

# 高效外腔光谱合束半导体激光器阵列

彭航宇 张俊 付喜宏 曹军胜 王彪

(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)

**摘要** 利用包含透射光栅的外腔反馈结构,使半导体激光器阵列中各发光单元工作波长不相同,实现了各发光单元激射波长的啁啾。通过外腔镜使各个发光单元出射光束重叠及方向一致,实现半导体激光器阵列的光谱合束,从而提高半导体激光器的光束质量。采用前腔面镀有增透膜的激光器阵列实现功率为 52.2 W 的连续波激光输出,电-光转换效率达到 47.9%,光谱线宽为 15.17 nm。整个阵列输出光束的光参量积达到 3.7 mm·mrad,与阵列中单个发光单元的光束质量基本一致。

**关键词** 激光器; 半导体激光; 光谱合束; 光栅; 外腔

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0702015

## High-Efficiency External Cavity Spectral-Beam-Combined Diode Laser Array

Peng Hangyu Zhang Jun Fu Xihong Cao Junsheng Wang Biao

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

**Abstract** The spectral beam combining with an array of high-power and high-efficiency diode lasers is reported by using a common external cavity which contains a transmission grating, while simultaneously forces each element to operate at different, but controlled wavelengths and forces the beams from all the elements to overlap and propagate in the same direction. Using the diode laser array with front-mirror surfaces coating with high transmittance films, a continuous-wave laser with output power of 52.2 W and electro-optical conversion efficiency of 47.9% is achieved. The spectral linewidth is about 15.17 nm. Beam parameter product (BBP) is 3.7 mm·mrad, which is the same as that of single element of the array.

**Key words** lasers; diode laser; spectral beam combining; grating; external cavity

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

## 1 引言

大功率半导体激光器阵列以其体积小、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器阵列本身结构的限制,慢轴方向的光束质量较差,以一个发散角为  $8^\circ$ ,长度为 1 cm 的半导体激光阵列为例,其光参量积接近 350 mm·mrad,光束质量非常差,需要通过合束的方法改善激光器的光束质量。目前改善大功率半导体激光器阵列光束质量的合束方法主要有相干合束和非相干合束两大类。相干合束又分为主动相干合束<sup>[1-3]</sup>和被动相干合束两类<sup>[4-8]</sup>。主动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,目前只有美国麻省理工学院的 Lincoln 实验室获得一定的结果;被动相干合束是通过例如 Talbot 腔自成像等方式实现激光器阵列中发光单元之间的相干,但是被动相干合束的输出光束存在旁瓣,很难获得单瓣输出。非相干合束包括光束整形<sup>[9-13]</sup>和外腔反馈光谱合束(SBC)<sup>[14-17]</sup>等。光束整形的方法较多,主要是采用几何耦合的方法,不改变激光器本身的输出特性,通过均衡快慢轴方向的光参数积来改善光束质量,阵列中的发光单元数量越多,光参数积越大,光束质量越差,对光束质量的改善有限;外

收稿日期: 2012-12-14; 收到修改稿日期: 2013-03-26

基金项目: 国家 863 计划(2012AA040210)、科技部重大仪器专项(2011YQ04007702)和吉林省科技厅发展计划(20112106,20115025,20116011)

作者简介: 彭航宇(1983-),男,博士,助理研究员,主要从事半导体激光器方面的研究。E-mail:imphy@163.com

腔光谱合束方法通过外腔反馈,改变阵列中发光单元的输出波长,实现波长的啁啾,进而通过光谱合束方式实现光束质量的改善。理论上如果阵列中发光单元是近衍射极限输出,则外腔光谱合束后的阵列输出光束也是近衍射极限输出。

本文通过外腔光谱合束的方法改善激光器阵列的光束质量,获得阵列的输出功率为 52.2 W,其光

参量积为  $3.7 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,接近单个发光单元的光束质量,电-光转换效率达到 47.9%。

