

# 半导体激光阵列光谱合束技术中变换透镜的研究

郝明明<sup>1,2</sup> 朱洪波<sup>1,2</sup> 秦 莉<sup>1</sup> 王立军<sup>1</sup> 刘 云<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激发态物理实验室, 吉林 长春 130033)

<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 利用光栅-外腔的方法对半导体激光阵列(LDA)进行光谱合束时常采用平凸或双凸柱透镜作为变换透镜,然而它会导致外腔的反馈效率低下,经研究发现 LDA 轴上发光单元的反馈效率为 80.5%,对于边缘发光单元甚至降到了 49.7%。针对该问题提出了采用双分离柱透镜作为变换透镜,从而可以提高外腔的反馈效率。将传统 LDA 光谱合束光路展开,并利用 Zemax 画出它的等效光路,以此来求出平凸变换透镜 LDA 每个发光单元的反馈效率;根据像差理论分析了平凸变换透镜的成像特点,发现平凸变换透镜的球差和慧差较大,需要对其进行矫正;根据初级像差理论,利用 PW 法设计了双分离变换透镜,并利用 Zemax 进行了优化。结果发现,优化后双分离变换透镜可以使 10 mm 宽 LDA 发光单元的反馈效率达到 94.2%以上。研究结果表明使用双分离变换透镜法可提高光谱合束效率。

**关键词** 激光技术;半导体激光阵列;光谱合束技术;变换透镜;像差;反馈效率;耦合效率

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0302006

## Research on Transform Lens in Spectral Beam Combination for Laser Diode Array

Hao Mingming<sup>1,2</sup> Zhu Hongbo<sup>1,2</sup> Qin Li<sup>1</sup> Wang Lijun<sup>1</sup> Liu Yun<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>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Plane-convex lens or bi-convex lens are commonly used as transform lens while the beam of laser diode array (LDA) is spectrally combined by grating-external cavity method. However, the feedback efficiency of external cavity is rather low for each emitter. For example, feedback efficiency for on-axis emitter is just 80.5% and even decreases to 49.7% for edge emitter. In order to solve the problem, a method that discretely doublet lenses are applied as transform lenses to enhance the feedback efficiency. An equivalent optical setup of traditional spectrally beam combination for LDA is drawn and studied by Zemax optical software. At the same time, feedback efficiency of each emitter will be computed. The imaging characteristic of plane-convex lens is learned by aberration theory and the fact that spherical aberration and coma of plane-convex lens are relative large, which will decrease the feedback efficiency. Furthermore according to primary aberration theory, a discretely doublet is designed by PW method and the doublet is also optimized by Zemax. The feedback efficiency of each LDA emitter whose width is 10 mm is more than 94.2% by using optimized doublet, which is dramatically larger than that of plane-convex lens. The results show that the method is helpful for increasing the coupling efficiency of LDA.

**Key words** laser technique; laser diode array; spectral beam combination; transform lens; aberration; coupling efficiency; feedback efficiency

**OCIS codes** 140.2010; 140.3298; 140.3325

收稿日期: 2011-10-19; 收到修改稿日期: 2011-11-25

基金项目: 吉林省科技厅项目(102DGG001,20112106)资助课题。

作者简介: 郝明明(1984—),男,博士研究生,主要从事大功率半导体激光阵列的光纤耦合及应用等方面的研究。

E-mail: ciomp2007@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器及其应用等方面的研究。

E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: hs5252@sohu.com

# 1 引 言

由于半导体激光阵列(LDA)在电光转换效率、出光功率、可靠性、成本及体积等方面具有的优势,它已经越来越广泛地直接应用于材料加工、医疗及军事等领域<sup>[1~4]</sup>。然而,和其他激光器相比,LDA最大的缺点就是光束质量差,这限制了它的应用范围。高功率全光纤结构光纤激光器抽运源需求的日益增长,更是促进了光纤输出大功率半导体激光器功率的增长<sup>[5]</sup>。半导体激光光纤耦合的实现也取决于光束质量的提高。

