

# 半导体激光阵列高效率高质量光束质量光谱组束

朱占达 缙 龙 姜梦华 惠勇凌 雷 甬 李 强

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 通过加入光束整形元件(BTS)对传统光谱光束组合结构进行了改善。利用光束整形元件实现半导体激光阵列发光单元光束的旋转,使每个发光单元的慢轴光场分布变为垂直方向,快轴光场分布变为水平方向,对整形后水平方向发光单元进行外腔光谱光束组合,减小了 smile 效应的影响,提高了阵列输出的整体光束质量和整体的转换效率。采用标准的半导体激光阵列,连续输出激光功率为 70.01 W,电光转换效率最高为 52.8%,光光效率为 92.2%,光谱线宽为 7.7 nm,输出光束水平方向光束质量因子  $M^2 = 1.28(0.4 \text{ mm} \cdot \text{mrad})$ , 垂直方向光束质量因子  $M^2 = 11.2(3.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad})$ , 快慢轴两个方向都接近单个发光单元光束质量。

**关键词** 激光光学;光谱组束;光束整形;组合效率;光束质量;外腔

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.s114008

## High Efficiency and High Beam Quality Diode Laser Array by Spectral Beam Combination

Zhu Zhanda Gou Long Jiang Menghua Hui Yongling Lei Hong Li Qiang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** Improvement is made in the traditional spectral beam combining structure by adding beam shaping element, namely BTS. BTS is used to rotate the beam from the emitter in semiconductor laser array. The slow axis light distribution of each emitter becomes vertical distribution. The fast axis light distribution becomes horizontal distribution. Spectral beam combination is conducted by external cavity after beam shaping in horizontal direction. The effect of smile is reduced. As a result, the overall output beam quality and conversion efficiency is improved very much. A standard semiconductor laser array is used in this experiment. Output power of 70.01 W, electro-optic conversion efficiency of 52.8% and spectral beam combining efficiency of 92.2% are achieved. The spectral line-width is 7.7 nm.  $M^2$  of 1.28 (0.4 mm·mrad) in horizontal and 11.2 (3.5 mm·mrad) in vertical are obtained. The beam quality of the output is close to that of a single emitter of the array in both directions.

**Key words** laser optics; spectral beam combination; beam shaping; efficiency of beam combining; beam quality; external cavity

**OCIS codes** 140.2020; 140.3298; 140.3300; 140.3320; 140.3290

## 1 引 言

大功率半导体激光阵列以其体积小、效率高和寿命长等优点获得了广泛的应用。但是由于半导体激光阵列本身结构的原因,整体的光束质量不高,空间亮度不高,改善半导体激光阵列的光束质量,提高空间亮度在应用中显得很重要<sup>[1-2]</sup>。目前改善大功

率半导体激光器阵列光束质量的方法主要有相干合束<sup>[3-4]</sup>和非相干合束<sup>[5]</sup>两大类。相干合束需要精确控制激光器阵列中每个发光单元的波长和相位,实现难度较大,研究进展缓慢。非相干合束中光谱组束<sup>[6]</sup>被证明是提高整体光束质量的有效方法,可以实现与单个发光单元光束质量相近的光束输出。Daneu 等<sup>[7]</sup>实现了光束质量因子在组束方向(即慢

收稿日期: 2014-01-20; 收到修改稿日期: 2014-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(61378023)

作者简介: 朱占达(1985—),男,博士研究生,主要从事大功率半导体光纤耦合方面的研究。E-mail: zhuzhanda@126.com

导师简介: 李 强(1965—),男,博士,教授,主要从事大功率固体激光器方面的研究。E-mail: ncltlq@bjut.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

轴方向) $M^2 = 20$ , 光光效率 50% 的输出; Gopinath 等<sup>[8]</sup>实现了功率 20 W, 光束质量因子  $M^2 = 19$  的输出, Chann 等<sup>[9]</sup>利用特殊结构的单模半导体激光器阵列实现了功率 35 W, 两个方向的光束质量因子都为  $M^2 = 1.35$  的光束组合; Zhang 等<sup>[10]</sup>实现了连续功率 50.8 W, 光光效率 90.2%, 慢轴光束质量因子  $M^2 = 10.9$  的光束组束。这些组束的方向都是在慢轴方向(即水平横向排列方向)对发光单元进行光谱组束, 由于半导体激光阵列存在不可消除的 smile 效应, 会使组束后的光束在快轴方向的光束不完全重叠, 光束质量在快轴方向<sup>[11]</sup>都产生了退化; 由于慢轴准直镜(SAC)的选取受空间的限制, 剩余发散角较大<sup>[12]</sup>, 影响反馈量, 一方面会引起组束时出现边缘效应, 组合光谱图中可以看出边缘发光单元的强度明显降低<sup>[3-4, 7-8]</sup>, 限制了参与光谱组束的发光单元的数量; 另一方面需要较高的耦合输出镜反射率, 最低反射率在 10% 左右<sup>[3-4, 7]</sup>, 降低了组束的整体转换效率。

