

# 窄光谱高亮度半导体激光器光栅-外腔光谱合束 实验研究

孟慧成<sup>1,2,3</sup> 武德勇<sup>1,2</sup> 谭昊<sup>1,2</sup> 李建民<sup>1,2</sup> 余俊宏<sup>1,2</sup> 高松信<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

<sup>2</sup>中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

<sup>3</sup>中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

**摘要** 光栅-外腔光谱合束是基于光栅的波长选择特性和外腔的反馈,使得半导体激光阵列(DLA)中的每个发光单元锁定在不同的波长,并保持每个发光单元输出光束在近场和远场重合,实现光谱合束后输出光束质量与单个发光单元的光束质量保持一致,极大地改善了输出光束的光束质量。实验采用发光单元宽度为 $100\ \mu\text{m}$ 、周期为 $500\ \mu\text{m}$ ,由19个发光单元组成的常规CM-Bar条进行光栅-外腔光谱合束技术实验,在连续运行最大注入电流为70 A,获得了44.9 W的连续激光输出,快慢轴的光束质量分别为 $1.52\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ 和 $5\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ ,合束后的电光转换效率为36%,输出光斑亮度约为 $36.92\ \text{MW}/\text{cm}^2\text{-str}$ ,光谱展宽为3.24 nm,合成输出激光可以被耦合进入 $50\ \mu\text{m}$ 芯径、数值孔径(NA)0.22的光纤中,作为高亮度激光抽运源或直接半导体激光光源使用。

**关键字** 激光器; 半导体激光器; 光栅-外腔; 光谱合束; 反馈; 锁定

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0302003

## Experimental Study on High Brightness and Narrow Band of Diode Laser by Spectral Beam Combining of Grating-External Cavity

Meng Huicheng<sup>1,2,3</sup> Wu Deyong<sup>1,2</sup> Tan Hao<sup>1,2</sup> Li Jianming<sup>1,2</sup> Yu Junhong<sup>1,2</sup> Gao Songxin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

<sup>3</sup>Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

**Abstract** The grating-external cavity spectral beam combined is based on the wavelength selection characteristic of the grating and the feedback by external cavity and simultaneously controls each emitter of the diode laser array (DLA) to lock at different wavelengths, while forces the individual beam to overlap in the near and far fields. The spectral combined beam has the same beam quality as the beam of single emitter of the DLA, greatly improve the beam quality of the output beam. The conventional CM-Bar with 19 emitters is applied, The period of the CM-Bar is  $500\ \mu\text{m}$  and the width of emitter is  $100\ \mu\text{m}$ . With the maximum continuous wave (CW) injection current of 70 A, a continuous 44.90 W laser output is obtained. The beam quality of slow and fast axes after spectral beam combined are  $1.52\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$  and  $5\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ , respectively. Electro-optic conversion efficiency of 36% is achieved. The brightness of output spot is about  $36.92\ \text{MW}/\text{cm}^2\text{-str}$ , spectral widening is 3.24 nm, combining output laser coupled into  $50\ \mu\text{m}$  core diameter, numerical aperture (NA) of 0.22 fiber, can be used as a high-brightness laser

收稿日期: 2014-09-15; 收到修改稿日期: 2014-10-29

基金项目: 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金课题(HEL2014-08)

作者简介: 孟慧成(1989—),男,硕士研究生,主要从事半导体激光器光束合束技术方面的研究。

E-mail: happy\_m1989@163.com

导师简介: 武德勇(1968—),男,研究员,硕士生导师,主要从事高功率半导体激光器封装、激光光束合束、光束整形技术等方面的研究。E-mail: 139080123302@139.com

pump source or direct diode laser source.