自从1999年麻省理工大学 Lincoln 实验室<sup>[6]</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(SBC)以来,该方法受到极大地重视和关注,因为它可以使 LDA 在慢轴方向合束后的光束质量和每个发光单元相同。目前国内外科研人员对光栅-外腔光谱合束技术进行了大量的研究,研究目标主要集中在增加激光单元个数、提高光束质量和合束效率(本文中合束效率指的是在同样电流下,LDA 光谱合束后出光功率同相同的 LDA 腔面镀一定反射率膜后出光功率的比值)。Tidwell 等<sup>[7]</sup>利用 SBC 技术将两个相邻的,宽度为10 mm的 LDA(共计 200 个发光单元)进行光谱合束,得到了光束  $M^2 < 1.5$ ,合束效率大于 70%的结果。Huang 等<sup>[8]</sup>利用 SBC 技术将1040 W的激光耦合到芯径200  $\mu\text{m}$ ,数值孔径 0.18 的光纤中,它可以切割 6.5 mm 厚的钢板。近年来,国内科研人员也对如何提高合束效率进行了理论和实验方面的研究<sup>[9~11]</sup>。

以上研究发现,提高 SBC 合束效率的途径主要包括:1) 提高闪耀光栅的衍射效率;2) 增加 LDA 出光端面的透射率,一般需要大于 99%;3) 优化输出镜的反射率,太高的反射率会导致合束效率低下,而太低的反射率则导致波长锁定失败。然而人们对变换透镜的研究较少,事实上变换透镜的轴外像差强烈地影响着外腔的性能:一方面像差会使反馈到发光单元的光斑变大,使部分光无法反馈到发光单元,从而造成反馈效率降低;另一方面像差会使部分反馈光进入到相邻的单元中,从而影响了相邻发光单元的波长稳定。为解决这个问题,有文献报道使用 Schmidt 激光外腔来进行阵列的光谱合束。可是该结构会使光束质量在一定程度上有所下降<sup>[12]</sup>。因此,本文拟利用多片透镜矫正离轴像差来提高合束效率。

# 2 光栅-外腔光谱合束技术

## 2.1 LDA 光栅-外腔光谱合束技术的原理

图 1 为 LDA 光谱合束技术的光学原理图,它是由 LDA、快轴准直镜(FAC)、变换透镜、闪耀光栅和输出镜组成<sup>[13]</sup>。FAC 的作用是把 LDA 快轴方向的发散角压缩到几个毫弧度。LDA 和闪耀光栅分别位于变换透镜的前后焦平面上,所以 LDA 上第  $i$  个发光单元的激光经过变换透镜后成为一束平行光,但是和光轴有一定倾角  $\theta_i$ ,其大小可表示为

$$\theta_i = \arctan(x_i/f_T), \quad (1)$$

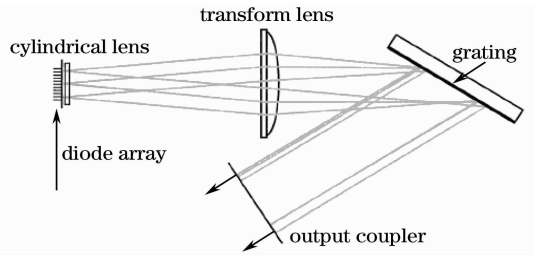


图 1 LDA 的光栅-外腔光谱合束技术光学原理图

Fig. 1 Optical setup of grating-external cavity spectrally beam combined LDA

式中  $x_i$  为第  $i$  个发光单元到光轴的距离,  $f_T$  为变换透镜的焦距。根据光栅方程,闪耀光栅按照波长将光束以一定角度分开。只有那些衍射后同输出镜垂直的光束对应的波长才能被反馈回到第  $i$  个发光单元,根据模式竞争理论第  $i$  个发光单元的波长将锁定在  $\lambda_i$ ,该波长  $\lambda_i$  可表示为

$$\lambda_i = d_g (\sin \alpha_i + \sin \beta), \quad (2)$$

式中  $d_g$  为光栅常数,  $\alpha_i$  为每个发光单元对应光束的光栅入射角,  $\beta$  为衍射角。所以,变换透镜和光栅将所有 LDA 发光单元出射的激光在近场和远场都迭加起来,达到了提高光束质量的目的。

为了研究变换透镜像差对合束效率的影响,假设衍射光栅的衍射效率和输出镜的反射率均为 100%;此时反馈到发光单元出光孔径内的光功率  $P_f$  同该发光单元出光功率  $P_o$  的比值定义为反馈效率  $\eta$ ,即

$$\eta = P_f/P_o. \quad (3)$$

反馈效率定义的提出量化了像差对合束效率的影响。

## 2.2 LDA 光栅-外腔光谱合束的等效光路

图 2 是在 Zemax 非序列模式下图 1 的等效光路,为方便起见,图 2 中只画出了 LDA 边缘发光单元的光线。该图中两个变换透镜实际上是同一个透镜,第二个透镜及其后面的光路其实是将从输出镜

