

# 970 nm 百瓦级半导体激光外腔反馈光谱合束光源

张 俊<sup>1,2</sup> 彭航宇<sup>1\*</sup> 曹军胜<sup>1</sup> 王彪<sup>1</sup> 刘云<sup>1</sup> 秦莉<sup>1</sup> 付喜宏<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> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 激光合束是实现高功率半导体激光输出的主要途径, 常规激光合束提高功率时合束激光的光束质量变差。外腔反馈光谱合束技术利用半导体激光振荡与外部光学系统相结合的方式合束, 在提高激光功率的同时, 合束激光的光束质量即为激光单元的光束质量。研制出一种基于透射光栅的 3 个 970 nm 半导体激光线阵的外腔反馈光谱合束光源, 实现连续激光功率为 140.6 W、光束质量为 4.367 mm·mrad 的激光输出, 谱宽为 36.60 nm, 56 个波长峰值与激光单元一一对应, 为获得高光束质量的高功率半导体激光光源提供了可行的方案。

**关键词** 激光器; 半导体激光; 激光合束; 外腔反馈光谱合束; 透射光栅; 光束质量

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1114001

## 970 nm Hundred-Watt Level Diode Laser Source by Spectral Beam Combining with External Cavity Feedback

Zhang Jun<sup>1,2</sup> Peng Hangyu<sup>1</sup> Cao Junsheng<sup>1</sup> Wang Biao<sup>1</sup> Liu Yun<sup>1</sup>  
Qin Li<sup>1</sup> Fu Xihong<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> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Laser combining is the main way to develop the high power diode laser source. Traditional beam combining is used to increase the power but leads to a poor beam quality. Spectral beam combining with external cavity feedback improves the characteristics of the power and the beam quality by the way of combining diode laser oscillation with external optical system. By spectral beam combining with external cavity feedback based on a transmission grating, a diode laser source is developed with a continuous wave power of 140.6 W, a beam quality of 4.367 mm·mrad and a spectrum width of 36.60 nm. The whole spectrum is composed of 56 independent wavelength peaks, each one of which is only corresponding to one of the combining laser units, respectively. A feasible solution to obtain a good beam quality for high power diode laser source is demonstrated.

**Key words** lasers; diode laser; laser beam combining; spectral beam combining with external cavity feedback; transmission grating; beam quality

**OCIS codes** 140.2020; 140.3298; 050.1950

## 1 引 言

半导体激光器具有转换效率高、体积小、重量轻

等显著优点, 但受激光器自身结构导致的单元功率低和光束质量差等缺点的影响, 严重限制了半导体

收稿日期: 2013-04-15; 收到修改稿日期: 2013-07-02

基金项目: 国家 863 计划(2012AA040210)、吉林省科技厅项目(20112106, 20116011)、国家自然科学基金(61176045)、长吉图专项(2011CJT0003)

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: imphy@163.com

激光器作为直接光源在工业和国防领域的应用。半导体激光合束技术是近年来的研究热点,它将多个单元光束耦合成一束,实现高功率激光输出<sup>[1]</sup>。基于该技术的高功率半导体激光光源已作为直接光源小范围应用在工业领域,如激光熔覆、表面处理等对激光光束质量和功率密度要求较低场合<sup>[2-3]</sup>。受限于常规激光合束机理,空间合束在增加功率的同时,整体光束质量降低,偏振合束和波长合束增加激光功率时不改变光束质量,但提高倍数有限;另外经过合束后的半导体激光光源的光束质量一般远差于单个激光单元的光束质量<sup>[4-5]</sup>。在诸如激光深熔焊、激光切割等对激光性能要求高的场合,还亟需具备更高光束质量和功率密度的半导体激光光源。

光谱合束(SBC)技术被证明是提高半导体激光光束质量的有效技术之一<sup>[6-13]</sup>,它结合半导体激光内部振荡与外部光学系统,每个激光单元振荡波长均与外部光栅色散和外腔反馈匹配,以保持近场和远场相重合的方式输出,实现合束光束质量与激光单元保持一致,合束功率为所有激光单元功率的总和。因此只要激光单元具有高光束质量,光谱合束高功率半导体激光光源也可实现近衍射极限的高功率激光输出<sup>[8]</sup>。目前国际上报道的外腔反馈光谱合束光源均是基于反射式衍射光栅<sup>[6-13]</sup>,由于合束机理和空间限制,该合束结构的激光在光栅处的入射角和衍射角均偏离 Littrow 角,合束效率受到影响<sup>[14]</sup>,同时合束的激光单元不宜过多。在此基础上,提出了基于透射光栅的外腔光谱合束结构,并已经实现了 800 nm 和 970 nm 的单个激光线阵合束结构<sup>[15-16]</sup>。为了进一步提高输出功率,在光谱合束方向增加合束的激光单元数量,设计并搭建了 3 个激光线阵共 57 个激光单元进行光谱合束的结构,实现连续功率为 140.6 W、光束质量为 4.367 mm·mrad 的激光输出。