Key words lasers; diode laser; grating-external cavity; spectral beam combining; feedback; locked

OCIS codes 140.2020; 140.3300; 140.3298; 140.3320; 1050.1950

## 1 引言

高功率半导体激光器具有电光转化效率高、体积小、可靠性高等优点,尤其是在美国 SHEDS<sup>[1]</sup>和德国 BRIOLAS<sup>[2]</sup>等项目的支持下单元器件性能实现了重大突破,但是由于其波导结构及芯片封装等因素的限制,导致光束质量变差和功率密度降低,限制了其在激光照明、抽运固体激光器或光纤激光器、材料加工和军工等领域的进一步应用。

目前国际上半导体激光器合束的主要方法有相干合束<sup>[3]</sup>和非相干合束<sup>[4]</sup>两类,相干合束能有效改善并提高半导体激光阵列输出光的光束质量,但是该技术容易受到外界环境的干扰,不易获得同相超模的大功率稳定激光输出。非相干合束技术是目前国际上半导体激光器合束的主要方法,主要通过空间合束<sup>[5]</sup>、波长合束<sup>[6]</sup>和偏振合束<sup>[7]</sup>等方法将多路半导体激光合成一束,增加输出功率,以达到提高系统亮度的目的,但是基于合束机理和所需光学器件的限制,以上三种合束方式并不能够实现理想的定标放大。

自从2000年麻省理工大学 Lincoln 实验室<sup>[8]</sup>首次提出采用光栅-外腔的方法对半导体激光阵列或多个光纤激光器实行光谱合束以来,该方法受到了极大的重视和关注。经过国内外十几年的研究<sup>[9-12]</sup>,光谱合束(SBC)技术可以实现多个合束单元的功率叠加,同时合束输出的光束与每个合束单元具有相同的光束质量,被证明是提高半导体激光光束质量、实现高亮度输出最为有效的合束技术之一。2010年 Fraunhofer Institute 和 Denmark 大学合作<sup>[13]</sup>,对12个980 nm的锥形合束单元的bar条(在30 A时输出光功率14.50 W)进行光栅-外腔光谱合束实验,在驱动电流30 A时得到功率9.30 W的激光输出,慢轴光束质量约为1.65 mm·mrad,谱展宽为44 nm。2014年 Potsdam 大学的 Christof Zink 等<sup>[14]</sup>首次实现了基于单个半导体激光器发光单元光栅外腔自锁定光谱合束实验,实现了条宽1000 μm的宽发射截面半导体激光器的(BAL)光谱合束实验,得到了包含31个独立谱线,谱宽为3.6 nm的单空间模式的衍射极限输出。

本文利用光栅-外腔光谱合束技术实现了单个半导体激光 Bar 条的光谱合成,获得了44.9 W的连续激光输出,快慢轴光束质量分别为1.52 mm·mrad和5 mm·mrad,光谱展宽为3.24 nm,是目前通过光栅-外腔光谱合束获得的最窄光谱输出。

## 2 原理及实验装置

相比于常规的激光合束而言,光谱合束是结合了外腔半导体激光器(ECDL)技术和波分复用(WDM)技术,实现单个合束单元的光谱锁定和所有合束单元的合束输出,具体的原理如图1所示。

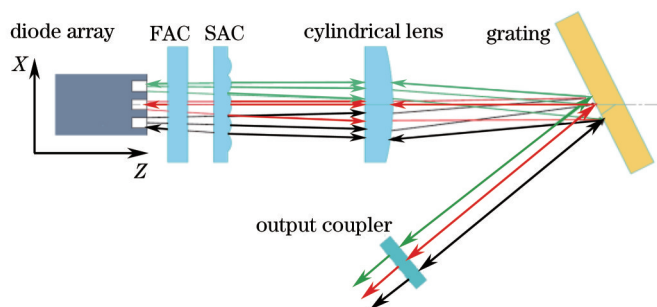


图1 光栅外腔反馈光谱合束原理图

Fig.1 Schematic of SBC with external cavity feedback based on grating

从图1可见光栅-外腔光谱合束装置是由半导体激光阵列(DLA)、快轴准直镜(FAC)、慢轴准直镜(SAC)、变换柱透镜、光栅和外腔镜组成。DLA和光栅分别位于变换透镜的前后焦面,外腔镜垂直于光栅衍射的-1级方向放置,不同DLA单元的出射光束通过变换透镜,将空间位置转换成不同的入射角度投射到光栅上,再由光栅衍射后以相同的衍射角度衍射进行空间合束。由于外腔镜的部分反馈作用,与外腔镜垂直的那部分