为了避免上述问题, 本课题组对光谱组束结构做了改进。通过采用光束整形元件(BTS)旋转半导体激光阵列发光单元的光束, 使每个发光单元的慢轴光场分布变为竖直方向, 每个发光单元的快轴光场分布变为水平方向, 这样, 可将由于 smile 效应产生竖直方向的空间偏差, 转换成水平方向的空间位移, 组束在水平方向进行, 而水平方向的空间位移, 只是影响每个发光单元所锁定的微小波长变化, 不影响组合光束的重叠位置, 组束后光束在水平方向

可以达到发光单元快轴光束质量。同时, 由于各发光单元慢轴光束统一分布在竖直方向, 可以用一柱透镜统一对各个发光单元在慢轴方向上进行准直, 准直镜的选取不再受到空间限制, 慢轴方向可以得到很好的准直, 不仅组束光束竖直方向保持单个发光单元的慢轴光束质量, 而且可改善边缘发光单元强度降低的效应, 可以让更多的发光单元参与组束, 从而提高整体输出功率, 同时较低反射率的输出镜仍能实现有效反馈, 从而提高整体光束组束的效率。

本文采用中心波长为 980 nm, 包含有 19 个发光单元的标准半导体激光阵列, 采用 BTS 对每个发光单元的光束进行了光束整形, 透射光栅组束, 输出镜的反射率为 4%, 组束后, 连续输出激光功率 70.01 W, 电光转换效率 52.8%, 光光效率为 92.2%, 光谱线宽为 7.7 nm, 输出光束水平方向光束质量因子  $M^2 = 1.28(0.4 \text{ mm} \cdot \text{mrad})$ , 竖直方向光束质量因子  $M^2 = 11.2(3.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad})$ 。

## 2 实验结构

图 1(a), (b) 为光谱组束的实验结构, 与传统的光谱组束结构相似, 主要包括前端面镀增透膜( $R < 1\%$ )的半导体激光器阵列, 快轴准直镜(FAC), 传输变换透镜, 光栅及具有一定反射率的平面输出镜组成。除此之外, 本文的结构中还加入了光束整形系统(即 BTS), 将发光单元的光束旋转  $90^\circ$ 。

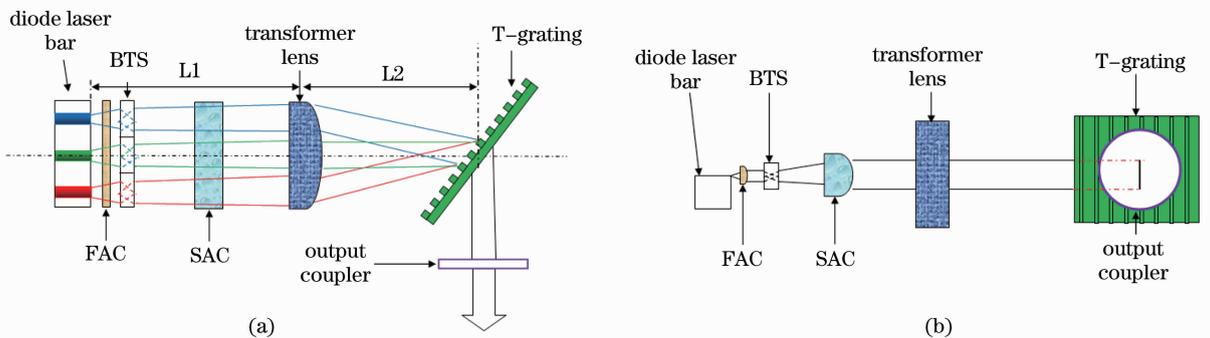


图 1 光谱组束实验的结构图。(a)俯视图; (b)侧视图

Fig. 1 Spectral beam combing experimental setup. (a) Top view; (b) side view

所用的 980 nm 标准半导体激光阵列, 条宽为 1 cm, 有 19 个发光单元, 填充因子为 20%, 每一发光单元水平方向(慢轴方向)宽度为  $100 \mu\text{m}$ , 空间周期为  $500 \mu\text{m}$ , 竖直方向(快轴方向)宽度为  $1 \mu\text{m}$ , 快慢轴发散角为  $70^\circ \times 7^\circ$  (95% 能量)。

