

文章编号 2095-1531(2015)04-0517-18

## 大功率半导体激光合束进展

王立军\*, 彭航宇, 张俊

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 经过近30年的发展, 半导体激光器已由信息器件逐步发展成为能量器件, 特别是大功率高光束质量半导体激光器, 已从泵浦光源过渡成为直接作用光源, 并部分应用在加工及国防领域。本文介绍了大功率半导体激光单元发展现状, 分析讨论了各种激光合束技术及相应的合束光源, 介绍了长春光机所在激光合束方面所做的部分工作, 提出了我国半导体激光产业建设及发展的几点建议, 并对半导体激光技术的发展新动向进行了展望。随着单元亮度的提升和合束技术的成熟, 大功率半导体激光源作为间接光源和直接作用光源将在国防和工业领域大放异彩。

**关键词:** 半导体激光; 激光合束; 大功率; 高光束质量

**中图分类号:** TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20150804.0517

## Advance on high power diode laser coupling

WANG Li-jun\*, PENG Hang-yu, ZHANG Jun

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

**Abstract:** During the past 30 years of development, diode lasers have gradually become into energy components from the initial information ones. Especially for the high power diode laser source with high beam quality, it has been transformed from the pumping laser to the direct function laser source, and partly applied in the field of materials processing and national defense. The development situation on the laser units is firstly introduced. Then the various methods of laser combining and the corresponding combining sources are analyzed and discussed. The CIOMP's works on the laser combination are presented. Some suggestions for the development of diode laser industry in China are propounded. The new development trends of the diode laser technology are finally prospected. With the increase of the unit brightness and the mature of laser coupling technology, high power diode lasers, either as the direct sources or indirect sources, will have important impacts on the defense and industrial fields.

**Key words:** diode laser; laser coupling; high power; high beam quality

收稿日期: 2015-06-05; 修订日期: 2015-06-30

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2012AA040210); 科技部重大仪器专项资助项目(No. 2011YQ04007702); 国家自然科学基金资助项目(No. 61204055, No. 61404137); 中科院国防青年基金资助项目(No. CXJJ-14-Q57); 吉林省发展计划资助项目(No. 20140101172JC); 吉林省国际合作资助项目(No. 20150414053GH)

## 1 引言

半导体激光器是近 50 年来发展快、成果多、科学渗透广、应用领域宽的一种电光转换器件。它以半导体材料作为增益介质,利用电子在能级间跃迁发光,直接以半导体晶体解理面形成的平行反射镜构成谐振腔,在电注入下形成光振荡、反馈、产生光的辐射放大,实现激光输出。相较于其他激光器类型,半导体激光器具有转换效率高、体积小、重量轻、寿命长、能直接调制及易与其他半导体器件集成等特点,小功率器件作为信息载体早已广泛应用于光通信、光存储和激光打印等信息领域。据 Laser Focus World 统计,2010 年至 2014 年,半导体激光器收益连续占据整个激光市场的半壁江山<sup>[1]</sup>。

在美国 SHEDS<sup>[2-3]</sup>、ADHEL<sup>[2-3]</sup> 和德国 BRIO-LAS<sup>[4]</sup>、IMOTHEB<sup>[5]</sup> 及欧洲 BRIDLE<sup>[6]</sup> 等项目的支持下,半导体激光芯片结构、外延生长和器件封装等激光技术均有了较大的发展,单元器件性能实现了重大突破,如电光转换效率达 70% 以上<sup>[7-10]</sup>、1 cm bar 激光线阵连续输出功率超过千瓦等<sup>[11]</sup>。随着其大功率化的发展,无论作为直接光源还是泵浦源,半导体激光器在加工、医疗、显示及国防等领域均显示出巨大的应用前景。另外,新材料及新结构的不断涌现,使得半导体激光器输出波长囊括从紫外到远红外,出现了如气体探测、远距离目标识别等新应用,这无疑壮大了半导体激光器行业队伍。

目前,可实现连续大于 10 W 功率输出的半导体激光单元器件主要为近红外波段(750 ~ 1 100 nm)的宽条边发射结构器件(Broad-area Edge-emitting),但由于其谐振腔小(毫米级腔长、微米级腔面)、激光腔内及出光口功率密度高( $\text{MW}/\text{cm}^2$ 量级)、增益介质少等条件限制,100  $\mu\text{m}$ 条宽的单个半导体激光单元难以直接输出百瓦及以上功率。另外,高功率单元器件两轴方向尺寸差别大(近百倍比例)、热流密度高及光丝效应等造成输出激光侧向模式多,光束质量差。如何获得具有高功率、高功率密度及高光束质量的半导体激光输出已成为国际上的重大瓶颈技术

问题,美、德等发达国家将上述难题列入国家级重大计划进行攻克,激光合束技术被证明是解决该难题的有效手段之一。基于合束技术,美国立项研究 100 kW 级直接半导体激光光源,用于国防<sup>[2]</sup>;德国研发的千瓦及万瓦级半导体直接光源,应用在激光熔覆及激光焊接等加工领域,这使得高功率半导体激光光源光束质量得到巨大改善,同时也促使以半导体激光源作为泵浦源的全固态激光器和光纤激光器的性能飞速提升,如 2009 年美国诺斯罗普格鲁曼公司报道的 100 kW 全固态激光器<sup>[12]</sup>、2014 年美国 IPG 公司报道的 100 kW 光纤激光器<sup>[13]</sup>。

本文主要介绍了近年来半导体激光单元功率及亮度的研究进展,分析了当前半导体激光合束及大功率半导体激光光源的关键技术,介绍了长春光机所在半导体激光方面所做的部分工作,提出了我国半导体激光产业建设及发展的几点建议,并对半导体激光技术的发展动向进行了展望。

## 2 大功率半导体激光单元研究进展

目前所采用的大功率半导体激光器件主要为出光方向平行于外延层的宽条边发射结构器件,根据单芯片集成的单元数量,可分为激光单管(Single Emitter)和激光线阵(Bar),如图 1 所示。激光单管为单个激光单元,可实现几瓦至数十瓦功率输出,其 X 方向(侧向)发光区为几十到数百微米,发散角一般为  $6^\circ \sim 15^\circ$ (半高全宽,FWHM),发散慢,称为慢轴方向,光场为多模厄米-高斯分布,而 Y 方向(横向)发光区仅为 1 ~ 5  $\mu\text{m}$ ,发散角高达  $20^\circ \sim 35^\circ$ (FWHM),发散快,称为快轴方向,光场为基模高斯分布;激光线阵为多

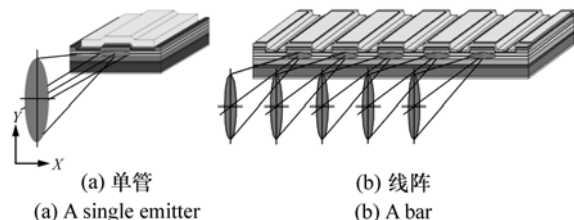


图 1 半导体激光器件基本结构

Fig. 1 Basic structures of diode lasers

个激光单管在  $X$  方向的集成,可连续输出几十瓦至数百瓦功率,主流结构为条宽 10 mm 的标准 bar 或条宽小于 10 mm 的迷你 bar。根据散热及应用要求,激光芯片可封装在传导冷却、宏通道水冷及微通道水冷等不同形式热沉上。