光束按一定比例反馈后,再次经过光栅、变换透镜注入 DLA,这样,DLA 的后端面与-1 级衍射方向的外腔镜形成一外谐振腔,反馈注入的光束与有源区的光场进行耦合,使得各个激光纵模间产生增益差,让满足振荡和阈值条件的纵模被激发起振,在外谐振腔形成振荡,而其他纵模则被抑制。由于增益竞争作用和光栅色散作用,DLA 单元可实现不同波长运转,根据 Lang-Kobayashi 理论模型<sup>[15-16]</sup>可以将光栅-外腔合束系统等效为图 2 所示结构, $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  分别为各个腔面的反射率, $\eta$  为闪耀光栅的-1 级衍射效率。实验中半导体激光器的前腔面采用增透处理, $R_2 < 0.5\%$ ,远小于  $R_3 \cdot \eta_2$ ,此时的反馈属于中度强反馈,则考虑到半导体激光器 Langevin 相位噪声项和载流子浓度  $N$  的变化对光场特性的影响时,外腔半导体激光器的线宽可以表示为<sup>[17-18]</sup>

$$\Delta\nu_f = \frac{\Delta\nu}{\left[1 + \frac{L_{ex}}{L_{in}} \left(1 - \frac{R_2}{\eta^2 R_3}\right)\right]^2}, \quad (1)$$

式中  $\Delta\nu$  为无外腔时激光器的线宽, $L_{ex}$  为外腔长度, $L_{in}$  为半导体激光器的本征腔长。在外腔长度不变时,外腔镜反射率  $R_3$  越高或光栅衍射效率  $\eta$  越高,线宽也越窄。

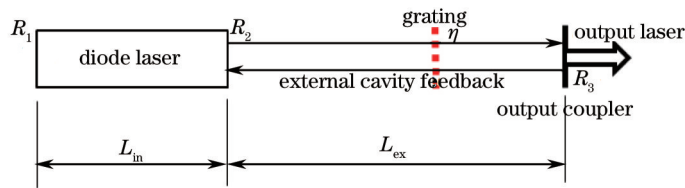


图 2 外腔反馈半导体激光器等效示意图

Fig.2 Equivalent schematic of diode laser with external feedback

实验中光栅作为波分复用器件使用,如图 3 所示,使不同合束单元选择出不同的光谱沿同一衍射方向出射,且每一个合束单元由外腔锁定的不同激光光束和衍射光束均满足光栅方程

$$m\lambda = d \cdot (\sin \theta_i + \sin \theta_d), \quad (2)$$

式中  $d$  为光栅周期, $\theta_i$  为入射角, $\theta_d$  为衍射角。由于所使用光栅在衍射角  $\theta_d = \theta_{Littrow}$  时有最大的衍射效率。为了获得最佳合束效率,以中间合束单元的光栅入射角  $\theta_0 = \theta_{Littrow}$ ,则根据光栅方程(2)式可以求得其衍射角  $\theta_{d0} = \theta_{Littrow}$ ,所有合束单元沿同一衍射方向出射,具有相同的衍射角度。由如图 3 所示的几何关系,第  $i$  个合束单元的入射光束的衍射角

$$\theta_i = \theta_{Littrow} + \arctan \frac{i \cdot p}{f}, \quad (3)$$

式中  $p$  为合束单元间距(Bar 条中每个发光点的间距), $f$  为变换透镜的有效焦距。则根据(2)式得出第  $i$  个合束单元的中心波长为

$$\lambda_i = d \cdot \left\{ \sin(\theta_{Littrow}) + \sin \left[ \theta_{Littrow} + \arctan \left( \frac{i \cdot p}{f} \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

由于实验选取的变换透镜焦距  $f \gg i \cdot p$ ,则可以近似  $\arctan \frac{i \cdot p}{f} \approx \frac{i \cdot p}{f}$ ,则(4)式可以简化为

$$\lambda_i = d \cdot \left[ \sin(\theta_{Littrow}) + \sin \left( \theta_{Littrow} + \frac{i \cdot p}{f} \right) \right], \quad (5)$$