## 2 基本原理及装置

SBC 半导体激光器阵列由半导体激光器阵列、快慢轴准直镜、半波片、场镜、衍射光栅及外腔镜组成,实验结构如图 1 所示。

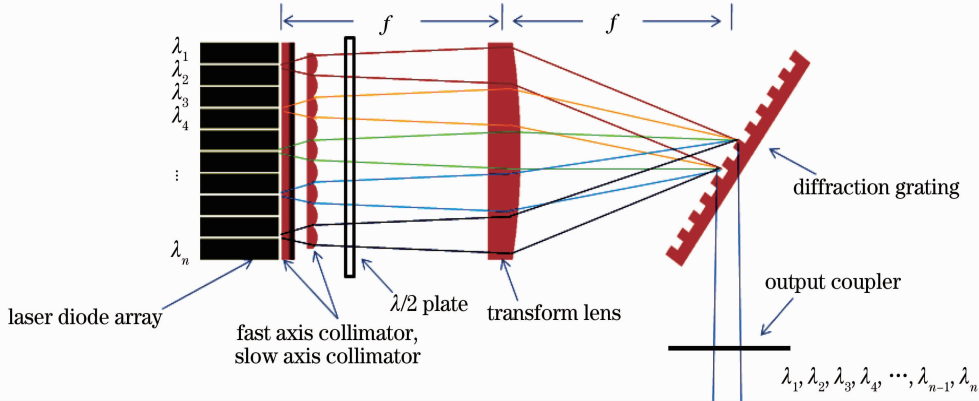


图 1 外腔反馈光谱合束实验结构图

Fig. 1 Basic architecture of spectral beam combining experiment

采用的半导体激光器阵列结构与普通的半导体激光阵列基本一致,其后腔面反射率也基本相同(反射率  $R \geq 95\%$ ),唯一不同的是半导体激光器阵列前腔面需要镀增透膜(反射率  $R \leq 0.5\%$ )。外腔镜是一个部分反射的平面镜(反射率  $R \approx 10\%$ ),激光器的后腔面与外腔镜构成谐振腔。激光器条宽为 1 cm,包括 19 个发光单元,填充因子为 20%,发光单元条宽  $b$  为  $100 \mu\text{m}$ ,空间周期  $p$  为  $500 \mu\text{m}$ ,快慢轴发散角为  $63^\circ \times 8^\circ$  ( $1/e^2$  值,下同)。外腔镜起到反馈和耦合输出的作用,使每个发光单元都得到部分反馈。反馈光垂直于外腔镜,所有发光单元共用一个反馈光路,反馈光经过前面的光学系统,返回到半导体激光器的原发光单元处形成有效振荡。快慢轴准直镜的作用就是对激光器阵列的快慢轴进行准直,降低光束发散角,提高外腔反馈的效率。激光器和光栅分别位于场镜的前后焦平面上,场镜起傅里叶变换作用,场镜的有效焦距  $f_c \approx 240 \text{ mm}$ ,变换后激光器的光场分布和发散角的场分布互相调换,这样激光器阵列上不同位置的每个发光单元以不同角度入射到光栅。

光栅的作用是实现光谱合束,将上述不同角度入射的激光束经光栅衍射后沿同一方向出射。在进行光谱合束时,可选择的光栅种类较多,例如:

1) 闪耀光栅和全息光栅等反射式光栅。闪耀光栅和全息光栅的基体材料通常是玻璃,光栅结构

主要由玻璃表面的环氧树脂或光刻胶通过母光栅结构复制、转移得到,在有机光栅结构外层,再镀金或铝,实现较高的反射率。由于光栅中含有有机物,这限制了光栅的光学性能和能够承受的最大功率。

2) 重铬酸盐明胶(DCG)光栅。DCG 光栅是一种体相位光栅,光栅结构主要由 DCG 材料实现。DCG 光栅通常是将 DCG 材料夹在两块基板中间(玻璃或熔融二氧化硅),再通过密封材料将 DCG 与空气隔离。DCG 材料的环境不稳定性 and 热不稳定性限制了 DCG 光栅的应用。