阵列出射的光束先经焦距为  $f_t = 500 \mu\text{m}$  的非球面柱透镜对竖直方向光束进行准直, 准直后的光高约为  $300 \mu\text{m}$ , 发散角为 8 mrad。然后经 BTS(双倾斜  $45^\circ$  微柱透镜阵列, 其结构与旋转光束过程见图 2)旋转各个发光单元的光束。BTS 由多个具有

一定折射率的光学玻璃元件组成。每个玻璃元件的入射和出射表面为圆柱型,其余的4个表面为平行平面,形状近似为两个平凸柱面镜的两个平面相对,中间加入相同的玻璃材料胶合而成的一个双突柱面镜,双突柱面镜的厚度为一个平凸柱面透镜焦距的两倍。这些双突柱面镜与水平方向成 $45^\circ$ 依次排列。柱透镜阵列空间周期为 $500\ \mu\text{m}$ ,与19个发光单元一一对应。一束水平光束入射到元件表面时,中间部分由于通过的是两个柱透镜的光轴中心,因此传播方向不变。由于柱透镜与水平成 $45^\circ$ 放置,因此在通过第一个平凸柱透镜后,光束的左右部分会产生上下的位置偏移,在焦平面处会聚成一条与水平方向成 $45^\circ$ 的斜线,而此处同样为第二个平凸柱透镜的焦平面,因此通过第二个平凸柱透镜后获得准直,此时入射光束的左右部分分别位于光束中心部分的下方和上方,实现了光束 $90^\circ$ 旋转。

每个发光单元的光束经过BTS后,在相对于入射光束的横截面内旋转 $90^\circ$ ,即出射的光束在水平方向由慢轴变为快轴,以发散角 $8\ \text{mrad}$ 的近似平行光出射,在竖直方向由快轴变为慢轴,以发散角 $7^\circ$ 出射,这样19个发光单元发出的光束在水平方向都以近似平行光出射,竖直方向的发散角都为 $7^\circ$ 。再经 $f_s=100\ \text{mm}$ 的柱透镜,统一在竖直方向上(即慢轴方向)对各个发光单元光束准直,这样,光束在两个方向都具有较小的发散角。

然后经过 $f_t=300\ \text{mm}$ 传输变换透镜,在水平方向上,将阵列不同位置的发光单元,以不同角度入射到透射光栅,传输变换透镜与半导体激光器的距离为传输变换透镜的焦距( $L_1=300\ \text{mm}$ )。通过透射光栅的色散作用,将不同角度入射的光束沿同一方向色散到输出镜,输出镜的作用是与每个发光单元的后腔面组成激光谐振腔,输出镜将共同出射的光束部分反馈给每个发光单元,使每个发光单元锁定在不同的波长上,即实现光谱组束。透射光栅与传输透镜间的距离同样为传输变换透镜的焦距( $L_2=300\ \text{mm}$ ),透射光栅刻线数为 $1850\ \text{line/mm}$ ,在波长 $980\ \text{nm}$ 附近 $-1$ 级的衍射效率约为 $95.5\%$ ,输出镜的反射率为 $4\%$ 。

理想情况下,输出光束的光束质量与单个发光单元的光束质量相同,这样就实现了各个发光单元光束的空间叠加,而功率随着发光单元个数的增加而增加,光束质量保持一个发光单元的光束质量,增加了阵列光束的亮度。

光栅方程式表示为

$$m \cdot \lambda = d \cdot (\sin \theta_i + \sin \theta_d), \quad (1)$$

式中 $m$ 为衍射级次,利用透射光栅的 $-1$ 级,则 $m=-1$ , $\lambda$ 为入射激光波长, $d$ 为光栅周期长度, $\theta_i$ 为入射角, $\theta_d$ 为衍射角。由于采用利特罗角结构,即 $\theta_{\text{in}}=\theta_i=\theta_d=65^\circ$ ,整体的线宽可表示为<sup>[8]</sup>

$$\Delta\lambda = W_{\text{bar}} \cdot d \cos \theta_i / f_t, \quad (2)$$

式中 $W_{\text{bar}}$ 为巴条的整体宽度, $d_1$ 为光栅刻线宽度, $f_t$ 为传输透镜的焦距,由半导体激光阵列,传输透镜和光栅的参数可知 $\Delta\lambda=7.58\ \text{nm}$ 。