对(5)式两边分别对  $\lambda_i$  和  $i$  求导:

$$\Delta\lambda_i = \frac{d \cdot p}{f} \cos \left( \theta_{Littrow} + \frac{i \cdot p}{f} \right). \quad (6)$$

实验所用半导体激光芯片是由 19 个发光单元组成,发光单元条宽为  $100 \mu\text{m}$ ,相邻发光单元中心距为  $500 \mu\text{m}$ ,中心波长  $800 \text{ nm}$ ,芯片前端面增透处理以消除内腔的不利影响,其中半导体激光 Bar 条由中国工程物理研究院应用电子学研究所自行封装,光栅刻线密度为  $2292 \text{ line/mm}$ ,变换透镜焦距  $f=330 \text{ mm}$ 。则按照(6)式可以计算出在理论情况下输出光谱展宽约为  $5.02 \text{ nm}$ 。

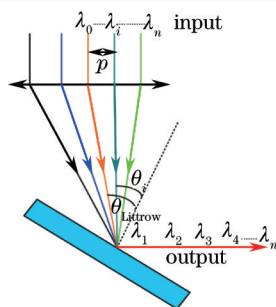


图3 光栅波分复用原理图

Fig.3 Schematic of WDM with grating

### 3 实验结果及讨论分析

图4为前腔面镀增透膜的标准CM-Bar自由运转时,在注入电流为60 A时测得光谱,其半峰全宽(FWHM)约为2.14 nm。图5为光谱合束后的输出光谱,整个阵列光谱由19个尖峰组成(与19个发光点一一对应),整个阵列的光谱展宽为3.24 nm。由于实验光路搭建的关系,衍射光的出射方向并不是沿设计的 $\theta_{Littrow}$ 方向出射,而是在 $\theta_d$ 约为75°的方向出射,造成合束后的光谱小于理论计算的展宽光谱。

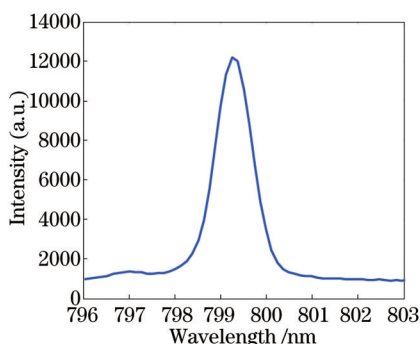


图4 CM-Bar自由运转时的光谱

Fig.4 Spectrum of free running CM-Bar

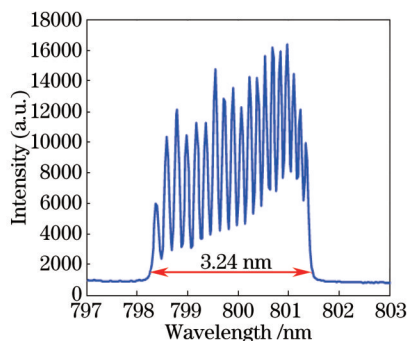


图5 CM-Bar光谱合束锁定的光谱

Fig.5 Spectrum of CM-Bar by SBC

图6为CM-Bar条的光电(E-O)特性曲线,由图可知,当工作电流在70 A时,输出功率为70.40 W时,电光转换效率为57%;经过光栅-外腔光谱合束以后在工作电流为70 A时,输出功率为44.90 W时,电光效率为36.35%。光栅-外腔合束后的电光效率并没有超过46%,这是因为:1) 衍射角度远离 $\theta_{Littrow}$ ,光栅的-1级衍射效率并没有达到95%以上,经过测量实验角度下( $\theta_d = 75^\circ$ )光栅前后光-光转换效率定义为 $\sigma = P_d/P_{in}$ ,如图5所示光栅前后的光-光转换效率 $\sigma$ 在85%左右;2) 变换透镜的像差导致个别发光单元在光栅处的光斑并不完全重合,使得衍射光束与输出光束光轴形成一定夹角,即激光束不能垂直入射到外腔镜上,造成该合束单