## 2.1 输出功率 (Power, $P$ )

半导体激光器的输出功率通常受热翻转和光学灾变损伤 (COD) 限制<sup>[14]</sup>。热翻转与器件加热引起的内量子效率退化有关,在连续工作时更为明显,当电注入增加时,其功率电流曲线的斜率效率急剧下降,通过加强散热,有助于改善热翻转。光学灾变损伤与激光腔内材料或谐振腔面的峰值功率密度有关,采用可承受高功率密度的材料或腔面钝化处理直接提高激光器本身的损伤阈值,可实现高功率输出,如采用低表面复合速率的无铝材料<sup>[15]</sup>、非吸收腔面镜<sup>[16]</sup>、腔面钝化处理<sup>[17]</sup>、量子阱混合 (QWI)<sup>[18]</sup> 等。另外也可通过增加谐振腔的截面积来降低腔面峰值功率密度,如在快轴方向采用宽波导结构<sup>[19]</sup>,在慢轴方向采用宽条区结构<sup>[20]</sup>。

宽条区半导体激光器由于制作方便和容易获得高功率输出而被广泛采用,另外,随着腔面钝化、大光腔结构设计及制备技术的逐步发展,半导体激光单元器件的功率实现巨大提升。图 2 为条宽 90 ~ 100  $\mu\text{m}$ 、波长 9xx nm 的半导体激光单管功率研究进展<sup>[8,21-28]</sup>。2005 ~ 2009 年,激光结构设计、外延生长及制备工艺等技术的不断优化,输出功率增加近 1 倍。英国 Intense 报道输出

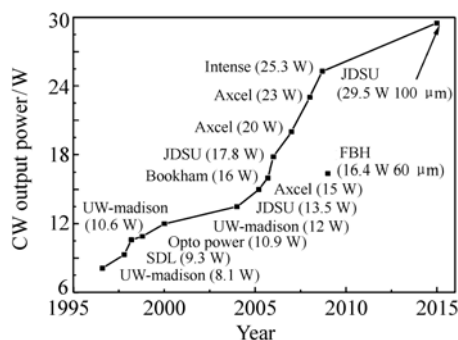


图 2 条宽 90 ~ 100  $\mu\text{m}$ 、波长 9xxnm 的半导体激光单管功率研究进展

Fig. 2 Research advance on 9xxnm single emitters with the width of 90 ~ 100  $\mu\text{m}$

25.3 W 连续功率<sup>[23]</sup>。2010 ~ 2014 年,单管器件功率进展达到瓶颈期,未有更高指标报道,主要解决多激光单管的合束问题。2015 年,美国 JDSU 优化内部载流子/光子分布及其相互作用,进一步解决空间烧孔、自聚焦、光子吸收等问题,100  $\mu\text{m}$  条宽实现 29.5 W 功率输出<sup>[21]</sup>。目前,美国 JDSU、nLight、IPG 及德国 Jenoptik 等多家公司均已推出了 9xx nm 波段、100  $\mu\text{m}$  条宽激光单元连续输出 12 W 产品,寿命可达数万小时。

半导体激光线阵的输出功率研究进展如图 3 所示,2004 ~ 2008,激光线阵输出功率发展迅速<sup>[11,29-35]</sup>,提高 2 倍多,单线阵连续激光功率突破 kW 量级<sup>[11]</sup>。近两年,随着高能固体激光对泵浦源高功率需求,德国 FBH 通过改进芯片结构及强化腔面钝化,并优化散热结构<sup>[36-37]</sup>,在 -70  $^{\circ}\text{C}$  条件下单 bar 条准连续输出达到近 2 kW 功率输出<sup>[37]</sup>。

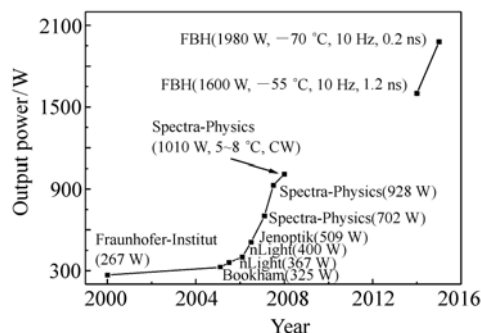


图 3 半导体激光厘米线阵输出功率研究进展

Fig. 3 Research advance on laser bars with the width of 10 mm

## 2.2 激光单元亮度 (Brightness, $B$ )

随着激光应用的不断深入,高功率下的激光亮度成为评价激光应用的重要指标,它表示单位立体角、单位面积内的激光功率,直接反映激光束聚焦后焦点处的功率密度,其表达如下:

$$B = \frac{P}{A \cdot \Omega}, \quad (1)$$

式中,  $A$  表示单位面积,  $\Omega$  表示单位立体角。

半导体激光器的光束质量一般采用光参量积 (Beam Parameter Product,  $Q$ ) 来评价,定义为束腰半径  $w_0$  与远场发散半角  $\theta/2$  的乘积:

$$Q = w_0 \cdot \frac{\theta}{2}. \quad (2)$$

$Q$  值越小,光束质量越好。

因此半导体激光器的亮度也可以表示为:

$$B = \frac{P}{\pi^2 \cdot Q_x \cdot Q_y} \quad (3)$$

由于快轴方向光束质量  $Q_y$  接近衍射极限,亮度  $B$  主要受慢轴方向  $Q_x$  限制,为了便于比较, $B$  也常采用功率与慢轴方向光束质量的比值 ( $P/Q_x$ ) 来评价。以 100  $\mu\text{m}$  条宽 9xx nm 波长输出功率 12 W 为例,其慢轴发散角一般为  $12^\circ$ ,  $Q_x$  为 5.2 mm · mrad,对应比值为 2.3 W/mm · mrad。

由于芯片结构、封装工艺及腔面处理等技术的日趋成熟,激光功率短时间内难以出现大的提升。目前主要是在保证高功率输出条件下,优化慢轴光束质量来提高激光亮度:一是降低慢轴发散角;二是减小慢轴发光区条宽。

受热梯度、热透镜现象及高阶模式起振等因素影响,高功率条件下宽条形半导体激光器慢轴方向的光束质量难以有效控制<sup>[38]</sup>,目前主要通过减小慢轴发光区条宽实现:一是发展慢轴条宽仅为几微米至数十微米的窄脊形结构<sup>[39-40]</sup>,为了降低功率密度,并在快轴方向集成大光腔宽波导结构<sup>[40-41]</sup>;二是发展集成窄脊与锥形放大结构的锥形半导体激光器<sup>[42]</sup>。

据报道,瑞士 Oclaro 研制的脊宽 6  $\mu\text{m}$ 、腔长 4.8 mm 的 980 nm 分别限制和大光腔混合型波导激光单管,实验测得连续 2 W 的基模高斯光输出,功率光束质量比达到 6.4 W/mm · mrad,最大光电转换效率达 63%<sup>[39]</sup>;美国 MIT 采用脊宽 4  $\mu\text{m}$ 、波导 5  $\mu\text{m}$ 、腔长 10 mm 的板条耦合型激光单管(SCOWL),获得连续 3 W、功率光束质量比达 8.9 W/mm · mrad、最大转换效率 45% 的 1 060 nm 单模激光输出<sup>[40]</sup>,并在 1 cm 条宽的激光芯片上集成 250 个激光单元(40  $\mu\text{m}$  空间间隔,10% 填充因子),未进行腔面钝化下获得连续近 500 W 功率输出<sup>[41]</sup>。德国 FBH 开发的集成光栅结构 979 nm 锥形激光器,在 11.4 W 连续功率时  $M^2(1/e^2)$  为 1.1,谱宽为 13 pm<sup>[42]</sup>,功率光束质量比达 33.3 W/mm · mrad,亮度超过 1 GW/cm<sup>2</sup> · sr,这也是目前报道的连续半导体激光单元最高亮度水平。