反馈后的光路展开并把光轴拉直。探测器位于第二变换透镜的像方焦平面上,其位置和发光单元相对应,大小则同发光单元的慢轴光斑尺寸相同。若图1中变换透镜距离闪耀光栅的距离为 $d$ ,则图2中两个变换透镜的距离为 $2f_T+2d$ 。设置LDA功率为 $P_0$ ,光线追迹后得到探测面上的光功率为 $P_i$ ,从而可得到反馈效率。

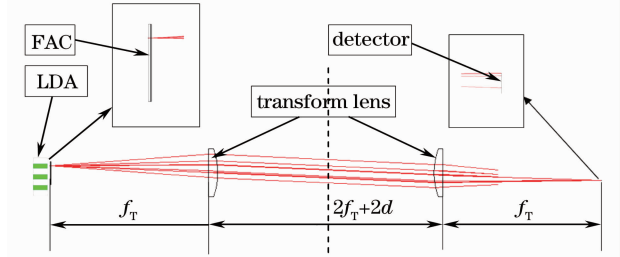


图2 LDA光谱合束技术的等效光路

Fig. 2 Equivalent optical setup of spectrally beam combined LDA

### 3 平凸变换透镜

#### 3.1 平凸变换透镜的反馈效率

设LDA是由19个发光单元组成,周期为 $500\ \mu\text{m}$ ,中心发光单元位于光轴上。按照典型LDA的参数进行设置:快轴发散角为 $70^\circ(1/e^2)$ ,快轴高斯因子设定为1,该方向光斑尺寸为 $1\ \mu\text{m}$ ;慢轴方向发散角为 $10^\circ(1/e^2)$ ,高斯因子设定为 $2^{[14]}$ ,该方

向光斑尺寸为 $100\ \mu\text{m}$ 。设 $d=50\ \text{mm}$ ,则通过图2所示光路可得LDA中每个发光单元的反馈效率。如图3所示,中心发光单元反馈效率最高,大小为 $80.5\%$ ;随着偏离发光单元距离 $x_i$ 的增加,一开始反馈效率下降比较缓慢,但快到边缘发光单元时,反馈效率迅速下降,边缘发光单元反馈效率甚至降到了 $49.7\%$ 。低的反馈效率需要输出镜具有高的反射率,势必降低了合束效率。

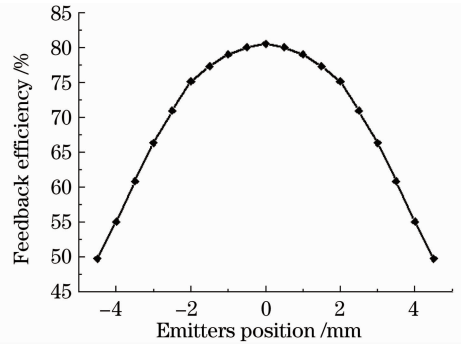


图3 LDA光谱合束技术中反馈效率和各发光单元位置的关系

Fig. 3 Relationship between each emitter feedback efficiency and their position in spectrally beam combined LDA