3) 融石英透射光栅。融石英透射光栅是 100% 的融石英材料,一般是在融石英材料的一面刻蚀光栅结构,另外一面镀增透膜,实现高的衍射效率。融石英材料具有较宽的透射光谱,覆盖紫外到中红外波长范围。融石英材料在一个很宽的带宽内(从紫外到近红外)的吸收是可以忽略的,可以认为它是最透明的材料之一。考虑光栅的高功率应用时,材料的吸收就变得非常重要,传统的反射光栅的金属反射膜与融石英相比具有更高的吸收。融石英材料的物理特性稳定,并且在不发生反应的环境中 DCG 是吸湿的;闪耀光栅和全息光栅中的环氧树脂或光刻胶,随着时间的推移,经加速热量和紫外线照射,其性质容易发生变化;而融石英基本不受环境影响,具有非常高的可靠性。

融石英透射光栅在进行外腔光谱合束时,可以

实现 Littrow 入射条件,而闪耀光栅和全息光栅由于入射光与反射光不能重合,只能以非 Littrow 角入射。因而融石英透射光栅在相同条件下能够获得更高的衍射效率。

光栅方程为

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

式中  $m$  为衍射级次,  $\lambda$  为入射激光波长,  $\theta_i$  为入射角,  $\theta_d$  为衍射角,  $d$  为光栅周期长度, 当入射角与衍射角相等时,  $\theta_i = \theta_d = \theta_L$ 。光栅 -1 级具有较高的衍射效率, 在  $804 \pm 20$  nm 光谱宽范围内 -1 级衍射效率大于 94%。光栅的周期长度为  $1/\Lambda = 1757.8$  lp/mm, 对于中心波长为 804 nm 的激光来说, 其 Littrow 角  $\theta_L$  为  $45^\circ$ , 入射光束和衍射光束的夹角为  $90^\circ$ 。激光器阵列上最中间的发光单元的入射角为  $45^\circ$ , 外腔镜与光栅的夹角为  $45^\circ$ , 由于每个激光器激射需要外腔的反馈, 反馈光与外腔镜垂直, 因而每个发光单元由光栅衍射后的角度均为  $45^\circ$ 。

根据光栅色散方程

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{1}{\Lambda \cos \theta}, \quad (2)$$

相邻入射角度间隔为

$$\Delta\theta = p/f_c, \quad (3)$$

得到相邻激光单元的波长间隔为

$$\Delta\lambda_p = \frac{\Lambda p \cos \theta_0}{f_c} = 0.838 \text{ nm}, \quad (4)$$

则整个激光阵列的谱宽为

$$\Delta\lambda = (N-1) \frac{\Lambda p \cos \theta_0}{f_c} = 15.08 \text{ nm}. \quad (5)$$

由于光栅只对 TE 模式的激光具有较高的衍射效率, 而激光器出射光的偏振方向相对光栅来说是 TM 模式, 因而需要在光路中加入半波片使激光器出射光的偏振方向旋转  $90^\circ$ , 实现两者之间的匹配。

### 3 实验结果

实验中的半导体激光器阵列自由输出, 没有外腔反馈的情况下, 在注入电流  $I=60$  A 时, 中心波长  $\lambda_0=803.89$  nm, 光谱线宽  $\Delta\lambda_0=1.99$  nm, 如图 2 所示。与普通半导体激光器阵列的光谱特性基本没有差别。

图 3 给出了注入电流为 60 A 时, 外腔锁定后的激光器阵列上发光单元的激射光谱特性曲线。从图中可以看到, 阵列上的 19 个发光单元均实现激射, 每个发光单元的光谱中心高度基本相同, 各个激射波长之间的间隔为 0.84 nm 左右, 阵列的整体光谱