### 3 激光合束技术及高功率半导体激光光源研究现状

激光合束是一个将多束单元激光耦合成一束的过程,它基于半导体激光的相位、光强、偏振及光谱等特性,利用光学元件的折射、反射及衍射效应,改变或不改变激光单元的振荡特性,来提高输出功率、增加激光亮度及改善光束质量。

根据参与合束激光单元的相关性和合束机理,可分为相干合束和非相干合束,如图 4 所示。

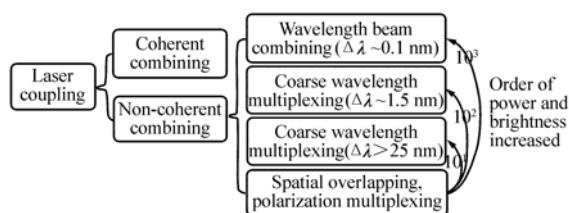


图 4 激光合束分类结构图

Fig. 4 Classification map of laser coupling

相干合束是一种通过控制激光单元的相位,使各单元光束相干输出,在远场获得高功率、高亮度的合束技术,理论上可耦合无限个激光单元,具有原理上的先进性。但该技术对合束激光单元的光谱、偏振及相位等特性均有严格要求,为保证所有激光单元的相干性,需对每个单元的光谱和相位严格控制,并随着合束激光单元的增多,控制难度急剧上升。另外半导体激光单元本身输出功率仅为瓦级,相干耦合实现上千瓦输出需控制上千个激光单元,实现难度大。目前代表性的研究成果为美国麻省理工(MIT)<sup>[43-45]</sup>于 2011 年报道通过种子注入控制光谱、SPGD 相位分析反馈驱动电流控制相位,实现 218 个激光单元的相干合束,获得 38.5 W 功率输出<sup>[45]</sup>。目前该技术仅处于实验室阶段,鉴于该技术实现上千瓦功率输出难度大,近期内难以实用化,在此不作详细介绍。

非相干合束是目前实现高功率半导体激光输出的主要方式,根据合束光源的谱宽及合束单元的波长间隔  $\Delta\lambda$ ,可进一步分为四类:

(1)单波长合束,采用激射波长相同或相近的激光单元进行光束整形、空间合束及偏振合束,是多个不同波长激光合束的基础;

(2)粗波长合束,采用二向分色镜对单波长激光进行合束,相邻波长间隔一般不小于 25 nm,合束不改变激光单元自身起振,激光单元光谱特性要求低,相较于单波长合束,功率及亮度可提高 1 个数量级;

(3)密集波长合束,采用体光栅等合束元件对经过光谱窄化及稳定处理的不同波长激光进行合束,相邻波长间隔可降至 1.5 nm,相较于单波长合束,功率及亮度可提高 2 个数量级;

(4)光谱合束,采用面光栅等合束元件对经光谱处理的不同波长激光进行合束,相邻波长间隔可低至 0.1 nm,相较于单波长合束,功率及亮度可提高 2~3 个数量级。

### 3.1 常规激光合束 (Traditional Beam Combining, TBC)

常规激光合束由单波长合束与粗波长合束组合实现,是目前实现发展最为成熟的合束技术,如图 5 所示。

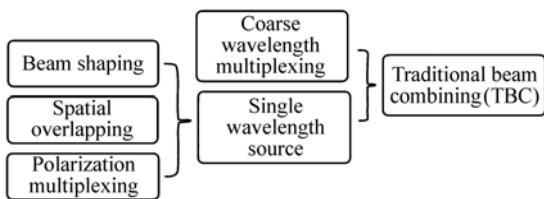


图 5 常规半导体激光合束光源技术构成图  
Fig. 5 Technology structure of TBC sources

由于半导体激光器快轴方向光束质量好,慢轴方向光束质量差,两者差别高达数百倍,因此首先需对半导体激光进行光束整形,如图 6 所示。整形原则为将两轴光束切割、重排,使两轴光束质量重新分布,整体光束质量达到最优。

半导体激光器整体光束质量一般采用快慢轴方向光束质量的均方根值评价,如式(4)所示。

$$Q_{total} = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} \quad (4)$$

因此仅当  $Q_x = Q_y$  时,  $Q_{total}$  取得最小值,获得最佳的光束质量输出。对此光束切割的份数  $N$  (取整)如式(5)所示。

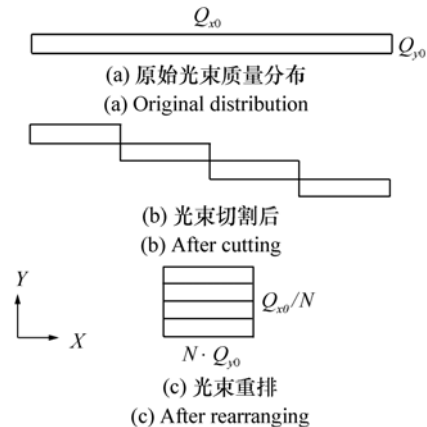


图 6 光束整形  
Fig. 6 Beam shaping

$$[N] = \sqrt{\frac{Q_{y0}}{Q_{x0}}} \quad (5)$$

空间合束是将多束激光空间堆叠,增加功率的同时光束质量变差;偏振合束利用半导体激光线偏振特性,将两束振动方向相互垂直的光束通过偏振合束镜,实现光束重合的方式输出,功率提高近一倍,光束质量不变;粗波长合束是利用半导体激光的光谱特性,波长不同的两束激光入射到二向分色镜,一束光透过,一束光反射,获得功率提高一倍、光束质量不变的激光输出,采用不同波段的二向分色镜,可实现不同波长的激光合束,为实现  $n$  束激光合束,需  $(n - 1)$  个二向分色镜,如图 7 所示。

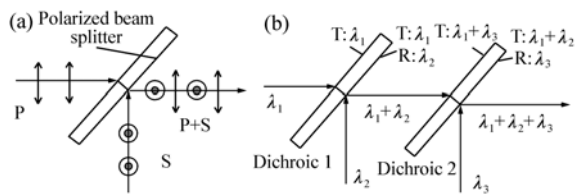


图 7 (a)偏振合束及(b)粗波长合束示意图  
Fig. 7 Sketch of (a) polarization multiplexing and (b) coarse wavelength multiplexing

基于激光单管、传导冷却线阵和微通道水冷迭阵 3 种不同封装形式,通过常规激光合束技术,目前已发展出激光单管合束光源、线阵合束光源和迭阵合束光源,实现几十瓦至数万瓦级的直接输出或光纤耦合输出。

