceeding 1.2 kW of output power [C]. *SPIE*, 2011, **7918**: 79180E
- 9 Paul Wolf, Bernd Köhler, Karsten Rotter *et al.*. High-power, high-brightness and low-weight fiber coupled diode laser device [C]. *SPIE*, 2011, **7918**: 79180O
- 10 Cao Yinhu, Liu Youqiang, Qin Wenbin *et al.*. Research on kW-output high beam quality direct semiconductor laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2282~2285  
曹银花, 刘友强, 秦文斌等. 光束质量超过全固态激光器的千瓦直接半导体激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2282~2285
- 11 Xun 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
- 12 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
- 13 G. Treusch, R. Srinivasan, D. Brown *et al.*. Reliability of water cooled high power diode laser modules [C]. *SPIE*, 2005, **5711**: 132~141
- 14 K. Du, P. Loosen. Arrangement for Guiding and Shaping Beams from a Rectilinear Laser Diode Array [P]. US. Patent, 5887096, 1999
- 15 V. Krause, C. Ullmann. Laser Optical and Diode Laser [P]. Patent, 5986794, 1999

栏目编辑: 宋梅梅