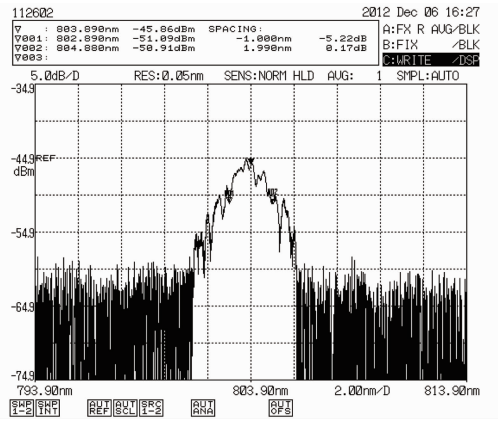


图 2 自由运行半导体激光阵列的光谱特性曲线  
Fig. 2 Spectrum characteristics curves of free-running diode laser array

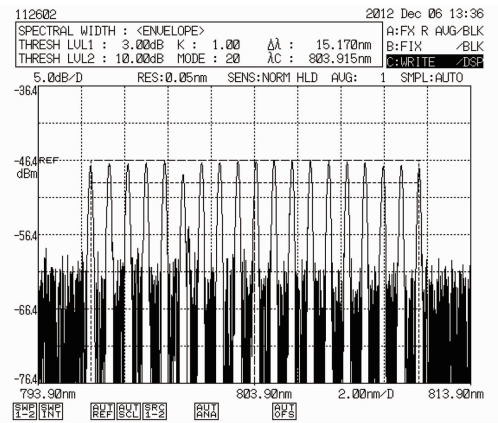


图 3 光谱合束半导体激光阵列的光谱特性曲线  
Fig. 3 Spectrum characteristics curves of SBC diode laser array

宽度为 15.17 nm, 与理论值基本一致。阵列中的第 6 个发光单元的激射波长存在一个次峰, 激射波长没有完全锁定, 分析其原因, 可能是激光器封装产生的 Smile 效应导致外腔镜产生的反馈光不能完全锁定激光器的激射波长, 导致次峰的出现。

在此基础上, 分析了单个发光单元的光谱特性, 选取阵列中最中间发光单元(即第 10 个发光单元), 从图 4 中可以看到, 第 10 个发光单元的激射波长  $\lambda_0=803.929$  nm, 光谱线宽  $\Delta\lambda_0=0.141$  nm。可以看出相比普通的半导体激光器单管的光谱线宽明显窄化, 这主要是由于光栅的波长选择性和外腔反馈很好地锁定了激射波长, 实现光谱线宽的窄化。

图 5 给出了单个发光单元的激射波长随热沉温度的变化曲线, 在水温由  $15^\circ\text{C}$  变化到  $25^\circ\text{C}$  时, 中心波长由 803.942 nm 变化到 803.917 nm, 可以看到光谱随温度变化非常小, 波长变化量只有 0.025 nm, 波长随温度的变化率  $d\lambda/dT=0.0025$  nm/ $^\circ\text{C}$ 。

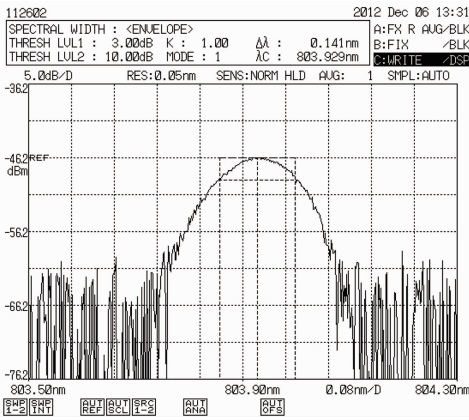


图 4 阵列中单个发光单元的光谱特性曲线  
Fig. 4 Spectrum characteristics curves of single emitter in diode laser array