单管合束光源基于激光单管,其慢轴光束质量相对好,无需光束整形,快慢轴准直后,直接通过快轴方向的空间合束和整体偏振合束实现耦合。由于激光单元间隔大,热窜扰影响小,激光单管可工作在十瓦级功率。采用数十个单管合束,可实现单波长几十瓦至三百瓦功率从 100 ~ 200  $\mu\text{m}$  芯径光纤输出,光束质量在 6 ~ 20  $\text{mm} \cdot \text{mrad}$  之间,具有亮度高、成本低及可靠性好等优势,常用在光纤激光泵浦、激光医疗、激光照明等领域。另外通过采用高温芯片,单管合束光源可直接无水冷却工作,降低使用要求,在一些机动性要求高的场合有重要应用。美国 nLight、JDSU、IPG 及德国 Fraunhofer ILT、FBH 等,均已报道实现从 100  $\mu\text{m}$  光纤输出功率大于 100 W 的单波长激光模块<sup>[46-52]</sup>。北京凯普林<sup>[53]</sup>、苏州长光华芯在该合束技术上有好的发展势头,比肩国际水平。

线阵合束光源基于传导热沉封装的激光线阵,对于常规厘米激光 bar 条(填充因子大于等于 20%),慢轴方向光束质量差,一般需要先整形后合束,光学结构较为复杂,而且由于传导热沉散热限制,单个激光线阵输出功率一般在 40 ~ 80 W,难以发挥厘米 bar 条的功率优势。对此,线阵合束光源多采用慢轴方向光束质量较好的迷你 bar 条(激光点数少,一般为 5 个 ~ 10 个)或填充因子低的厘米 bar 条(填充因子小于 20%),降低光学系统复杂性,快慢轴准直后,直接通过快轴方向的空间合束和整体偏振合束实现耦合,采用数十个线阵合束,可实现功率几百瓦至数千瓦、200 ~ 600  $\mu\text{m}$  芯径光纤输出,光束质量在 20 ~ 60  $\text{mm} \cdot \text{mrad}$  之间,波长合束可进一步提高功率。由于采用工业用水即可实现整体冷却,便于维护,目前多用于激光薄板切割、热传导焊等工业加工。代表厂商包括德国 Dilas、Trumpf、Limo 等<sup>[54-58]</sup>,其中德国 Dilas 实现 775 W、200  $\mu\text{m}/0.22$ (光纤芯径/数值孔径,下同)和 1 250 W、400  $\mu\text{m}/0.2$  的单波长激光输出<sup>[56-57]</sup>,德国 Trumpf 实现 3 000 W、600  $\mu\text{m}/0.11$  双波长激光输出<sup>[58]</sup>,德国 Limo 实现 2 000 W、200  $\mu\text{m}/0.2$  四波长输出<sup>[55]</sup>。长春光机所也实现了 3 000 W、600  $\mu\text{m}/0.2$  光纤输出,应用在金属焊接上。

迭阵合束光源基于微通道水冷迭阵,为了发

挥散热优势,通常采用高填充因子的高功率厘米激光 bar 条,因此需先整形后合束,单层激光迭阵输出功率可达 100 ~ 300 W,采用数十层迭阵合束,可实现数千瓦至上万瓦功率从 600 ~ 2 000  $\mu\text{m}$  光纤输出,也可作为直接光源应用。通过波长扩展,可将功率提升至更高。德国 Laserline 在该技术领域具有绝对优势<sup>[59-62]</sup>,采用高亮度的激光 bar,通过棱镜堆光束整形,推出 3 000 W (400  $\mu\text{m}/0.1$ )、4 500 W (600  $\mu\text{m}/0.1$ )、6 000 W (400  $\mu\text{m}/0.2$ )、10 000 W (600  $\mu\text{m}/0.2$ )、15 000 W (1 000  $\mu\text{m}/0.2$ ) 和 20 000 W (2 000  $\mu\text{m}/0.2$ ) 光纤耦合产品,应用于金属板切割、深熔焊、激光熔覆等工业加工,并且报道了 15 000 W (2 000  $\mu\text{m}/0.22$ ) 的 938 nm 单波长合束光源<sup>[62]</sup>,及 40 000 W (200  $\mu\text{m}/0.2$ ) 的多波长合束光源<sup>[60]</sup>。长春光机所也通过迭阵合束,实现 10 000 W 的直接输出光源<sup>[63]</sup>,西安炬光在迭阵合束光源上具有好的产能。目前迭阵合束光源多用于激光熔覆、表面硬化等对激光功率要求高、光束质量要求低的工业加工。

在常规激光合束中,半导体激光单元器件输出光谱未做处理,谱宽较宽(3 ~ 5 nm)、光谱不稳定( $\sim 0.3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ),随工作电流变动大,实际工作中须考虑波长余量,为保证合束激光光谱不重叠,合束波长间隔应在 10 nm 以上。另外基于可靠性考虑,偏振合束一般采用高损伤阈值的偏振分光片实现,它的有效带宽通常不超过 10 nm,这使得目前高功率半导体激光合束光源多采用先偏振、

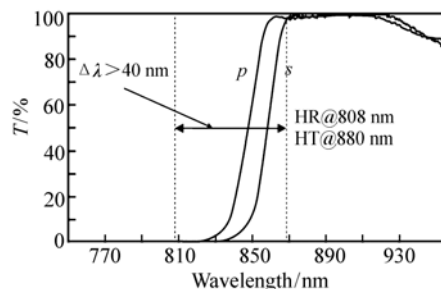


图8 808和880nm波长合束所用二向分色镜的透射率曲线

Fig. 8 Transmission curves of a dichroic lens for coupling 808 nm and 880 nm

后波长的方式实现。采用二向分色镜波长合束

时,S和P光偏振分离使得相邻波长间隔一般不低于40 nm,图8为典型的808和880 nm合束曲线。据德国LIMO报道,为实现了915和940 nm的合束,他们采用温度控制方式分别降低915 nm和增加940 nm激光器的波长,以加大波长间隔,且其合束效率不高于90%<sup>[54]</sup>。因此常规合束方式的相邻波长间隔很难小于25 nm,在750~1100 nm高功率波段范围,合束激光的波长数不超过15束,激光功率及亮度提升有限。

### 3.2 密集波长合束(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)

在光束质量一定条件下,为提高合束激光功率及亮度,降低相邻波长间隔增加合束单元数量是目前切实可行的方案,它需从两方面同时考虑:一是改善半导体激光器的光谱特性,减小谱宽、增强光谱稳定性,降低激光单元自身光谱不定性影响;二是增加合束元件镀膜曲线的陡度,减小合束元件透射波段和反射波段的波长间隔。

在半导体激光器光谱特性改善方面:一是直接在芯片内部刻蚀光栅,如DFB或DBR激光器;二是通过体布拉格光栅(VBG)外腔反馈实现。传统DFB或DBR激光器的输出功率低,主要用在信息领域。近年来德国FBH研制的在窄脊端刻蚀光栅控制激光波长的锥形激光器,已实现激光功率达数瓦、谱宽为几十pm输出<sup>[64-67]</sup>,但由于内置光栅结构制作工艺复杂,成品率不高,同时光栅结构增加激光器内部损耗,转换效率相对低,未能实现批产化。目前主要采用VBG外腔反馈方式。

VBG外腔反馈是利用反射式VBG的窄衍射带宽,将其放置在经过准直的激光芯片前端<sup>[46]</sup>,如图9所示,与激光芯片后腔面构成谐振腔,利用VBG的衍射光作为种子光进行谐振,输出激光光谱由VBG决定,可实现谱宽窄至0.1 nm、温度漂移0.01 nm/°C的激光输出。为实现反馈,波长窄化VBG衍射角一般不超过10°。该方法所用激光芯片仅需在常规芯片前腔面镀增透膜即可,光-光转换效率可高达90%以上,在保证窄谱宽条件下容易实现高功率及高效率输出。在激光芯片有效增益带宽范围内,选用不同衍射波长的VBG,可实现不同中心波长的激光输出。另外,VBG对温