#### 3.2 平凸变换透镜的像差分析

利用Zemax光学设计软件对等效光路的像差进行分析,得到图4的像差曲线,其中图4(a)为球差曲线,图4(b)为场曲及畸变,图4(c)则为点列图。

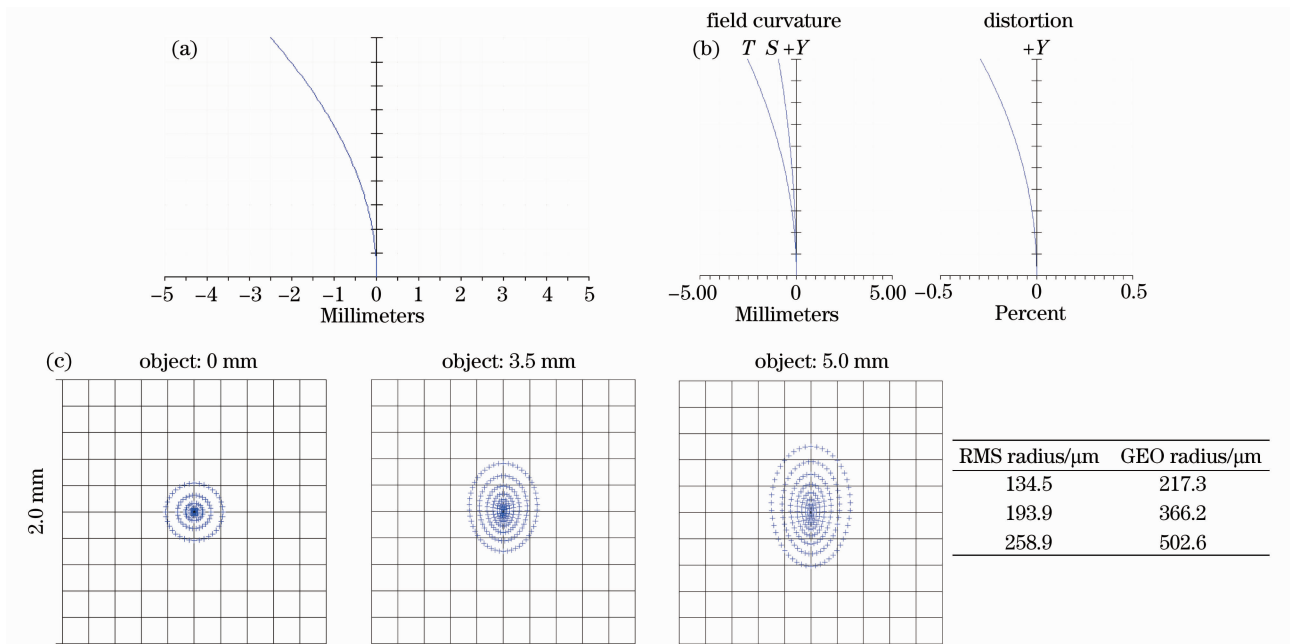


图4 平凸变换透镜的像差分析图。(a)球差曲线;(b)场曲及畸变;(c)点列图

Fig. 4 Aberration analysis diagram for plano-convex transformation lens. (a) Spherical aberration; (b) field curvature and distortion; (c) spot diagram

从图 4(a)可以看出平凸变换透镜可导致约 2.5 mm 的球差;从图 4(b)可以看出它的子午场曲和边缘视场的畸变比较小;通过图 4(c)的点列图可以看出平凸系统有较大的慧差。由此可见,利用平凸透镜作为变换透镜会导致大的球差和慧差,而场曲、像散和畸变则不需要矫正。所以,只需要用两片透镜即可矫正球差和慧差。

### 4 优化变换透镜的 PW 法设计

通过第 3 节可以看出系统需要矫正球差、慧差。对于由  $N$  个薄透镜构成的光学系统,它们的 PW 形式塞得和数为

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N S_I = \sum_{j=1}^N h_j^4 \varphi_j^3 \bar{P}_j \\ \sum_{j=1}^N S_{II} = \sum_{j=1}^N h^3 h_{zj} \varphi_j^3 \bar{P}_j + J \sum_{j=1}^N h_j^2 \varphi_j^2 \bar{W}_j \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $h_j, h_{zj}$  为轴上光线和主光线在第  $j$  个薄透镜上的投射高度; $\varphi_j$  则为第  $j$  个薄透镜的光焦度; $J$  为拉赫不变量;归化像差参量  $\bar{P}$  和  $\bar{W}$  可表示为

$$\begin{cases} \bar{P} = \bar{P}^\infty - \bar{u}(4\bar{W}^\infty + 1) + \bar{u}^2(3 + 2/n) \\ \bar{W} = \bar{W}^\infty - \bar{u}(2 + 1/n) \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $\bar{u}$  为归化孔径角,它与孔径角的关系为  $\bar{u} = u/(h\varphi)$ ;而无穷远归化像差参量  $\bar{P}^\infty, \bar{W}^\infty$  只由玻璃折射率  $n$  和薄透镜形状系数  $Q$  决定

$$\begin{cases} \bar{P}^\infty = aQ^2 + bQ + c \\ \bar{W}^\infty = kQ + l \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $a, b, c, k, l$  可以查《光学设计手册》得到,所以可以将薄透镜的  $\bar{P}, \bar{W}$  利用形状系数  $Q$  表示出来。

在图 2 所示的等效光路中,若闪耀光栅和输出镜的距离为 50 mm,变换透镜的焦距为 150 mm,则闪耀光栅和第二变换透镜的距离为 250 mm。并且,该光路以孔径光阑为中心有一定对称性,为方便起见,可以只对后半部分光路进行设计,这就相当于设计一个物距无穷远、孔径光阑距离透镜组为 250 mm、视场角为  $1.91^\circ$  的双分离透镜组。