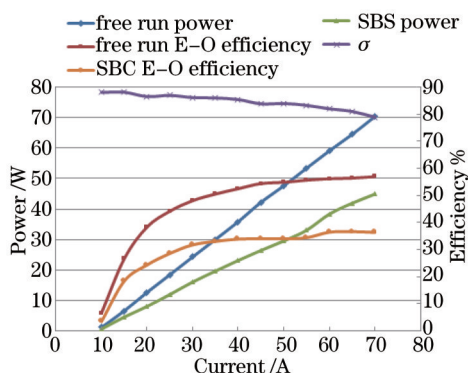


图6 CM-Bar自由运转和SBC的输出功率及对应的电光转换效率、光栅前后的光-光转换效率 $\sigma$

Fig.6 Curves of CM-Bar output power, E-O efficiency of current in free running model and SBC model, and optical-optical efficiency of grating  $\sigma$

元的输出功率下降,并使得整体输出光束质量降低;3)为了最大程度抑制耦合腔对锁定光谱的影响,实现整个阵列的锁定,选定反馈外腔镜反射率为15%,外腔镜高的反射率对输出功率有较大的影响;4)实验所用CM-Bar是由19个发光单元线性阵列而成,其近场强度分布具体如图7所示,合束单元在快轴方向有一定的弯曲,主要是由封装等因素引入的“smile”效应<sup>[19]</sup>所致,使得各个合束单元经由外腔的反馈强度不同,从而造成个别合束单元的不完全锁定、输出功率下降与快慢轴光束质量退化,同时按照(1)式的理论,可以推断出不同的合束单元由于反馈强度不同,其锁定的光谱宽度是不等宽的,这与图5所示光谱一致。

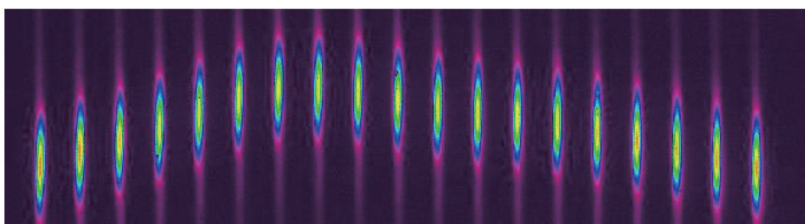


图7 CM-Bar激光阵列近场“smile”效应图示

Fig.7 Schematic of “smile” effect of CM-Bar array in near-field

在注入电流为65 A时,测得距外腔镜约200 mm处光栅-外腔光谱合束输出光斑如图8所示,测得光斑尺寸(95%的能量范围) $D_{fast}=6.00$  mm,  $D_{slow}=9.80$  mm。利用一焦距 $f=200.00$ 的聚焦镜对合束光束的远场进行测量,用CCD测量在聚焦镜的焦平面处的输出光斑,光斑形状近似椭圆形(95%的能量范围),与单个发光单元的远场光斑相似,如图9所示,快轴方向的光斑尺寸 $H=200.82$   $\mu\text{m}$ ,慢轴方向的光斑尺寸宽度 $W=406.86$   $\mu\text{m}$ ,则可以求出快轴的发散全角 $\theta_{fast}=1.01$  mrad,慢轴方向的发散全角 $\theta_{slow}=2.04$  mrad,使用光参数积(BPP,  $Q$ )可以衡量半导体激光器光束质量的好坏则根据光参量积公式<sup>[20]</sup>

$$Q = \frac{\theta \cdot D}{4} \quad (7)$$

可以计算出快慢轴方向光参量积分别为 $Q_f=1.52$  mm·mrad、 $Q_s=5.00$  mm·mrad。由图7和图8所示光谱合束输出光斑近似为椭圆形光斑,在快慢轴方向的光斑尺寸与全发散角均各不相同,近似为矩形光斑处理,则其光斑束腰面积和立体角分别表示为: $\Delta S = D_{fast} \cdot D_{slow}$ ,  $\Delta\Omega = \theta_{fast} \cdot \theta_{slow}$ ,对应的亮度 $B$ 可以表示为<sup>[19]</sup>