度敏感,不同热注入下反馈波长不同,可借此微调各激光单元的中心波长,以保证单波长合束光源整体谱宽的窄化。

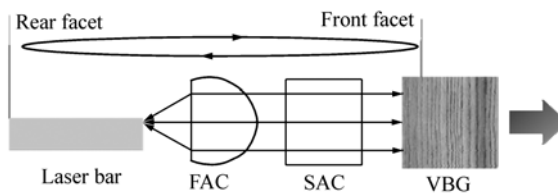


图9 VBG外腔反馈实现光谱控制原理图

Fig. 9 Spectral controlling principle diagram by VBG external cavity feedback

在波长合束方面,一是调整激光合束顺序,如先波长后偏振,消除偏振分离影响;一是改进镀膜工艺,提升二向分色镜的合束能力;一是采用新的合束元件VBG。

偏振分离是造成相邻合束波长间隔大的重要原因,从其形成机理可知,入射角越大,偏振分离越大,因此减小合束激光的入射角,如从45°降至30°,可压缩偏振分离,另外它也能一定程度增加合束曲线的陡度,德国Trumpf通过该方法实现间隔30 nm的多路激光合束,并应用在其TruDiode产品中<sup>[58]</sup>。

直接采用线偏振激光进行波长合束,消除偏振分离影响,是目前实现密集波长合束的重要方式。另外,采用不同的镀膜工艺,如离子束溅射,针对线偏振光的二向分色镜光谱分辨能力有了很大提升,这使得合束波长间隔进一步缩小。Dilas采用波长陡度仅为1 nm的二向分色镜(针对线偏振光),并以小角度入射,对经过VBG线宽窄化处理的972、976和980 nm三束线偏振光合束并耦合进410 W、100 μm/0.2 光纤<sup>[68]</sup>。德国Direct-photonics采用相似技术,也实现了波长间隔为4 nm的5束激光合束<sup>[69]</sup>,如图10所示。目前该公司已推出了功率500~2000 W、光束质量5 mm·mrad、芯径100 μm的光纤耦合半导体激光光源产品<sup>[70]</sup>,应用于金属切割。

合束VBG为反射或透射型VBG,与光谱窄化VBG区别在于合束VBG衍射角更大(大于10°)、衍射带宽更宽(~0.5 nm)。合束原理如图11所示,一束波长和角度均满足衍射条件的激光 $\lambda_1$ 在

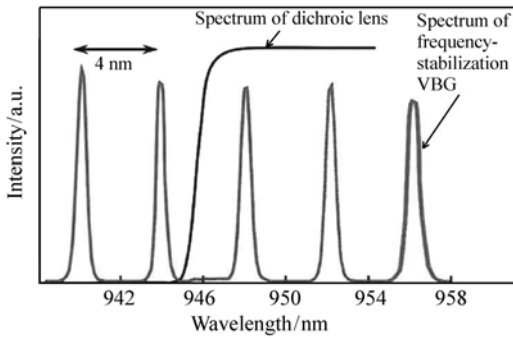


图 10 德国 Directphotonics 实现间隔 4nm 的 5 波长合束光谱分布  
Fig. 10 Spectral distribution of 5 wavelengths with the interval of 4 nm from Germany Directphotonics

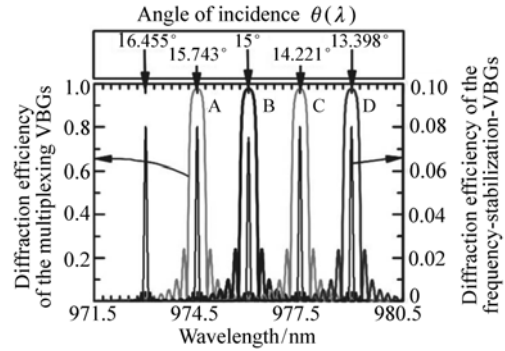


图 12 RTHW 采用的合束 VBG 和波长窄化 VBG 光谱分布  
Fig. 12 Spectral distribution of multiplexing VBGs and spectrum-narrowed VBGs from Germany RWHM

合束 VBG 上衍射,另外一束不满足衍射条件的激光  $\lambda_2$  以与  $\lambda_1$  衍射相同方向入射,并在合束 VBG 上重合,然后两束光沿相同方向出射,实现两束激光的合束。由于合束 VBG 对温度敏感,在不同温度条件下,同一个 VBG 对应的衍射角和波长不同,因此对相同 VBG 施加不同温度,可在较窄波段范围内用于不同波长激光合束。为了获得高的合束效率,激光中心波长和谱宽与合束 VBG 的衍射光谱必须匹配,因此需同时对光谱窄化 VBG 和合束 VBG 温控。

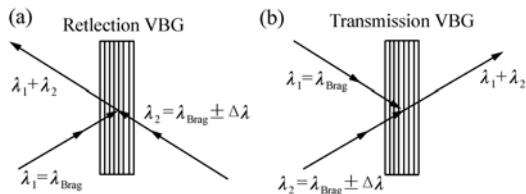


图 11 (a) 反射 VBG 和 (b) 透射 VBG 的波长合束方式  
Fig. 11 Wavelength multiplexing of reflection VBG (a) and transmission VBG (b)

德国 RTHW 精密温控 4 片相同的合束 VBG,实现衍射波长和角度的偏移,将其衍射中心波长分别调节至 974.5、976.0、977.5 和 979.0 nm,实现五束中心波长间隔仅为 1.5 nm 激光合束<sup>[71]</sup>,如图 12 所示。

### 3.3 光谱合束 (Spectral Beam Combining, SBC)

密集波长合束仍采用与粗波长合束相似的方法

式,  $n$  束光对应  $(n - 1)$  个合束元件,合束元件多,且波长间隔受合束元件限制,难以实现亚纳米量级波长间隔的激光合束。光谱合束技术利用单片色散元件可同时实现多束波长间隔低至 0.1 nm 的激光合束,进一步提高合束单元数量,其原理如图 13 所示,多束不同波长的激光分别以不同角度入射到色散元件,并在色散元件处重合,然后在元件色散作用下沿相同方向衍射输出,各光束在近场和远场均相互重叠,获得功率为单元光束之和而光束质量与单元光束一致的合束激光输出。为了实现窄间隔光谱合束,通常采用色散强的衍射光栅作为合束元件。

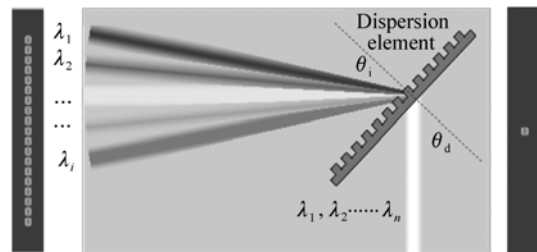


图 13 光谱合束的基本原理

Fig. 13 Principle of spectral beam combining

为了使各单元激光沿相同方向衍射输出,所有单元激光波长  $\lambda_i$  与光栅入射角  $\theta_i$  均满足相同衍射角  $\theta_d$  的光栅方程:

$$m \cdot \lambda_i = \Lambda \cdot (\sin\theta_i + \sin\theta_d), \quad (6)$$

式中,  $m = 1$  (反射式光栅) 或  $-1$  (透射式光栅),  $\Lambda$



为光栅周期。为了保证合束激光光束质量,各激光单元光谱不能交叠。

根据激光单元的光谱控制方式,分为内置光栅和外腔反馈式。

对于内置光栅,欧盟推出的 BRIDLE 计划<sup>[6]</sup>提出如图 14(a)和(b)所示的实现方式,其思想是直接半导体激光芯片的每个激光单元结构中,沿慢轴方向刻蚀周期递变的 DBR 光栅,使每个单元直接输出中心波长沿慢轴方向线性变化的窄线宽激光,然后通过准直成像,由衍射光栅合束输出,其目的是开发出一种低成本、高可靠性、高亮度的直接半导体激光加工光源。据项目进展报