## 2 半导体激光外腔反馈光谱合束光源的理论设计

### 2.1 基于透射光栅的外腔反馈光谱合束原理

基于透射光栅的外腔光谱合束结构如图 1 所示,每个激光单元的后腔面与外腔镜组成各自独立的谐振腔,通过共同的光栅和外腔镜作用,使得各个激光单元在外腔镜处以近场和远场相重合的方式谐振输出。为了减小腔内其他耦合腔效应,腔内的光学元件及激光单元的前腔面均镀增透膜。

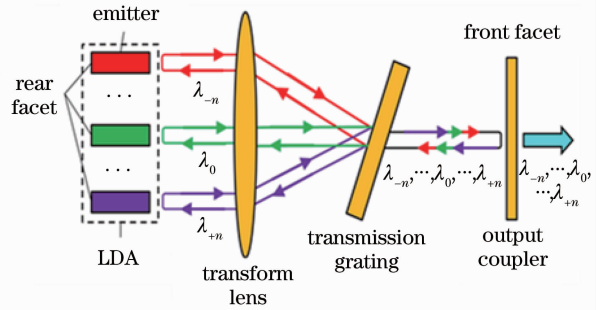


图 1 基于透射光栅的外腔反馈光谱合束基本结构

Fig. 1 Basic sketch of SBC with external cavity feedback based on transmission grating

由于只有垂直入射到外腔镜并能够反馈回到原出射激光单元的波长才能起振,则腔内的每个激光波长均满足透射光栅的光栅方程,且所有起振激光波长在光栅上具有相同的衍射角,衍射光栅上的入射光和衍射光均满足光栅方程

$$m\lambda_i = \Lambda(\sin \theta_i + \sin \theta_d), \quad (1)$$

式中对于透射式一阶衍射光栅,  $m = -1$ ,  $\theta_i$  为光栅入射角,  $\theta_d$  为光栅衍射角,  $\lambda_i$  为不同位置的起振波长,  $\Lambda$  为光栅周期。

当  $\theta_i = \theta_d = \theta_{\text{Littrow}}$  时,光栅获得最佳衍射效率,

$$\theta_{\text{Littrow}} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2 \cdot \Lambda}\right). \quad (2)$$

激光单元的起振波长是由该单元在光栅上的入射角、衍射角和光栅色散共同决定的,其中心沿光轴方向输出光线(主光线)经变换透镜作用后入射到光栅的等效光路如图 2 所示,其中激光单元和透射光栅分别位于变换透镜的前后焦平面。

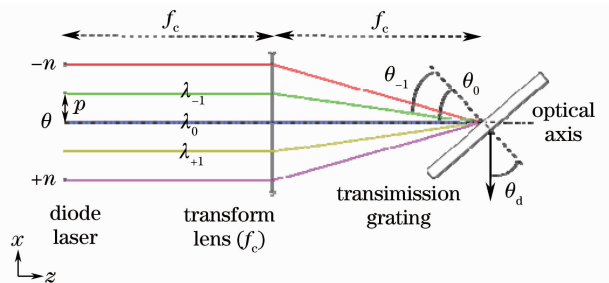


图 2 光谱合束方向各激光单元主光线入射到光栅上的等效光路

Fig. 2 Equivalent optical path of primary laser beam incident on grating in the direction of SBC

为了获得最佳合束效率,以中间激光单元的光栅入射角  $\theta_0 = \theta_{\text{Littrow}}$ ,则其衍射角为  $\theta_{\text{Littrow}}$ ,又由于所有激光单元具有相同衍射角,因此共同的衍射角  $\theta_d = \theta_{\text{Littrow}}$ 。