$$B_{diode} = \frac{P_{av}}{16 \cdot Q_f \cdot Q_s} \quad (8)$$

则由(8)式可以计算出输出光斑亮度 $B_{diode} = 36.92$  MW/cm<sup>2</sup>-str。

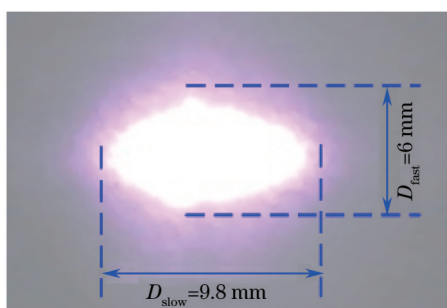


图8 65 A外腔镜200 mm处合束输出的光斑

Fig.8 Spot at 200 mm behind external mirror with current of 65 A

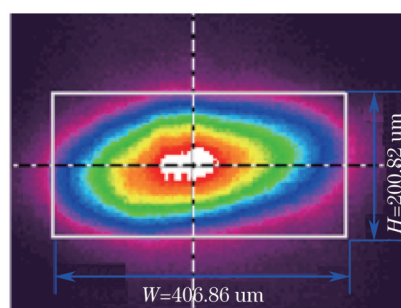


图9 65 A合束光束远场光斑

Fig.9 Far field spot of spectral combined beam with current of 65 A

合成输出光可以被耦合进50  $\mu\text{m}$ 芯径,数值孔径(NA)0.22的光纤中,考虑到合成输出的半导体激光谱宽为3.24 nm,且合成输出激光中心波长随温度与功率的变化很小,因此可作为高亮度激光抽运源使用。假定耦合效率为85%,那么光纤输出光亮度为31.45 MW/cm<sup>2</sup>-str,与现有的半导体激光器模块化产品相比,输出光束亮度提高了2~10倍。如nLight报道的200  $\mu\text{m}$ 光纤芯径,NA为0.2,输出功率700 W的光纤耦合输出模块,其亮度约为17.7 MW/cm<sup>2</sup>-str。