设变换系统是由薄透镜光组组成的,所以在规划条件下  $h_1 = h_2 = 1$ ,并且  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = 1$ ,孔径光阑和透镜组距离为  $l_z = -250/150 = -1.67$ ,第二近轴光线和光轴的夹角  $u_{z1} = -1$ ,所以它在薄透镜上的投射高度  $h_{z1} \approx u_{z1} \times l_{z1} = 1.67$ ,且有关系  $h_{z1} = h_{z2}$  和  $J = 1$ 。根据  $u_1 = 0, u_2$  可由下式求解。

$$u_{i+1} - u_i = h_i \varphi_i. \quad (7)$$

由于波长范围小于 20 nm,无需考虑色差,所以两片透镜可以采用相同的材料,这里选用常见的 K9

玻璃。

设第一透镜光焦度为 1.5,形状系数为  $Q_1$ ;第二透镜光焦度为  $-0.5$ ,形状系数为  $Q_2$ ,并将  $h_1, h_2, u_1, u_2, h_{z1}, h_{z2}$  和  $J$  代入(4)~(6)式,即可得到球差、慧差方程组

$$\begin{cases} S_1 = h_1 \varphi_1^3 \bar{P}_1 + h_2 \varphi_2 \bar{P}_2 = 0 \\ S_2 = h_{z1} h_1^3 \varphi_1^3 \bar{P}_1 + h_{z2} h_2^3 \varphi_2^3 \bar{P}_2 + \\ J \times (h_1^2 \varphi_1^2 \bar{W}_1 + h_2^2 \varphi_2^2 \bar{W}_2) = 0 \end{cases}. \quad (8)$$

利用 Matlab 软件解之得到 4 组关于  $Q_1, Q_2$  的解,从中挑选  $Q$  值较小的解以减小高级像差,即

$$\begin{cases} Q_1 = -1.86442 \\ Q_2 = 0.300057 \end{cases}.$$

将它们代入公式

$$\begin{cases} r_{j1} = \frac{150 \text{ mm}}{\varphi_j \left( \frac{n}{n-1} - Q_j \right)} \\ r_{j2} = \frac{150 \text{ mm}}{\varphi_j (1 - Q_j)} \end{cases}. \quad (9)$$

可求出第  $j$  个薄透镜的前曲率半径  $r_{j1}$  和后曲率半径  $r_{j2}$ 。结果为  $r_{11} = 93.2437 \text{ mm}, r_{12} = -115.6872 \text{ mm}, r_{21} = -92.6810 \text{ mm}, r_{22} = -230.7604 \text{ mm}$ ,为薄透镜设定一定的中心厚度,并将上述结果导入 Zemax 序列中优化,得到表 1 中的结构参数:其中 Radius 为每一个面对应的曲率半径,Thickness 为面与面之间的距离, Glass 为玻璃牌号, Diameter 为透镜的口径。图 5 是该双分离透镜的结构简图,它是由一个双凸透镜和一个负弯月透镜组成的。

表 1 优化后双分离变换透镜组参数

Table 1 Parameters of discretely doublet lenses

Surface	Radius / mm	Thickness / mm	Glass	Diameter / mm
Object	Infinity	Infinity	/	/
Stop	Infinity	250	/	13.00
2	98.4208	7	K9	21.42
3	-161.243	2	/	21.24
4	-89.7349	4	K9	21.11
5	-126.163	142.795	/	21.04
IMA	Infinity	/	/	5

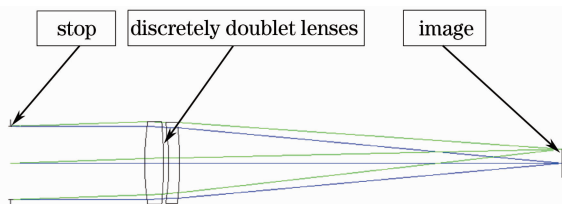


图 5 双分离变换透镜的结构图

Fig. 5 Optical setup of discretely doublet lenses



将双分离的变换透镜代替图 2 中的平凸变换透镜,并利用光线追迹法求出反馈率,可得到每个发光单元位置和反馈率的关系,如图 6 所示。可以看出所有发光单元的反馈效率均大于 94.2%。处于光轴上的发光单元反馈效率为 94.2%,为系统最小值。随着发光单元偏离光轴位置,反馈效率反而增加,在 3.5 mm 和 4 mm 处时反馈效率最大,可达 99.5%。边缘发光单元的反馈效率为 98.2%。