根据几何关系,激光单元  $i$  的光栅入射角

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

式中  $p$  为光谱合束方向空间间隔,  $f_c$  为变换透镜焦距, 则第  $i$  个激光单元起振的中心波长为

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

式中  $i = -n, -(n-1), \dots, -1, 0, +1, \dots, +(n-1), +n$ 。

相邻激光单元之间的波长间隔  $\Delta\lambda_i$

$$\Delta\lambda_i = \lambda_{i+1} - \lambda_i = \Lambda \cdot \left\{ \sin \left[ \theta_{\text{Littrow}} + \arctan \frac{(i+1) \cdot p}{f_c} \right] - \sin \left( \theta_{\text{Littrow}} + \arctan \frac{i \cdot p}{f_c} \right) \right\}. \quad (5)$$

当  $f_c$  远大于  $ip$  时, 即变换透镜焦距远大于光谱合束方向的激光出光尺寸,  $\arctan \frac{(i+1) \cdot p}{f_c} = \frac{(i+1) \cdot p}{f_c}$ ,  $\arctan \frac{i \cdot p}{f_c} = \frac{i \cdot p}{f_c}$ , 波长间隔  $\Delta\lambda_i$  变为

$$\Delta\lambda_i = \frac{\Lambda \cdot p}{f_c} \cos \theta_{\text{Littrow}}. \quad (6)$$

由(6)式, 相邻激光单元的波长间隔为常数, 即激光波长沿光谱合束方向呈线性变化, 此时各个激光单元的起振波长为

$$\lambda_i = \lambda_0 + i \cdot \Delta\lambda_0 = \lambda_0 + i \frac{\Lambda \cdot p}{f_c} \cos \theta_{\text{Littrow}}. \quad (7)$$

在光栅一定的条件下, 当变换透镜焦距  $f_c$  越大, 相邻激光单元之间在光谱合束方向的空间间隔  $p$  越小时, 相邻激光单元的波长间隔越小, 对应额定谱宽范围内合束的激光单元越多, 输出功率和功率密度也就越大。

## 2.2 半导体激光外腔反馈光谱合束光源的实验设计

实验采用 3 个 970 nm 激光线阵进行光谱合束, 每个激光单元的参数如表 1 所示, 阈值电流为 10 A, 斜率效率为 0.9 W/A。当电流为 25 A 时, 输出功率为 13.5 W, 光谱呈单峰, 中心波长为 970 nm, 95% 能量光谱宽度为 6.6 nm, 如图 3 所示。

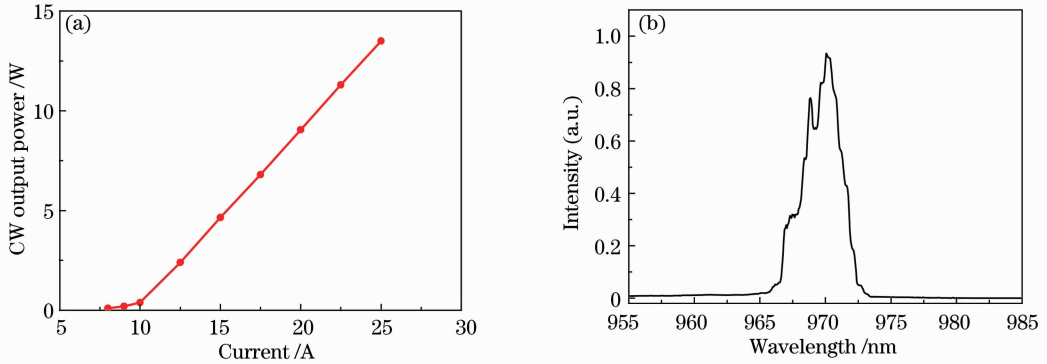


图 3 970 nm 半导体激光线阵(a)直接输出功率和(b)光谱曲线

Fig. 3 Curves of (a) output power versus current and (b) spectrum of 970 nm diode laser bar at free running

表 1 970 nm 半导体激光线阵结构参数

Table 1 Structure parameters of 970 nm diode laser bar

Parameter	Value
Wavelength /nm	970
Chip width /mm	10
Cavity length /mm	2
Number of emitters	19
Emitter pitch / $\mu\text{m}$	500
Emitter width / $\mu\text{m}$	100
$\theta_{\text{slow}}$ (95% power content) /( $^{\circ}$ )	7
$\theta_{\text{fast}}$ (95% power content) /( $^{\circ}$ )	45
Front facet reflectivity of bar	<1%
Rear facet reflectivity of bar	95%
Polarization	TE