道,已在条宽 30  $\mu\text{m}$  的不同单管芯片上各自刻蚀周期差别 28 nm 的不同 DBR 光栅结构,实现波长间隔 2 nm 的 5 种不同中心波长的单管,如图 14(c)所示,并且每个单管功率达 5.5 W<sup>[72]</sup>,在 2013 年 FBH 的年报上,他们也报道了在一个条宽 6 mm 的迷你条上集成 8 个振荡在不同波长的激光单元,相邻激光单元的波长间隔为 0.45 nm。该合束方式难点在于同一个激光芯片不同位置刻蚀周期相差非常小的光栅,这对刻蚀工艺提出高要求,实现难度非常大,同时内置光栅结构也会影响效率,目前还处于研发阶段。

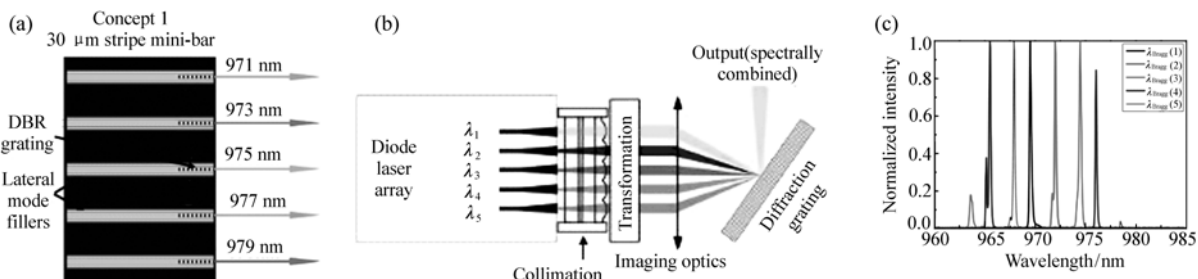


图 14 (a) 内置不同周期的光栅调节激光波长(b)光谱合束输出(c)间隔 2 nm 的输出光谱

Fig. 14 (a) Wavelength modulation by internal grating; (b) spectral beam combining; (c) spectral distribution of six single emitters with the wavelength interval of 2 nm

外腔反馈式是基于前腔面镀增透膜的激光芯片,通过外部光栅元件反馈回特殊波长的种子光,使芯片上的每个激光单元激射在不同波长,然后通过光栅实现合束。目前主要有波长啁啾体布拉格光栅( $\lambda$ -chirped VBG)直接反馈和面光栅结合外腔镜反馈方式。

波长啁啾体布拉格光栅( $\lambda$ -chirped VBG)是一种周期沿横向( $X$ )渐变的体布拉格光栅,其反馈机理与波长窄化 VBG 一致,区别在于反馈波长沿  $X$  方向线性变化,从而使每个激光单元激射在不同波长,并沿  $X$  方向渐变,然后成像由衍射光栅合束输出,如图 15 所示。基于该技术研制的激光源功率水平在百瓦量级<sup>[73-74]</sup>,未有相关产品出售,部分原因在于:每个激光单元对应一个独特周期的 VBG 光栅,这要求制备不同周期的 VBG 光栅,工艺复杂,成本高;随着功率提升,激光单元数量增加,对应 VBG 数量多;VBG 对温度敏感,如

电流及环境温度变化均会造成 VBG 反馈波长变化,导致各单元激光指向变化,这无疑会降低合束激光光束质量,因此需对每个 VBG 进行温控,系统控制复杂;由于 VBG 结构限制,光谱窄化能力

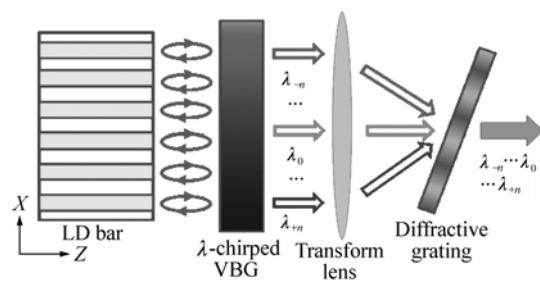


图 15  $\lambda$ -chirped VBG 结合面光栅实现光谱合束

Fig. 15 SBC by  $\lambda$ -chirped VBGs and a diffractive grating

与其轴向尺寸有关,谱宽一般不低于 0.05 nm,而合束波长间隔必须大于谱宽,这也限制了光谱合

束单元数量。

面光栅结合外腔镜反馈是实现目前高性能光谱合束的主要方式,其原理如图 16 所示,由前腔面镀增透膜的半导体激光芯片、变换透镜、衍射光栅和外腔镜组成,谐振腔由激光芯片后腔面和外腔镜组成,激光芯片输出多个光束经变换透镜作用,成像到光栅同一点,然后经光栅衍射,由外腔镜将衍射光部分反射回光栅,并沿原路返回,回到原激光单元的光形成种子光起振,每个激光单元的起振波长严格满足光栅方程,起振在各自不同的波长,经过外腔镜输出的激光在近场和远场均重合,因此实现功率为所有单元之和、光束质量与单个激光单元一致的激光输出<sup>[75]</sup>。该结构仅采用单片面光栅同时实现激光单元的光谱窄化及锁定、多激光单元光谱合束,且谐振波长与光栅衍射方向自适应,合束光指向及光束质量不易受电流或环境变化影响,相对于前两种光谱合束方式,它无须对激光单元光谱进行独立控制,难度及成本明显降低,也是目前实现高功率、高亮度半导体激光输出的最佳方案之一。最具有代表的研究单位为美国麻省理工(MIT)<sup>[76-78]</sup>,现已转向产业化成立美国 Teradiode 公司<sup>[79]</sup>,推出了功率 2 kW ~ 8 kW/100  $\mu\text{m}$ 、500 W/50  $\mu\text{m}$  光纤输出产品,应用在厚板金属切割、远程激光焊接等,是同等功率下激光加工光源的有力竞争者,他们报道了 360 W、2 倍衍射极限<sup>[80]</sup>、亮度达 10  $\text{GW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$  的半导体激光源,直接将高功率半导体激光的亮度提高 2 个数量级,为高功率、高亮度半导体激光器发展指明新方向。

