

文章编号: 0258-7025(2009)09-2282-04

# 光束质量超过全固态激光器的千瓦直接半导体激光器

曹银花 刘友强 秦文斌 许春晓 王智勇

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

**摘要** 介绍了采用多波长耦合和偏振耦合的方式实现千瓦级高功率半导体激光输出的方法。通过光束整形的方法, 实现了快慢轴光束参数积对称化, 激光器输出激光光束质量小于  $12 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ , 超过了全固态激光器的光束质量; 激光器光-光转换效率达到 87.5%。并通过智能化控制, 实现了不同波长、不同功率、不同脉冲宽度的激光输出。

**关键词** 激光器; 大功率半导体激光器; 光束质量; 波长耦合; 偏振耦合; 光束整形

**中图分类号** TN248.1      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/CJL20093609.2282

## Kilowatt Diode Laser with Beam Quality Better than All-Solid-State Laser

Cao Yinhua Liu Youqiang Qin Wenbin Xu Chunxiao Wang Zhiyong

(College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract** Kilowatt high power diode laser is reported with the ways of multi-wavelength and polarization coupling. The fast and slow axis beam parameter product is symmetrized by the method of shaping with the beam quality better than  $12 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  and all-solid-state laser. 87.5% optical-optical efficiency of the high power diode laser is obtained. Through intelligent control, the diode laser can be outputted with different wave lengths, powers and pulse widths.

**Key words** lasers; high power diode laser; beam quality; wavelength coupling; polarization coupling; laser beam shaping

## 1 引 言

大功率半导体激光器以其体积小、重量轻、效率高、寿命长、可靠性高、波长短、金属吸收率高、适合光纤传输以及性能价格比高等优点, 在激光材料加工和军事领域等有着广泛的应用前景。但是大功率半导体激光器存在着一个致命弱点, 同传统的大功率气体和固体激光器相比, 其光束质量较差。因此, 提高大功率半导体激光器的光束质量一直受到众多学者的关注<sup>[1,2]</sup>。

随着半导体激光芯片技术和集成技术的发展, 大功率半导体激光器的功率越来越高, 光束质量也逐年改善。目前应用于激光制造的大功率半导体激光器的功率可达到 6000 W 甚至更高, 光束可耦合

进入芯径为 0.6 mm 的光纤, 1000 W 光束可耦合进入芯径为 0.2 mm 的光纤<sup>[3]</sup>。这就使得大功率半导体激光器作为直接能源应用于激光材料加工中功率密度要求较高的领域, 如激光焊接等。

半导体激光器通常由多个半导体激光发光单元通过一维阵列(bar)或多维阵列(stack)叠加而成。每个 bar 条由十几或几十个发光单元组成, bar 条的长度一般为 10 mm。由于每个 bar 条为了散热都有一定的厚度, 常见厚度是 1.8 mm, 而发光区域在快轴方向仅有  $1 \mu\text{m}$ , 这样快轴方向光束的填充因子就很低, 因此, 在快轴方向光束已准直的情况下, 半导体激光阵列远场呈现出的是一组间距较大的平行光斑, 不利于光束聚焦。

**收稿日期**: 2009-04-13; **收到修改稿日期**: 2009-05-22

**基金项目**: 北京市自然科学基金(4082005), 北京市教委科研计划面上项目(KM200810005023)和北京工业大学博士启动基金(52101012200704)资助课题。

**作者简介**: 曹银花(1964—), 女, 副研究员, 主要从事大功率半导体激光技术方面的研究。E-mail: caoyh@bjut.edu.cn

另外,为了获得高功率,通常将 bar 条沿快轴方向进行叠加,但简单地叠加 bar 条致使激光发光阵列的尺寸增大。大口径光学系统在进行光束整形和聚焦时必定带来较大的像差,影响聚焦光斑的大小。因此,对于大功率半导体激光器,提高功率和改善光束质量是密不可分的。提高大功率半导体激光光束质量的重要途径之一就是対光束进行整形,典型的方法主要有直接整形法、折射整形法、折反射整形法、反射整形法及折/衍射整形法<sup>[3~7]</sup>。

本文介绍了采用多波长耦合和偏振耦合的方式实现千瓦级高功率直接半导体激光输出的方法,通过光束整形实现快慢轴光束对称,即光参数积近似相等。通过智能化控制,实现了不同波长、不同功率、不同脉冲宽度输出,以及复合波长连续输出。