半导体激光器的光束质量一般采用光参量积  $Q$  来评价, 定义为束腰半径  $w_0$  与远场发散半角  $\theta/2$  的乘积<sup>[1]</sup>, 即

$$Q = w_0 \cdot \theta/2. \quad (8)$$

$Q$  值越小, 光束质量越好。根据标准 ISO 11146-2005<sup>[17]</sup>, 本文光斑尺寸及发散角均采用二阶矩法来评价。

由于半导体激光输出在平行于外延层的慢轴方向和垂直于外延层的快轴的  $Q$  值差别大, 整体光束质量的评价采用快慢轴方向光束质量的均方根值, 即两轴光束质量的对角线值<sup>[1]</sup>, 即

$$Q_{\text{total}} = \sqrt{Q_{\text{fast}}^2 + Q_{\text{slow}}^2}. \quad (9)$$

为了实现光谱合束方向 ( $X$ ) 排列, 3 个激光线

阵 A、B 和 C 固定在同一高度的平板上,各自经过快慢轴准直后,再由与之对应的反射镜将光路偏折 90°,由于反射镜在 X 方向错开一个空间周期  $t$  的位置,则形成 3 个激光线阵光斑在 X 方向排列,相邻光斑之间的间隔  $\Delta s$  由反射镜在 X 方向的位置决定,如图 4 所示。

为了让所有激光均通过,间隔  $\Delta s$  不宜过小,而若间隔过大,在光谱合束时,中间的空位也占据相应光谱,使得这部分光谱不能被光谱合束所用,因此  $\Delta s$  应选取合适参数。实验中  $\Delta s$  选为 2 mm,而单个线阵光斑在 X 方向的光斑尺寸  $s$  为 10 mm,则激光线阵单元的空间周期  $t$  为 12 mm,整个光斑尺寸  $u$  为 34 mm,实际共有 57 个激光单元参与光谱合束,

考虑到中间的空间间隔,相当于有 69 个激光单元,如图 5 所示,其中  $B_0$  位于整个合束光斑中心,两侧激光单元分别为  $C_{-9}$  和  $A_{+9}$ 。

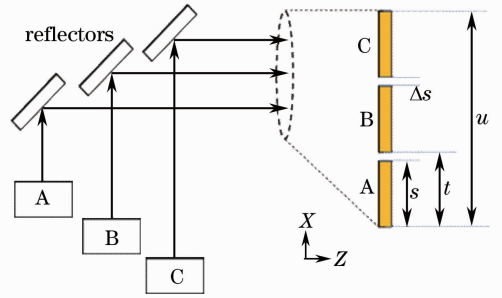


图 4 3 个激光线阵在光谱合束方向的空间合束示意图  
Fig. 4 Sketch of spatial coupling of three diode laser bars in the direction of SBC

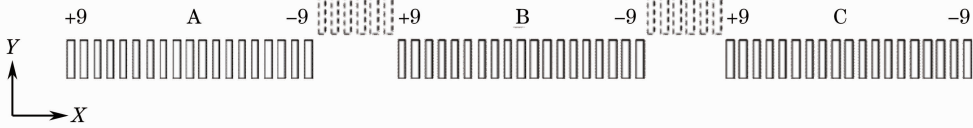


图 5 激光单元在光谱合束方向的排列方式及位置对应关系

Fig. 5 Relationship between arrangement and position of laser emitters in the direction of SBC

所采用透射光栅线数为 1600 line/mm,设计波长为 966 nm,在 930~1010 nm 激光波段,S 线偏振光的一级衍射效率大于 94%,如图 6 所示,光栅的有效口径为 20 mm×10 mm,Littrow 角为 50.6°。

所示,由于变换透镜焦距为 400 mm,合束光斑和透射光栅分别位于其前焦平面和后焦平面上,使得两者之间的距离就达到 800 mm,再加上合束光路和外腔镜与光栅之间的距离,从激光线阵到外腔镜,整个合束光路长度超过 1 m。为了使外腔反馈光形成有效起振光,外腔镜的反射率选用 20%。

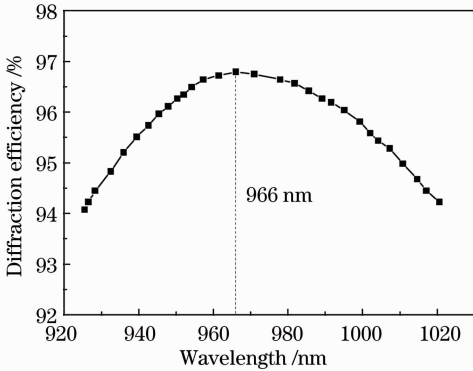


图 6 透射光栅的 -1 级衍射效率曲线

Fig. 6 Curve of -1 order diffraction efficiency of transmission grating

为了使各个激光波长以 Littrow 角衍射起振,透射光栅与外腔镜的夹角保持在 50.6°。

变换透镜焦距选用 400 mm,以  $B_0$  激光单元与合束结构的光轴对准,根据(4)式和(6)式可知, $C_{-9}$  激光单元的激光波长为 948.72 nm, $A_{+9}$  的激光波长为 982.41 nm,则整个激光谱宽为 33.69 nm,相邻激光单元的波长间隔约为 0.5 nm。