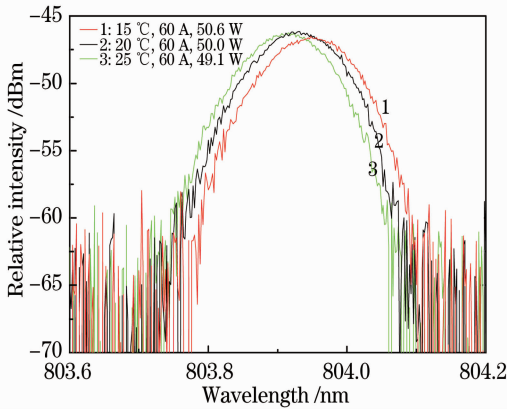


图 5 单个发光单元光谱随热沉温度的变化曲线  
Fig. 5 Variation curves of spectrum of single emitter with heatsink temperature

图 6 给出了激光器阵列自由运行及经过 SBC 后的输出功率及电-光转换效率,由于激光器前腔面反射率  $R \leq 0.5\%$ ,自由运行时激光器阵列的阈值电流较大,  $I_{th} = 12.5 \text{ A}$ ,在阵列经过快慢轴准直后,  $I = 62.5 \text{ A}$ 时,工作电压为  $1.744 \text{ V}$ ,输出功率达到

$54.7 \text{ W}$ ,斜率效率为  $1.1 \text{ W/A}$ ,相应的电-光转换效率为  $50.2\%$ 。经过 SBC 后,激光器阵列的阈值电流出现明显的下降,由  $12.5 \text{ A}$  降低到  $7.5 \text{ A}$ 。  $I = 62.5 \text{ A}$ 时,输出功率达到  $52.2 \text{ W}$ ,斜率效率为  $0.95 \text{ W/A}$ ,相应的电-光转换效率为  $47.9\%$ ,SBC 过程中的功率损耗非常小,功率效率达到  $95.4\%$ ,只有  $1.77 \text{ W}$  的功率集中到衍射光栅的 0 级衍射级次,SBC 后的电-光转换效率接近于自由输出状态。

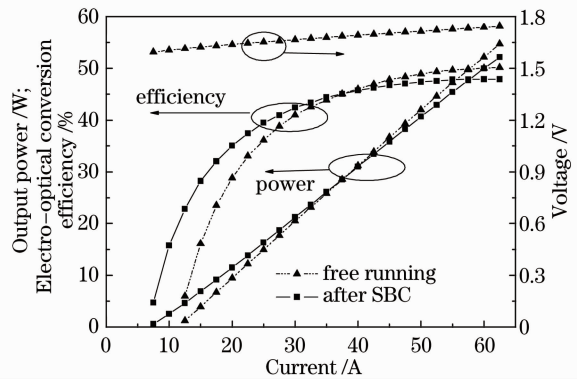


图 6 半导体激光阵列的输出功率、电-光转换效率和工作电压随工作电流的变化曲线  
Fig. 6 Variation curves of output power, electro-optical conversion efficiency and voltage with operating current of diode laser array

采用焦距约为  $100 \text{ mm}$  的聚焦镜对 SBC 后的输出光束进行聚焦,通过光束质量分析仪对聚焦光束进行分析,得到激光器阵列的光参量积为  $3.7 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,如图 7 所示。可见阵列整体光束质量与阵列中单个发光单元的光束质量基本相同。

## 4 结 论

基于外腔光谱合束技术,实现半导体激光器阵列各个发光单元输出波长的锁定。在注入电流为

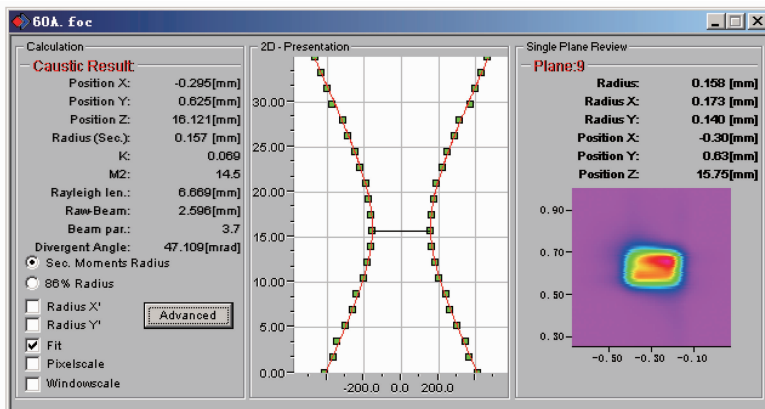


图 7 光谱合束半导体激光阵列的光束质量测量结果  
Fig. 7 Beam quality measurement of SBC diode laser array