## 4 结 论

基于光栅-外腔光谱合束技术,利用常规19个发光单元的CM-Bar条进行光谱合束实验,实现了合束单元的有效反馈锁定,较好地抑制了耦合腔对输出光谱及光束质量的影响,通过在光路中设置光阑或狭缝抑制了杂散光的反馈,输出光谱为19个独立的尖峰组成,没有次峰或者毛刺出现,光谱展宽为3.24 nm。在工作电流为70 A时,光栅-外腔光谱合束输出光功率为44.90 W,电光转换效率为36.35%,合束光束快、慢轴方向光参量积分别为1.52 mm·mrad和5.00 mm·mrad,亮度 $B_{\text{diode}}=36.92 \text{ MW/cm}^2\text{-sr}$ 。相比于空间合束、偏振合束等常规的合束方法,光栅-外腔光谱合束技术对半导体激光器输出光束的光束质量和亮度都有很大程度的改善,并且当功率和温度变化时可以保持中心波长高度稳定,同时,光栅-外腔光谱合束技术和空间合束、偏振合束结合实现更高功率的高光束质量半导体激光输出,因此在光纤激光抽运、工业加工或国防领域等方面有着良好的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Stickley C M, Filipkowski M E, Parra E, *et al.*. Super high efficiency diode sources (SHEDS) and architecture for diode high energy laser systems (ADHELs): An overview[J]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2006: TuA1.
- 2 Friedrich Bachmann. Goals and status of the German National Research Initiative BRIOLAS (brilliant diode lasers)[C]. *SPIE*, 2007, 6456: 645608.
- 3 Liu Yang, Cheng Yong, Wang Xiaobing, *et al.*. Spatial coherent measurement of multiple coherent laser combination[C]. *SPIE*, 2011, 6723: 67232G.
- 4 Xin Guofeng, Pi Haoyang, Shen Li, *et al.*. Beam incoherence combination of high power laser diode[J]. *Lasers & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(10): 101404.  
辛国锋,皮浩洋,沈力,等.高功率半导体激光器光束非相干合成技术进展[J].*激光与光电子学进展*, 2010, 47(10): 101404.
- 5 Xin Gao, Hiroyuki Ohashi, Masayuki Saitoh, *et al.*. Beam combining for three high-power laser-diode stacks with a stripe mirror technique[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2004, 43(8B): L1097-L1098.
- 6 Li Libo, Lou Qihong. Spectral combining techniques of fiber lasers[J]. *Lasers & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(10): 37-41.  
李立波,楼祺洪.光纤激光器的谱叠加技术[J].*激光与光电子学进展*, 2006, 43(10): 37-41.
- 7 Tan Hao, Guo Linhui, Gao Songxin, *et al.*. Experimental study on fiber coupling based on polarization folding[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(4): 361-365.  
谭昊,郭林辉,高松信,等.基于偏振折叠的光纤耦合实验研究[J].*激光与红外*, 2014, 44(4): 361-365.
- 8 Tso Yeefan, Antonio Sanchez, Vincenzo Daneu, *et al.*. Laser beam combining for power and brightness scaling[C]. *IEEE*, 2000, 3: 49-54.
- 9 Wei Fang, Chen Dijun, Xin Guofeng, *et al.*. A compact and rugged tunable external cavity diode laser with Littman-Metcalf configuration [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1102012.  
魏芳,陈迪俊,辛国锋,等.紧凑坚固Littman-Metcalf型可调谐外腔半导体激光器[J].*中国激光*, 2013, 40(11): 1102012.
- 10 Xiao Y, Brunet F, Kanskar M, *et al.*. 1-kilowatt CW all-fiber laser oscillator pumped with wavelength-beam-combined diode stacks [J]. *Opt Express*, 2012, 20(30): 3296-3301.
- 11 Zhang Jun, Peng Hangyu, Cao Junsheng, *et al.*. 970 nm hundred-watt level diode laser source by spectral beam combining with external cavity feedback[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1114001.  
张俊,彭航宇,曹军胜,等.970 nm百瓦级半导体激光外腔反馈光谱合束光源[J].*光学学报*, 2013, 33(11): 1114001.
- 12 Zhanda Zhu, Long Gou, Menghua Jiang, *et al.*. High beam quality in two directions and high efficiency output of a diode laser array by spectral-beam-combining[J]. *Opt Express*, 2014, 22(15): 17804-17809.
- 13 Deepak Vijayakumar, Ole Bjarlin, Jensen, *et al.*. Spectral beam combining of a 980 nm tapered diode laser bar[J]. *Opt Express*, 2010, 18(2): 893-898.
- 14 Christof Zink, Nils Werner, Andreas Jechow, *et al.*. Multi-wavelength operation of a single broad area diode laser by spectral beam combining[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2014, 26(3): 253-256.
- 15 Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1980, 16(3): 347-355.

- 16 Du Baoxun. Fundamental of Diode Laser Theory[M]. Beijing: Science Press, 2011. 176–185.  
杜宝勋. 半导体激光器理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 176–185.
- 17 An Honglin, Lin Xiangzhi, Yan Hong, *et al.*. Fiber grating external cavity semiconductor laser with strong optical feedback[J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(12): 1609–1613.  
安宏林, 林祥芝, 闫 宏, 等. 强反馈光纤光栅外腔半导体激光器[J]. 光学学报, 1997, 17(12): 1609–1613.
- 18 Chai Yanjie, Zhang Hanyi, Zhou Bingkun. Line width performance analysis of semiconductor lasers with strong feedback external[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1995, 16(12): 885–889.  
柴燕杰, 张汉一, 周炳琨. 强反馈外腔半导体激光器线宽特性研究[J]. 半导体学报, 1995, 16(12): 885–889.
- 19 Friedrich Bachmann, Peter Loosen, Reinhart Poprawe. High Power Diode Laser: Technology and Applications[M]. Berlin: Springer, 2007.
- 20 International Organization for Standardization. Lasers and Laser-Related Equipment- Test Methods for Laser Beam Widths, Divergence Angles and Beam Propagation Ratios[S]. ISO 11146-1: 2005.

栏目编辑: 宋梅梅