3 个半导体激光线阵光谱合束的实验装置如图 7

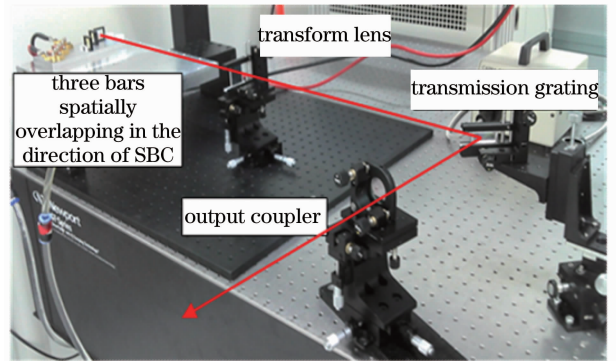


图 7 3 个 970 nm 激光线阵进行光谱合束的实验装置图  
Fig. 7 Experimental setup of SBC with three 970 nm diode laser bars

### 3 半导体激光外腔反馈光谱合束光源的实验结果及分析

光谱合束是否成功直接体现在各个激光单元波长锁定上。采用 ANDO AQ6317 光纤光谱仪测量 3 个激光线阵经过光谱合束后的光谱,如图 8 所示,出

现 3 个间隔分明的波段,每个波段内包含 19 个波长峰值(其中中间有一个激光单元损坏),结合光谱合束结构可知,每个波段对应一个激光线阵,波段内的每个波长峰值对应线阵上的一个激光单元。每个波长峰值非常锐利,且无多余的次峰存在,说明每个激光单元均被有效反馈,且波长锁定非常好。另外根据光栅方程,可确定激光线阵 A 输出波长偏向于长波,激光线阵 C 输出波长偏向于短波。

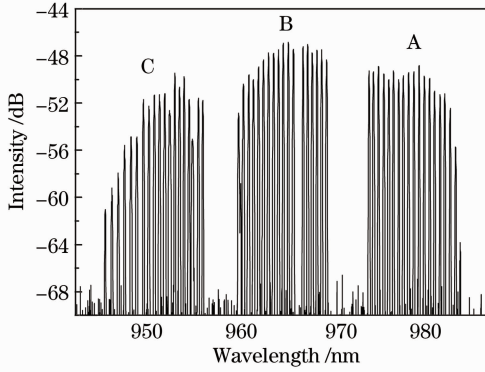


图 8 3 个 970 nm 激光线阵光谱合束后的输出光谱  
Fig. 8 Spectrum of three 970 nm diode laser bars after SBC

由图 8 可知, C<sub>-9</sub> 激光单元峰值波长为 945.611 nm, A<sub>+9</sub> 激光单元的峰值波长为 982.209 nm, 整个激光光谱宽为 36.60 nm, 比理论设计的 33.69 nm 大 3.09 nm。另外整个激光光谱中心波长为 963 nm, 较之设计波长 966 nm 偏移 3 nm。单个激光线阵 C、B 和 A 的谱宽分别为 10.053、9.079、9.397 nm, 比理论设计谱宽 9.250、8.924、8.572 nm 更大, 增量分别为 0.803、0.155、0.825 nm。为了分析上述现象, 在图 9 中给出激光峰值波长随位置变化关系, 并与理论设计值对比, 在长波方向重合好, 在短波方向两者完全分开。

进一步分析, 理论波长峰值和实测波长峰值的差值随位置的变化如图 10 所示, B 的差值  $\Delta\lambda_{Bi}$  随位置变化近似为常数, 实测值比理论值偏大 2 nm; A 的差值随位置变化近似呈线性变化, 斜率为  $-0.044$  nm; C 的差值随位置变化呈现弯曲状。可推测出以下特征。