## 2 激光器组成原理

激光器系统主要由激光器机头、激光电源、水冷系统、控制系统等组成。为了获得高光束质量高功率的激光输出,激光器光学系统采用了快轴微透镜准直、光束对称化整形、波长耦合和偏振耦合等技术。激光器机头的组成结构如图 1 所示。

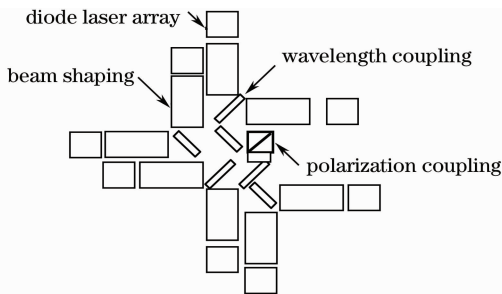


图 1 激光器机头组成结构示意图

Fig. 1 Schematic of high power diode laser

激光器光源采用波长 808 nm (60 W/bar), 915 nm (80 W/bar), 940 nm (80 W/bar), 980 nm (80 W/bar) 半导体激光阵列各 4 bar。每个 bar 由 19 个发光单元组成,填充因子 20%,发光面沿慢轴方向宽度 100  $\mu\text{m}$ ,周期 500  $\mu\text{m}$ 。激光光源输出功率为 1200 W。我们在已研制出的 1000 W 高光束质量直接半导体激光器中,如图 2 所示,用不同的电源分别对不同波长的光源供电,通过智能化控制,可实现不同波长、不同功率、不同脉冲宽度输出,以及复合波长连续输出。

### 2.1 光束对称化

由于半导体激光阵列的输出光束在快慢轴上的光束参数乘积极其不对称<sup>[8]</sup>,这使得半导体激光阵列的输出光束很难被聚焦成小而圆的光斑从而将其耦

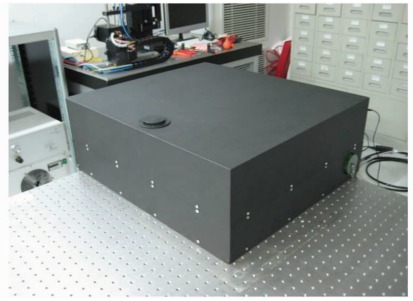


图 2 1000 W 高光束质量直接半导体激光器

Fig. 2 1000 W high beam quality diode laser

合进光纤系统。其中光束参数乘积(BPP)定义为激光光束束腰半径和发散角的乘积<sup>[9]</sup>,是衡量光束质量好坏的重要指标,它反映了光束的聚焦能力<sup>[10]</sup>。对于半导体激光一维阵列,其慢轴上的 BPP 值是快轴 BPP 值的 100~1000 倍。为了提高半导体激光器的功率,往往将多个半导体一维阵列(bar)叠加,形成一个二维阵列,即半导体激光堆栈。但是堆栈的慢、快轴上的光束参数乘积仍然相差约几十倍。

若想使半导体激光阵列的光束在快慢轴上的光束参数乘积均匀化,必须采取光束整形。将半导体激光阵列的输出光束进行分割、重排,通过减小慢轴方向、增大快轴方向的光束参数乘积的方法,达到快慢轴光束参数乘积均匀化的目的<sup>[11]</sup>。

光束整形原理如图 3 所示。半导体激光阵列光束的尺寸为慢轴方向  $D$ ,快轴方向  $W$ ,将光束沿慢轴方向分割  $N$  段,重排后光束的尺寸为慢轴方向  $D/N$ ,快轴方向  $W \cdot N$ ,使光束的光参数积 BPP 近似相等。

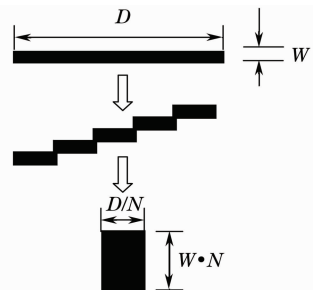


图 3 光束整形原理示意图

Fig. 3 Principle of beam shaping

光束的分割数  $N$  可表示为

$$N \cdot \text{BPP}_{\text{fast}} = \text{BPP}_{\text{slow}} / N, \quad (1)$$

$$N = \sqrt{\text{BPP}_{\text{slow}} / \text{BPP}_{\text{fast}}}.$$

本系统采用的半导体激光阵列经准直后(bar 条带准直系统),  $\text{BPP}_{\text{fast}} = 0.7 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,  $\text{BPP}_{\text{slow}} = 99 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,经计算,分割数目为 12,经整形变换后,所设计的快轴光束质量为:  $\text{BPP}_{\text{fast}} = 8.4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ;慢