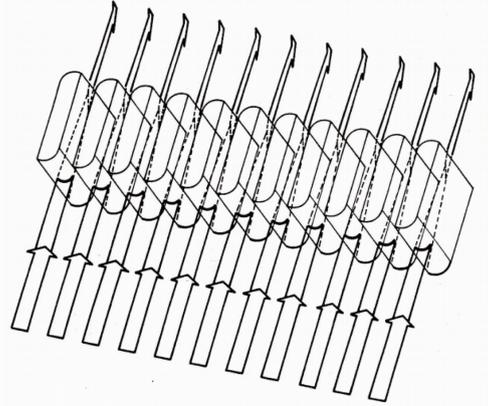


图2 BTS的结构与旋转光束的过程

Fig. 2 Structure of BTS and process of rotating

### 3 实验结果及分析

在冷却水流量为 $18\ \text{L/min}$ ,水温 $18\ ^\circ\text{C}$ 时,测量了半导体激光器阵列在没有外腔反馈和有外腔反馈实现频谱组束时的功率,组束后出光阈值由 $10\ \text{A}$ 变为了 $5\ \text{A}$ 。电流为 $75\ \text{A}$ 时,连续输出功率为 $70.01\ \text{W}$ ,对应的倾斜效率为 $1\ \text{W/A}$ ,在电流 $65\ \text{A}$ 时电光转换

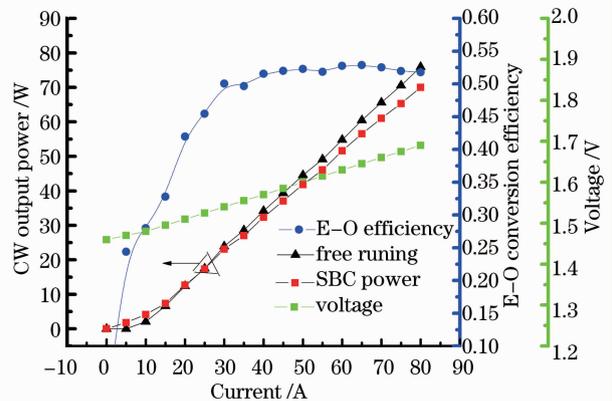


图3 半导体激光阵列的输出功率、电光转换效率和工作电压随工作电流的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of output power, electro-optical conversion efficiency and voltage with operating current of diode laser array

效率最高为 52.8%，最高的光光组合效率为 92.2%，结果如图 3 所示。其中光谱组束的损耗最大为 3%，相比于慢轴方向的光谱组束损耗较低<sup>[10]</sup>。

用焦距 300 mm 的聚集镜聚焦后测量输出光束质量，输出光束水平方向光束质量因子  $M^2 = 1.28$  (0.4 mm·mrad)，竖直方向光束质量因子  $M^2 = 11.2$  (3.5 mm·mrad)，结果如图 4 所示。相对于慢轴方向的光谱组束<sup>[8]</sup>，改进光谱组束结构后，不仅在组束的方向得到了近似单一发光单元的光束质量，而且在没有组束的方向，也很好保持了一个发光单元的光束质量，提升了整体输出光束的亮度。

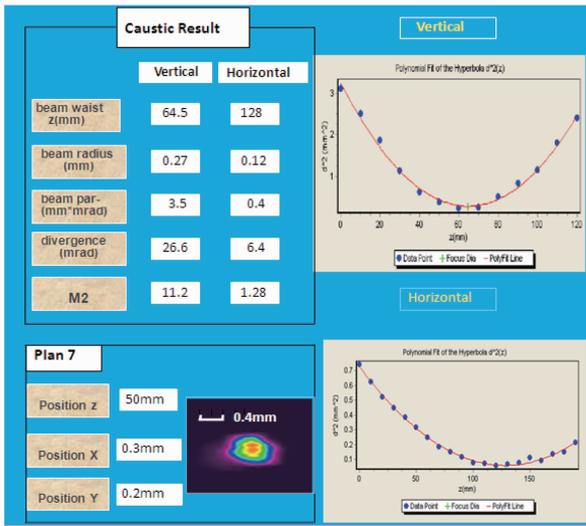


图 4 半导体激光阵列光谱合束后的光束质量测量结果  
Fig. 4 Beam quality measurement results of diode laser array after spectral beam combination