62.5 A 时, 获得功率 52.2 W 的激光输出, 斜率效率为 0.95 W/A, 相应的电-光转换效率为 47.9%, SBC 后功率效率达到 95.4%, 整体光谱宽度为 15.17 nm, 光参量为 3.7 mm·mrad。进一步的实验可以通过减小各个相邻发光单元之间的光谱间隔, 在激光器的增益范围内实现更多发光单元的 SBC, 进而在不降低光束质量的前提下提高输出功率。

### 参 考 文 献

- 1 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.
- 2 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.
- 3 Juan Montoya, Steven J Augst, Kevin Creedon, *et al.*. External cavity beam combining of 21 semiconductor lasers using SPGD[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(11): 1724-1728.
- 4 David Pabœuf, Deepak Vijayakumar, Ole Bjarlin Jensen, *et al.*. Volume Bragg grating external cavities for the passive phase locking of high-brightness diode laser arrays: theoretical and experimental study[J]. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28(5): 1289-1299.
- 5 B Liu, Y Liu, Y Braiman. Coherent beam combining of high power broad-area laser diode array with a closed-V-shape external Talbot cavity[J]. *Opt Express*, 2010, 18(7): 7361-7368.
- 6 David Pabœuf, Gaëlle Lucas-Leclin, Patrick Georges, *et al.*. Wavelength-stabilized tapered laser diodes in an external Talbot cavity: simulations and experiments[C]. *SPIE*, 2009, 7198: 71981L.
- 7 David Pabœuf, Florian Emaury, Sébastien de Rossi, *et al.*. Coherent beam superposition of ten diode lasers with a Damman grating[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(10): 1515-1517.
- 8 Pengfei Zhao, Qiang Li, Weirong Guo, *et al.*. In-phase output beam from broad-area diode array using Talbot cavity[J]. *Chin Opt Lett*, 2007, 5(5): 284-285.
- 9 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.
- 10 Cao Yinhua, Liu Youqiang, Qin Wenbin, *et al.*. Kilowatt diode laser with beam quality better than all-solid-state 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 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.
- 12 Peng Hangyu, Liu Yun, Shan Xiaonan, *et al.*. 2600 W high efficiency laser diode source with polarization coupling [J]. *Chinese J Luminescence*, 2011, 32(10): 1036-1040.
- 彭航宇, 刘 云, 单肖楠, 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.
- 13 Zhang Jun, Shan Xiaonan, Liu Yun, *et al.*. Kilowatt-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.
- 14 Liu Bo, Li Qiang, Zhang Xue, *et al.*. Wavelength beam combining of laser diode array to get 20 W CW circle spot emission[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(11): 1633-1638.
- 刘 波, 李 强, 张 雪, 等. 808 nm 激光二极管阵列波长光束组合 20 W 输出[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(11): 1633-1638.
- 15 Robin K. Huang, Bien Chann, James Burgess, *et al.*. Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber, CO<sub>2</sub>, and solid state lasers[C]. *SPIE*, 2012, 8241: 824102.
- 16 Charles E Hamilton, Steven C Tidwell, Dawn Meekhof, *et al.*. High-power laser source with spectrally beam-combined diode laser bars[C]. *SPIE*, 2004, 5336: 1-10.
- 17 Juliet T Gopinath, Bien Chann, T Y Fan, *et al.*. 1450-nm high-brightness wavelength-beam combined diode laser array[J]. *Opt Express*, 2008, 16(13): 9405-9410.

栏目编辑：张 腾