轴光束质量为:  $BPP_{slow} = 8.3 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 。

在已研制出的 1000 W 高光束质量半导体激光器中,采用了光束整形技术,用光束整形棱镜堆实现半导体激光阵列光束光参数积均匀化的光束整形装置如图 4 所示。

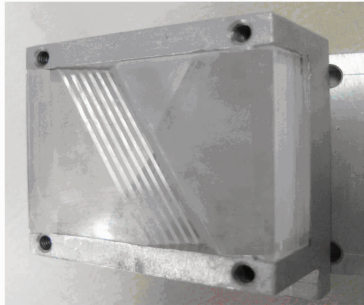


图 4 光束整形装置

Fig. 4 Beam shaping device

通过实验可以看出棱镜堆能实现光斑的分段排列,光束质量大幅改善。光束整形结果模拟图和实验光斑图分别如图 5 和图 6 所示。

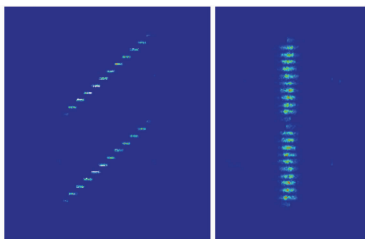


图 5 光束整形模拟图

Fig. 5 Results of beam shaping simulation

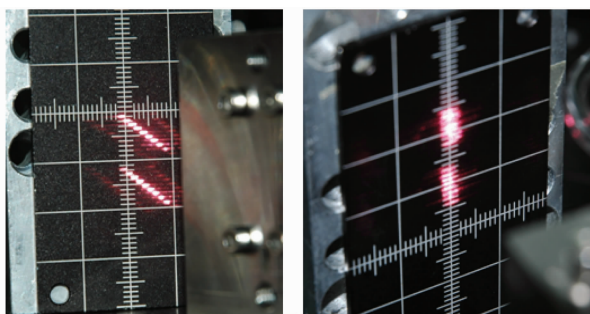


图 6 光束整形结果实验光斑图

Fig. 6 Results of beam shaping experiment

从图 6 可以看出,光斑经分段整形棱镜组后被分成多段,并整齐地填充排列到两个光斑中间的空白区域,提高了填充因子,再经重排棱镜组将光斑对齐。光源出光口的光斑尺寸为  $22 \text{ mm}\times 11 \text{ mm}$ ,经整形传输 100 mm 后光斑尺寸为  $22 \text{ mm}\times 2 \text{ mm}$ 。

### 2.2 波长耦合和偏振耦合

为了提高半导体激光器的功率,在不增加快轴方向光斑尺寸的情况下,采用了多波长耦合技术。

本系统由 808 nm, 915 nm, 940 nm, 980 nm 4 个波长组成。经过波长耦合单元,可使功率密度提高 3 倍。波长耦合原理如图 7 所示。

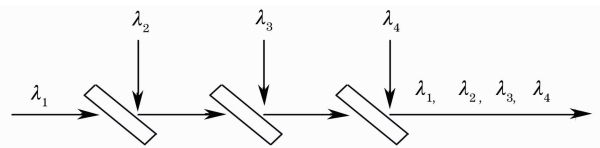


图 7 波长耦合原理示意图

Fig. 7 Schematic of wavelength coupling

由于半导体激光是线偏振光,可以用  $\lambda/2$  波片将其偏振方向旋转  $90^\circ$ ,因此通过偏振耦合可使 2 路激光合束,功率密度再增加 1 倍<sup>[12]</sup>。偏振耦合原理如图 8 所示。

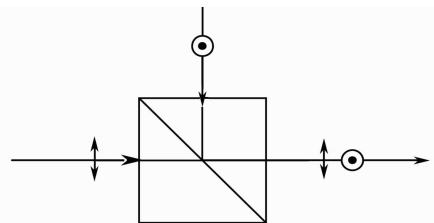


图 8 偏振耦合原理示意图

Fig. 8 Schematic of polarization coupling

经过上述波长耦合及偏振耦合,将 4 个波长,8 组半导体激光阵列合束为一束激光输出,其激光光源输出总功率为 1200 W,用 COHERENT 的  $3 \Sigma$  功率计测量激光器输出功率为 1050 W,激光器的光-光转换效率为 87.5%,电光转换效率为 45%。