高功率下整体输出光束的光谱测量结果如图 5 所示。从图中可以看出共有 19 个尖峰，证明不同的发光单元锁定在不同的波长上，没有相互之间的串扰，并且与慢轴光谱组束的光谱比较<sup>[3-4,7-8]</sup>，中间

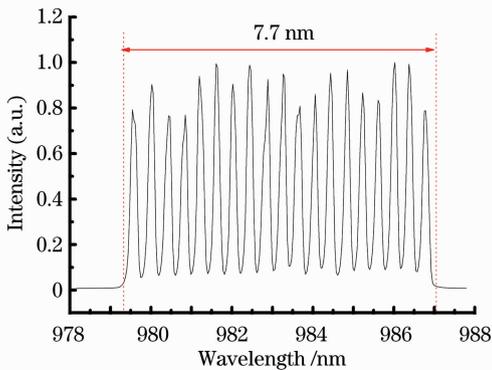


图 5 半导体激光阵列光谱合束后的光谱特性曲线  
Fig. 5 Spectrum characteristic curves of diode laser array after spectral beam combination

和两边的强度基本相同，没有出现两边强度逐渐下降的情况，证明各个发光单元的反饋量均匀，为更多的发光单元参与组束提供了可能性。整体的光谱宽度约为 7.7 nm，与理论计算的结果基本相同。

## 4 结 论

通过对光谱组束的实验结构进行改进，先对每个发光单元的光束进行光束整形，再进行光谱组束，减小了 smile 效应的影响，增加了转换效率，电光效率最大可达 52.8%，光光效率可达 92.2%。组合后的光束两个方向光束质量都接近单个发光单元的光束质量，水平方向光束质量因子  $M^2 = 1.28$  (0.4 mm·mrad)，竖直方向光束质量因子  $M^2 = 11.2$  (3.5 mm·mrad)，提高了整体的光束质量。边缘发光单元强度降低的效应得到了明显的改善，得到了较均匀的光谱分布，为多个巴条进行光谱组束，实现高光束质量、千瓦量级的半导体激光输出提供了有效的方法。

## 参 考 文 献

- 1 T Y Fan, A Sanchez. Coherent (phased array) and wavelength (spectral) beam combining compared [C]. SPIE, 2005, 5709: 157-164.
- 2 G A Evans, J M Hammer. Surface Emitting Semiconductor Lasers and Arrays [M]. San Diego: Academic Press, 1993. 379-386.
- 3 Shawn M Redmond, Kevin J Creedon, Jan E Kinsky, *et al.*. Active coherent beam combining of diode lasers [J]. Opt Lett, 2011, 36(6): 999-1001.
- 4 Kevin J Creedon, Shawn M Redmond, Gary M Smith, *et al.*. High efficiency coherent beam combining of semiconductor optical amplifiers [J]. Opt Lett, 2012, 37(23): 5006-5008.
- 5 C C Cook, T Y Fan. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity [C]. Advanced Solid-State Lasers, 1999, 26: 163-166.
- 6 C Hamilton, S Tidwell, D Meekhol, *et al.*. High power laser source with spectrally beam combined diode laser bars [C]. SPIE, 2004, 5336: 1-10.
- 7 V Daneu, A Sanchez, T Y Fan, *et al.*. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity [J]. Opt Lett, 2000, 25(6): 405-407.
- 8 J T Gopinath, B Chann, T Y Fan, *et al.*. 1450-nm high-brightness wavelength-beam combined diode laser array [J]. Opt Express, 2008, 16(13): 9405-9410.
- 9 B Chann, R K Huang, L J Missaggia, *et al.*. Near-diffraction-limited diode laser arrays by wavelength beam combining [J]. Opt Lett, 2005, 30(16): 2104-2106.
- 10 J Zhang, H Peng, X Fu, *et al.*. CW 50 W/M<sup>2</sup>=10.9 diode laser source by spectral beam combining based on a transmission grating [J]. Opt Express, 2013, 21(3): 3627-3632.
- 11 Juergen Jandeleit, Nicolas Wiedmann, Andreas Ostlender, *et al.*. Packaging and characterization of high power diode lasers [C]. SPIE, 2000, 3945: 270-277.
- 12 P Y Wang, A Gheen, Z Wang. Beam shaping technology for laser diode arrays [C]. SPIE, 2002, 4770: 131-135.

栏目编辑: 史 敏