1) 线阵 B: 根据光栅方程, 当衍射角偏离设计值  $\Delta\theta_B$  而入射角  $\theta_i$  与理论设计相等时, 激光单元的振荡波长  $\lambda_{Bi}$  及波长差值  $\Delta\lambda_{Bi}$  分别为

$$\lambda_{Bi} = \Lambda \cdot [\sin \theta_i + \sin(\theta_d + \Delta\theta_B)], \quad (10)$$

$$\Delta\lambda_{Bi} = \Lambda \cdot [\sin(\theta_d + \Delta\theta_B) - \sin \theta_d] = C. \quad (11)$$

此时波长差值  $\Delta\lambda_{Bi}$  不随位置变化为常数, 因此由线

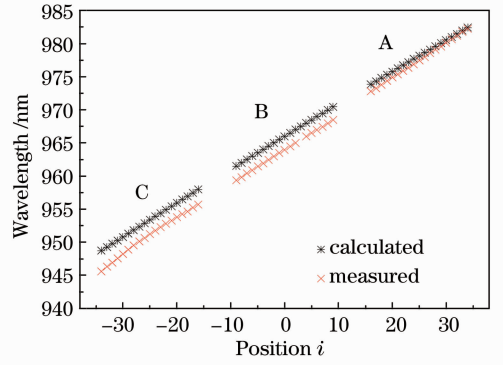


图 9 3 个 970 nm 激光线阵激光波长与激光单元位置关系

Fig. 9 Relationship between wavelength and position of three 970 nm diode laser bars

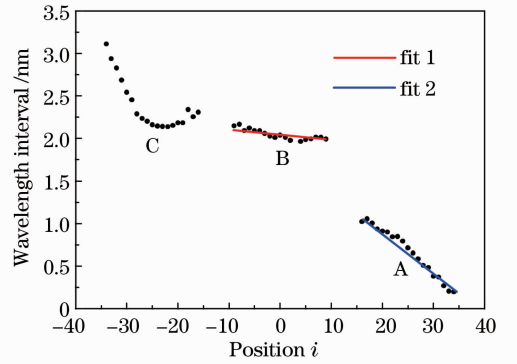


图 10 理论波长与实测波长差值与激光单元位置关系  
Fig. 10 Relationship between wavelength interval and position of three 970 nm diode laser bars

阵 B 波长整体偏大, 判断出光栅与外腔镜的夹角偏大  $0.3^\circ$ , 并由此推测出变换透镜与理想位置相符。

2) 线阵 A:  $\Delta\lambda_{Ai}$  呈线性变化, 说明是由于激光线阵 A 的光栅入射角整体偏离设定值  $\Delta\theta_{Ai}$ , 此时激光单元的振荡波长  $\lambda_{Ai}$  及波长间隔变化  $\Delta\lambda_{Ai}$  为

$$\lambda_{Ai} = \Lambda \cdot [\sin(\theta_i + \Delta\theta_{Ai}) + \sin(\theta_d + \Delta\theta_B)], \quad (12)$$

$$\Delta\lambda_{Ai} = 2 \cdot \Lambda \cos\left(\theta_i + \frac{\Delta\theta_{Ai}}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\theta_{Ai}}{2}\right) + C. \quad (13)$$

当  $\Delta\theta_{Ai}$  远小于  $\theta_i$  时, 波长间隔为

$$\Delta\lambda_{Ai} = \Lambda \cdot \Delta\theta_{Ai} \cos \theta_i + C. \quad (14)$$

当激光线阵 A 与激光线阵 B 指向一致, 仅在 X 方向离轴  $\Delta L$  时,  $\Delta\theta_{Ai}$  为常数, 波长间隔  $\Delta\lambda_{Ai}$  仅为  $\cos \theta_i$  的函数; 若激光线阵 A 与激光线阵 B 指向不一致,  $\Delta\theta_{Ai}$  与入射角  $\theta_i$  有关, 此时  $\Delta\lambda_{Ai}$  为  $\Delta\theta_{Ai} \cos \theta_i$  的函数。因此激光线阵 A 波长变化可能由于偏轴或者指向偏离造成。

3) 线阵 C: 除了整体偏轴外, 激光单元之间的输出指向也不同, 这可能是由于自身的 Smile 效应引起的。

采用 Ophir FL500A 功率计测量光谱合束后输出功率,如图 11 所示。阈值电流由 10 A 降至 6 A,斜率效率为 0.73 W/A;当电流为 72.5 A 时,测得连续功率为 140.6 W,相对于参考文献[13]单个激光线阵(50.8 W),数值叠加 3 个激光线阵的 152.4 W 而言,输出功率少 11.8 W。可能原因如下。1)相对于单线阵起振谱宽,3 线阵的激光光谱更宽,两侧边缘的起振波长偏离激光线阵材料增益和光栅最佳衍射效率,致使合束后的功率减小,在图 8 中可明显看到在激光线阵 C 短波和激光线阵 A 长波增益小于中间 B;2)B 有一个激光单元损坏,直接损失约 2.5 W 功率;3)激光光路过长,使得有效反馈到原激光单元的光功率比例减小。