### 3 光束质量分析

激光器光束质量测量采用在不同距离上测量光斑大小,计算其发散角,最后得出光参数积的方法。图 9 是光束传输到不同距离时用相纸得到的光斑情况(单位:mm)。

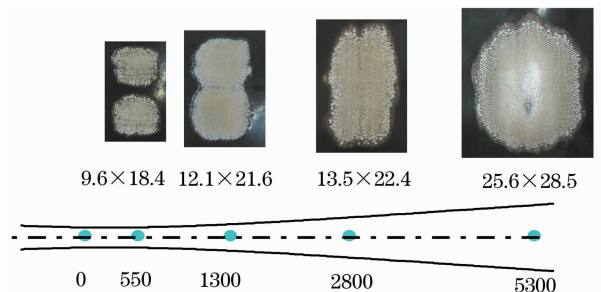


图 9 光束传输过程中光斑的变化情况

Fig. 9 Photos of the facula on different beam transmission distance

经计算可得到激光光束快轴光束质量为  $8.8 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ ,激光光束慢轴光束质量为  $7.3 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ ,

总光束质量为  $BPP_{1000\text{ W}} = \sqrt{2 \cdot BPP_{\text{fast}} \cdot BPP_{\text{slow}}} \approx 11.3 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。

## 4 结 论

研制的 1000 W 高光束质量直接半导体激光器,采用多波长耦合和偏振耦合的方式实现千瓦级激光输出,激光器光-光转换效率达到 87.5%,电光转换效率为 45%。通过光束整形的方法,实现了快慢轴的光束质量均小于 9 mm·mrad 的半导体激光输出,并可耦合进入芯径为 0.2 mm,数值孔径为 0.22 的光纤中。

## 参 考 文 献

- Dong Hongzhou, Shi Shunxiang, Li Jiali *et al.*. Study on collimation properties of semiconductor laser off-axis beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 851~853  
董洪舟,石顺祥,李家立等. 半导体激光器远轴光束的准直特性研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(6): 851~853
- Gao Mingwei, Gao Chunqing, He Xiaoyan *et al.*. Study of twisted beam symmetrization from laser diode bar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5): 604~608  
高明伟,高春清,何晓燕等. 半导体激光器线阵光束扭转对称化的实验研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(5): 604~608
- Fiber-coupled diode lasers, www. laserline-inc. com, 2008
- Th. Graf, J. E. Balmer. High-power Nd:YLF laser end pumped by a diode-laser bar [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1317~1319
- S. Yamaguchi, T. Kobayashi, Y. Saito. Collimation of emissions from a high-power multistripe laser-diode bar with multiprism array coupling and focusing to a small spot[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 898~900
- P. Y. Wang Beam-shaping optics deliver high-power beams[J]. *Laser Focus World*, 2001, **37**(12): 115~118
- B. Ehlers, K. Du, M. Baumann *et al.*. Beam shaping and fiber coupling of high-power diode laser arrays [C]. *SPIE*, 1997, **3097**: 639~644
- F. Bachmann. Industrial application of high power diode lasers in materials processing[J]. *Appl. Sur. Science*, 2003, **208-209**: 125~136
- G. Friedrich Bachmann. Chances and limitations of high power diode lasers[J]. *SPIE*, 2004, **5336**: 95~101
- J. R. Leger, W. C. Goltsov, Geometrical transformation of linear diode laser arrays for longitudinal pumping of solid-state lasers [J], *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**: 1088~1100
- H-G. Treusch, Keming Du, M. Baumann *et al.*. Fiber coupling technique for high power diode laser arrays[J]. *SPIE*, 1998, **3267**: 98~106
- 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

## 《中国激光》“激光制造”专题征稿启事

激光制造技术是国家重点支持和推动的一项高新技术,近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》计划于 2009 年 12 月正刊(EI 核心收录)上推出“激光制造”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“激光加工”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

### 征稿范围包括:

- 激光强化与材料制备
- 激光直接制造与微纳加工
- 激光器与激光加工系统
- 激光冲击与强化
- 激光焊接与切割
- 激光烧结与沉积
- 激光新应用与过程模拟
- 其他

### 特邀组稿专家:

钟敏霖 教授 清华大学机械工程系 E-mail: zhml@tsinghua.edu.cn 010-62772993

截稿日期: 2009 年 9 月 30 日

### 投稿方式以及格式:

可直接将稿件电子版发至“激光制造”专题组稿专家、《中国激光》常务编委、清华大学钟敏霖教授邮箱: zhml@tsinghua.edu.cn(主题标明“激光制造专题”投稿),或通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“激光制造专题”投稿),详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用 MS-word 格式,有任何问题请咨询马沂编辑, E-mail: CJL@siom.ac.cn; 电话: 021-69918427。