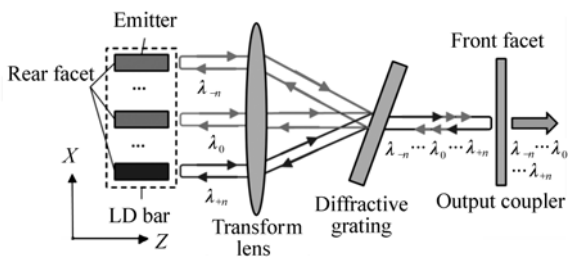


图 16 面光栅结合外腔反馈式光谱合束结构示意图

Fig. 16 SBC by a diffractive grating with external-cavity feedback

该光谱合束结构所有激光单元共用一个后腔镜,随着功率的增加,所需激光单元变多,如要实

现 1 kW 功率输出,以每个 5 W 计算,需要 200 个激光单元耦合,即这 200 个激光单元同时与一个外腔镜对准,尤其是激光单元腔面仅为微米量级尺寸,装调难度大。为保证窄波长间隔,谐振腔有效腔长一般长达数米,结构稳定性要求非常高,长腔长也造成了光谱合束光源的体积相对较为庞大。另外,为实现有效反馈,激光芯片本身的封装精度及 smile 要求也非常严。因此如何提高激光单元的有效反馈、降低装调要求、提高结构稳定性及减小光源体积等技术有待进一步解决。

### 3.4 半导体激光源功率光束质量研究进展

图 17 为目前国际上基于不同合束方法的商用半导体激光源进展,并与灯泵固体激光器、 $\text{CO}_2$  激光器和全固态激光器对比,及不同工业应用所需功率光束质量要求。同等功率下,激光加工所需光束质量值越小,越难以实现。

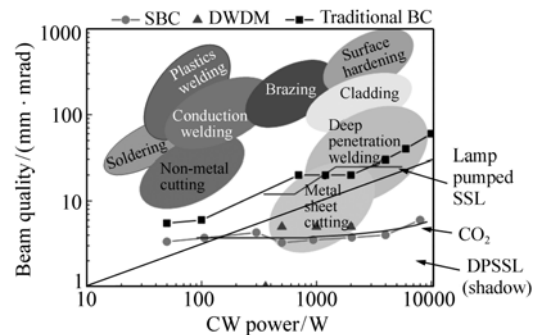


图 17 各种类型激光器功率与光束质量分布图及应用要求

Fig. 17 Map of power vs. beam quality from various types of lasers and demands on the materials processing

常规合束光源输出分布在功率从数十瓦至万瓦量级、光束质量从几十到数百毫弧度范围,在千瓦量级达到灯泵固体激光器水平,可以满足除金属切割及深熔焊以外的大部分加工要求,特别是在表面硬化、熔覆及热传导焊等方面已部分应用,并获得好的加工效果。

密集波长合束光源和光谱合束光源输出指标相近,在数百至数千瓦功率时光束质量维持在 4 ~ 5  $\text{mm} \cdot \text{mrad}$  左右,达到同等功率下  $\text{CO}_2$  激光器和商用全固态激光器的输出水平,相较于常规合束光源光束质量提高近一个数量级,已能够胜

任金属切割和深熔焊的加工。

#### 4 长春光机所在半导体激光合束方面的工作

长春光机所半导体激光组一直开展大功率半导体激光器方面的研究工作,包括从结构设计、外延生长、工艺制备、散热封装、光源集成、可靠性测试及应用推广系列研究。在合束方面主要开展了常规激光合束和光谱合束两方面的研究工作,实现激光功率从数十瓦至万瓦级的连续激光输出,并在国防及激光加工领域获得应用。

##### 4.1 常规激光合束光源

在常规激光合束方面,分别对激光单管、传导热沉封装线阵及微通道封装迭阵,利用光束整形、空间合束、偏振合束及粗波长合束的综合应用,实现功率从几十瓦至万瓦级功率的直接输出或光纤耦合输出。

(1)集成多个传导热沉封装的半导体激光迷你线阵,单线阵连续输出功率30~50W,通过光束整形、空间合束、偏振合束、波长合束、光纤耦合及可靠性处理等技术,研制出从200 μm/0.2 光纤输出连续功率500~1 000 W的半导体激光光源,电光转换效率超过40%,可应用在汽车钣金及石油管道等薄金属板切割,如图18所示。

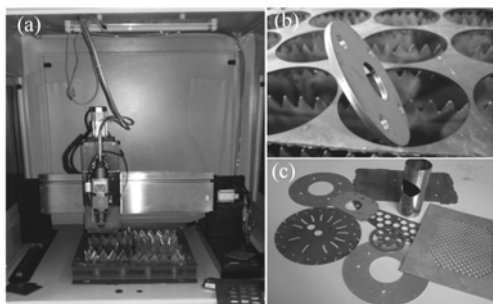


图18 (a)半导体激光源进行金属薄板切割;(b)和(c)为切割样品

Fig. 18 (a) Direct diode laser sources for metal sheet cutting; (b) and (c) samples of laser cutting

(2)集成多个传导热沉封装的半导体激光厘米线阵,单线阵输出功率60~80W,通过光束整形、空间合束、偏振合束、波长合束、光纤耦合及可

靠性处理等技术,研制出600 μm/0.2 光纤连续输出3 kW的半导体激光光源,与机器人集成,应用于激光焊接<sup>[81-82]</sup>,如图19所示。

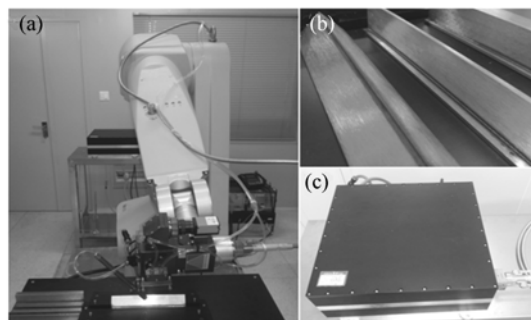


图19 (a)半导体激光源进行不锈钢无焊料焊接图;(b)不锈钢焊接样品;(c)半导体激光源

Fig. 19 (a) Direct diode laser sources for stainless steel welding without any solders; (b) samples of laser welding; (c) diode laser source

(3)集成多个微通道去离子水冷却激光迭阵,应用光束整形、激光合束、热管理、光束匀化等技术,并突破多层迭阵封装一致性及光束整形一致性关键技术,研制出万瓦级直接输出半导体激光光源,输出光斑尺寸2.5 mm×18 mm,功率密度达22 kW/cm<sup>2</sup>,电光转换效率为46%,应用于激光熔覆、表面硬化等<sup>[63]</sup>,如图20所示。

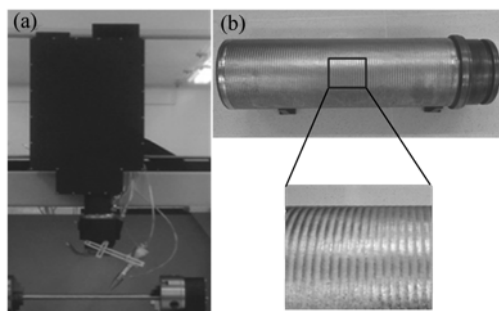


图20 (a)万瓦级半导体激光源激光熔覆图;(b)激光熔覆样品

Fig. 20 (a) Direct diode laser sources with ten thousands watts for laser cladding; (b) samples of laser cladding

##### 4.2 光谱合束光源

(1)在光谱合束方面,首先提出基于透射光栅的外腔反馈光谱合束半导体激光光源结构,具有耦合效率高、合束单元多的优势。并进行970 nm

波段 19 个激光单元(单 bar)的外腔反馈、波长锁定和光谱合束,获得功率 50.8 W、近似激光单元光束质量的激光输出<sup>[83]</sup>,实验验证了光谱合束结构的合理性,搭建实验平台及输出结果如图 21 所示。