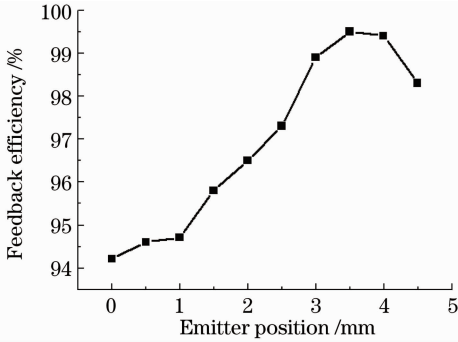


图 6 利用优化双分离变换透镜后各发光单元位置和反馈效率的关系

Fig. 6 Relationship between each emitter location and their feedback efficiencies by use of discretely doublet lenses

## 5 结 论

提出了反馈效率的概念,它量化了像差对光谱合束的影响。为了研究像差对反馈效率的影响,将常用 LDA 光谱合束技术的光路展开,并在发光单元的高斯像位置处设置了和发光单元大小相同的探测器,通过光线追迹法就可以求出每个发光单元的反馈效率;对平凸变换透镜通过追迹法求出了反馈效率,结果发现反馈效率较低,中心发光单元的值为 80.5%,而边缘发光单元的反馈效率甚至降到了 49.7%;对平凸变换透镜的像差进行分析发现它的球差和慧差比较大,需要对它们进行矫正;利用 PW 法求出双分离变换透镜组的初始结构,并利用 Zemax 的优化功能得到优化的变换透镜组,利用它替换图 2 中平凸变换透镜可求出双分离变换透镜的反馈效率,结果发现所有发光单元的反馈效率均大于 94.2%。由此可见,利用双分离变换透镜可以显著地提高激光反馈效率,最终可以提高合束效率。

## 参 考 文 献

- 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
- Ding Xiaochen, Zhang Pu, Xiong Lingling *et al.*. Thermal reaction of high power semiconductor laser with voids in solder layer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0902006  
丁晓尘, 张 普, 熊玲玲等. 大功率半导体激光器贴片层空洞热效应影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0902006
- Hu Liming, Liu Yun, Lu Zhihua *et al.*. Skin welding with a combination of 980 nm and 1064 nm lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0404001  
胡黎明, 刘 云, 芦志华等. 980 nm/1064 nm 双波长半导体激光皮肤焊接[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0404001
- Zhang Yanxin, Wang Jingwei, Wu Di *et al.*. A new package structure for high power single emitter semiconductor laser and performance analysis [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1186~1191  
张彦鑫, 王警卫, 吴 迪等. 一种新型大功率单发射腔半导体激光器及其特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1186~1191
- Wang Zhiqun, Yao Shun, Cui Bifeng *et al.*. Thermal characteristic of high beam quality laser diode array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2497~2501  
王智群, 尧 舜, 崔碧峰等. 高光束质量大功率半导体激光阵列的热特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2497~2501
- Tso Yee Fan, Antonio Sanchez, Vincenzo Daneu *et al.*. Laser beam combining for power and brightness scaling [C]. *IEEE Aerospace Conf. Proc.*, 2000, **3**: 49~54
- Steve Tidwell, Steve Roman, Don Jander *et al.*. Spectral Beam Combining of diode laser bars to achieve efficient, near diffraction limited, output power[C]. *SPIE*, 2003, **4973**: 42~46
- Robin K. Huang, Bien Chann, John D. Glenn *et al.*. Ultra-high brightness, wavelength-stabilized, kW-class fiber coupled diode laser[C]. *SPIE*, 2011, **7918**: 791810
- Zhang Yan, Zhang Bin. Analysis of the spectral beam combining efficiency of diode laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(5): 864~872  
张 艳, 张 彬. 半导体激光器光束谱合成效率的分析[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(5): 864~872
- Yu Yi, Wang Weimin, Lu Yanhua *et al.*. Simulation of spectrally beam combined diode laser based on grating-cavity[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(2): 189~192  
于 益, 王卫民, 鲁燕华等. 二极管激光光栅-外腔光谱合成技术模拟研究[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(2): 189~192
- 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
- Chuck Hamilton, Steve Tidwell, Dawn Meekhof *et al.*. High power laser source with spectrally beam combined diode laser bars [C]. *SPIE*, 2004, **5336**: 1~10
- 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
- Friedrich Bachmann, Peter Loosen, Reinhart Poprawe. High Power Diode Lasers and Their Applications [M]. New York: Springer, Series in Optical Sciences, 2007. 138~139