采用 Primes Focus Monitor 光束质量分析仪测量光谱合束后整体光束质量如图 12 所示,电流为 40 A 时光束质量为 4.367 mm·mrad,大于单个激光单元的光束质量 3.055 mm·mrad,光束质量变差可能是由于激光线阵 A 和激光线阵 C 的指向偏离

Y 方向,使得激光单元在光栅处不重合,整体光斑偏大;也可能是变换透镜像差的影响,合束激光光斑尺寸达到 34 mm,平凸透镜作为变换透镜不足以获得好的像质,选用像质校正好的变换透镜可提高整体光束质量。

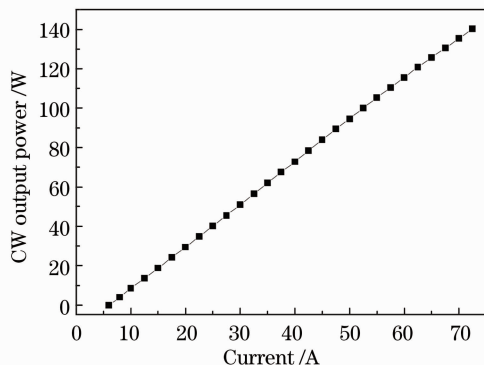


图 11 3 个激光线阵光谱合束后连续输出功率  
Fig. 11 Curve of CW output power versus current of three 970 nm diode laser bars after SBC

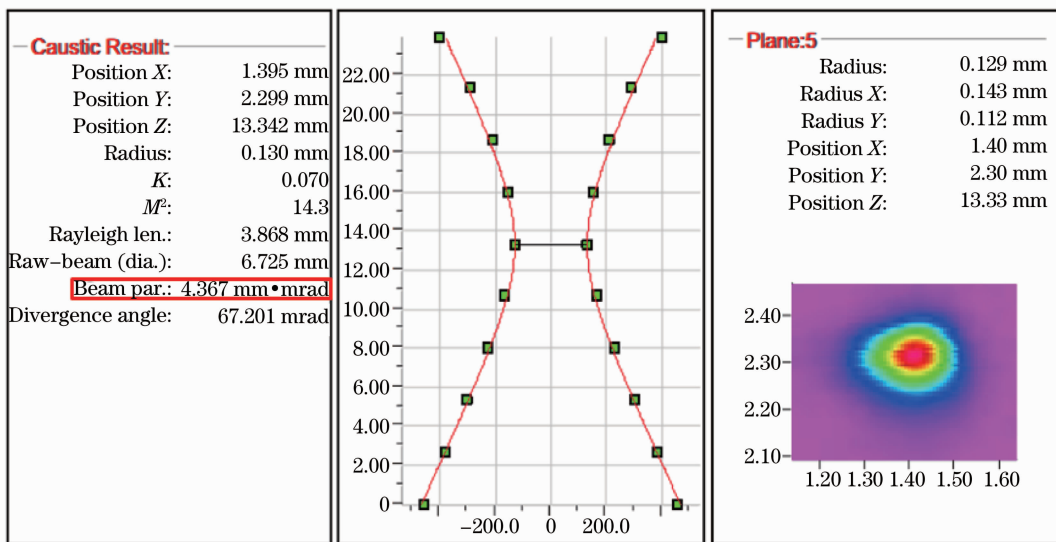


图 12 I=40 A 时 3 个激光线阵光谱合束后输出光束质量  
Fig. 12 Beam quality of three 970 nm diode laser bars after SBC at I=40 A

## 4 结 论

在光谱合束方向排列 3 个激光线阵,实现 56 个激光单元的波长锁定和光谱合束,在增加激光功率的同时,合束激光光束质量与单个激光单元的光束质量接近,研制出连续功率为 140.6 W、光束质量为 4.367 mm·mrad 的半导体激光合束光源。为进一步提高激光功率和改善光束质量,还需进行如下 3 方

面改进:

1) 进一步减小相邻激光单元的波长间隔,在额定波长范围内增加合束激光单元的数量,以提高输出功率。本文波长间隔约为 0.5 nm,合束 3 个激光线阵时整体谱宽已达到 36 nm,在高功率半导体激光谱宽范围内,合束激光单元的数量和功率提高有限。若通过选择长焦距变换透镜实现,则体积、装调难度和有效反馈量将成为影响合束光源可靠性及工

业化生产的限制因素,因此必须通过其他方式来减小合束激光单元的波长间隔,如减小激光单元之间的空间间隔。

2) 合束激光的光束质量和单个激光单元光束质量还有一定差距,须对变换透镜、衍射光栅等元件的参数和特性作进一步研究,以获得与激光单元相同的光束质量输出。

3) 发展具有高光束质量的高功率激光单元,如锥形激光器。尽管光谱合束可以实现单个激光单元光束质量的激光输出,但是目前大功率半导体激光器件采用宽条区结构,其本身光束质量约为衍射极限的 10 倍,即使光谱合束达到单元光束质量水平,仍难以获得近衍射极限激光输出,因此发展具有高光束质量的高功率激光单元是获得高功率高光束质量半导体激光光源的根本。

光谱合束技术的引入,使得高功率半导体激光的光束质量实现了大的提高,基于该技术的半导体激光光源能够适用于激光深熔焊、激光切割等对功率、光束质量及功率密度均要求很高的场合。随着半导体激光光源作为直接光源在工业加工领域的不断深入,结合其高效率、长寿命等优点,新一代高效节能绿色半导体激光加工机必将在未来的加工领域大放异彩。

### 参 考 文 献

- 1 F Bachmann, P Loosen, R Poprawe. High Power Diode Lasers Technology and Applications [M]. New York: Springer, 2007. 142-147.
- 2 F Bachmann. Industrial applications of high power diode lasers in materials processing [J]. Applied Surface Science, 2003, 208-209: 125-136.
- 3 F Bachmann. Present technology, industrial applications and future prospects of high power diode lasers [C]. SPIE, 2002, 4762: 1-15.
- 4 Zhang Jun, Peng Hangyu, Liu Yun, *et al.*. High brightness diode laser source based on three-wavelength multiplexing [J].

- Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402011.
- 张俊, 彭航宇, 刘云, 等. 三波长合束高亮度半导体激光光源[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402011.
- 5 Zhang Jun, Shan Xiaonan, Liu Yun, *et al.*. Kilowatt-output and 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.
- 6 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.
- 7 R K Huang, B Chann, J 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.
- 8 J Hecht. Direct laser diodes: making direct laser diodes shine more brightly [J]. Laser Focus World, 2012, 48(6):
- 9 R K Huang, B Chann, L J Missaggia, *et al.*. High-brightness wavelength beam combined semiconductor laser diode arrays [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(4): 209-211.
- 10 B Chann, A K Goyal, T Y Fan, *et al.*. Efficient, high-brightness wavelength-beam-combined commercial off-the-shelf diode stacks achieved by use of a wavelength-chirped volume Bragg grating [J]. Opt Lett, 2006, 31(9): 1253-1255.
- 11 S D Roh, D M Grasso, J A Small. Very high brightness, fiber coupled diode lasers [C]. SPIE, 2009, 7198: 71980Y.
- 12 C Hamilton, S Tidwell, D Meekhof, *et al.*. High power laser source with spectrally beam combined diode laser bars [C]. SPIE, 2004, 5336: 1-10.
- 13 D Vijayakumar, O B Jensena, R Ostendorf, *et al.*. Spectral beam combining of a 980 nm tapered diode laser bar [J]. Opt Express, 2010, 18(2): 893-898.
- 14 E G Loewen, M Nevière, D Maystre. Grating efficiency theory as it applies to blazed and holographic gratings [J]. Appl Opt, 1977, 16(10): 2711-2721.
- 15 Zhang Jun, Peng Hangyu, Fu Xihong, *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.
- 16 Peng Hangyu, Zhang Jun, Fu Xihong, *et al.*. High-efficiency spectral-beam-combined diode arrays [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702015.
- 彭航宇, 张俊, 付喜宏. 高效外腔反馈光谱合束半导体激光器阵列[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702015.
- 17 ISO. 11146-2005. Lasers and Laser-Related Equipment: Test Methods for Laser Beam Widths, Divergence Angles and Beam Propagation Ratios [S]. Geneva: International Organization of Standardization, 2005.

栏目编辑: 宋梅梅