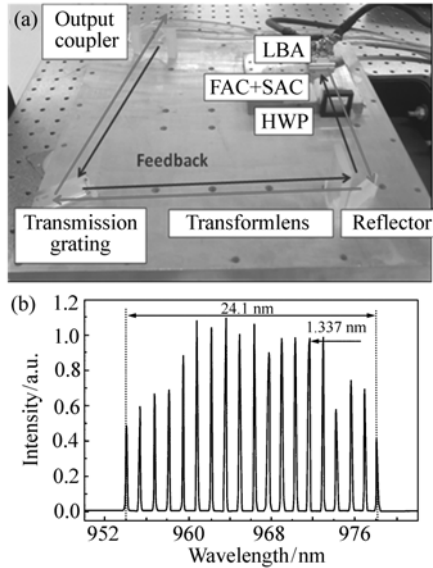


图 21 基于透射光栅的外腔反馈光谱合束结构(a)及光谱输出结果(b)

Fig. 21 SBC structure of external cavity feedback based on transmission grating (a) and output spectrum (b)

(2)随后进行了 808 nm 波段的光谱合束<sup>[84]</sup>,获得了相似的结果输出,说明该合束方式可应用在不同波段。

(3)为了实现更高的功率输出,在光谱合束方向叠加 3 个 bar,完成 970 nm 波段 57 个激光单元的光谱合束,功率和亮度均提高近 3 倍<sup>[85]</sup>,如

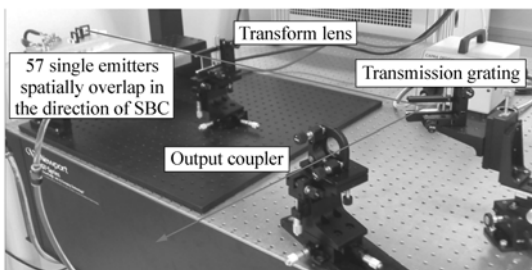


图 22 57 个激光单元光谱合束结构

Fig. 22 SBC structure of 57 single emitters

图 22 所示。

(4)相邻单元的波长间隔大(几纳米),一定波段范围内耦合单元数量少,限制功率和亮度的提高。为解决该问题,在腔内引入成像光学结构,对 3 个 808 nm 激光 bar 进行光谱合束,将波长间隔缩短至 0.22 nm<sup>[86]</sup>,输出光谱如图 23 所示,采用更高倍数的成像,可进一步压缩波长间隔,在额定的光谱范围内可实现更多的激光单元光谱合束。

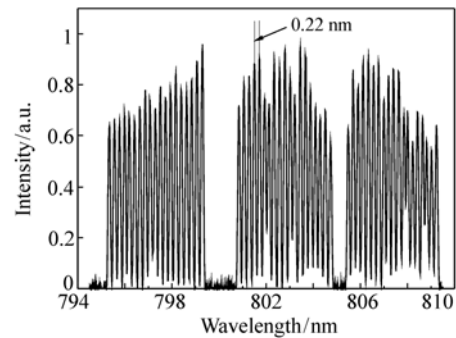


图 23 引入成像光学后的输出光谱

Fig. 23 Output spectrum of the SBC structure with the image optics

(5)为进一步实现光谱合束光源实用化,集成多个半导体激光线阵,综合应用光束整形、光谱合束、热管理、机械补偿等技术,研制出功率大于 200 W、高光束质量为 4.27 mm · mrad 半导体激光光源,如图 24 所示,并经受高低温、冲击振动等环境考验,突破半导体激光光谱合束光源工程化的关键技术。

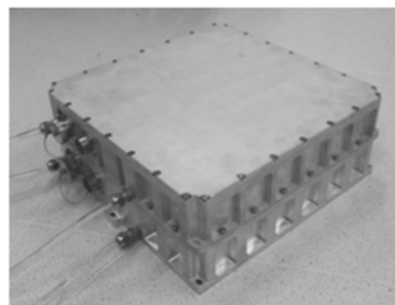


图 24 经过系列环境测试后的光谱合束光源结构

Fig. 24 SBC laser source after environmental testing

## 5 我国半导体激光器产业发展现状

(1)跟踪研究能力强,原创成果较少。我国处在半导体激光器发展的初期,紧跟国际最高水平潮流,基本上国外有研究报道后,我国就跟进研究并有相关的论文发表,取得了一些的重要突破,但是原创性的科研成果较少。

(2)研究速度快,产业化进程较慢。半导体激光器产业化是个投入大、见效慢的行业,而科研与产业工程化具有不同的特点,产学研实际结合不够紧密,国家政策导向和规划也不够明确,因此很少有人关注工程化中的大量技术积累,导致产业化进程较慢。

(3)激光器芯片核心技术差距大。主要体现在量子阱材料生长技术及激光芯片制备技术与国外差距大,导致“空心化”现象,在某些方面“有器无芯”,关键元件和核心知识产权依赖国外。

(4)激光器封装能力强,但高端产品少。由于激光器市场需求猛增,推动了激光器封装技术的发展,产生了以封装为主的企业,提高了我国的封装技术水平和能力。但是,核心技术突破不够,导致高端产品少。

(5)大尺寸元件加工能力强,但微光学及光栅等关键元件少。我国在尺寸较大的球面圆透镜、柱透镜方面具有较强的加工能力,国外多家光学元件供应商也直接在国内代工,但是,半导体激光光学系统中的快轴准直镜、慢轴准直镜阵列、匀光微透镜阵列、VBG及面光栅等关键光学元件目前完全依赖国外,国内有相关的研究报道,没有正式的产品出售。

对此,提出几点建议:

(1)进行大功率半导体激光器芯片结构设计、材料生长及工艺制备(尤其是腔面钝化处理)等关键技术攻关,解决半导体激光器芯片高功率下的寿命及可靠性问题,实现高端半导体激光器

芯片的国产化;

(2)开展微光学及光栅等关键光学元件的制备工艺研究,并转向产业化发展,提供可实用化的微光学元件,解决激光源中光学元器件的国产化问题,进而实现大功率半导体激光源整体的国产化;

(3)加快大功率半导体激光产业化发展,紧密结合产学研,并注重工程化技术积累,将科研成果转向产业化。

## 6 结束语

大功率半导体激光器正向着高光束质量、高亮度的方向快速发展,通过激光合束技术,已实现了 $360\text{ W}/0.6\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 、 $4\ 000\text{ W}/4\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 、 $8\ 000\text{ W}/6\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 的指标,达到了同功率下的 $\text{CO}_2$ 激光器和商用全固态激光器的输出水平,这也促使大功率半导体激光器从泵浦应用扩展至直接应用,结合其小体积、轻重量、高转换效率及宽光谱输出等特性。在材料加工领域,发展出了以半导体激光器为直接光源的新一代高效节能加工设备,并已应用在激光熔覆、表面强化及激光焊接等;在国防领域,发展的新一代小型、轻量激光对抗光源为车载、机载等机动性强的作战平台提供新的武器选择。

为进一步提升半导体激光源的输出性能,目前亟待解决如下问题:(1)高功率半导体激光单元的光束质量问题,探索获得近衍射极限输出的半导体激光单元新结构及新工艺,以激光亮度为考核指标,并重激光功率和光束质量;(2)发展光谱合束技术,解决其工程化问题,结合高亮度的激光单元技术,实现千瓦至万瓦及的高亮度半导体激光源,并探索新的合束技术。随着半导体激光单元亮度的提升和激光合束技术的成熟,无论是作为直接作用光源还是间接光源,大功率半导体激光器将在国防和工业领域获得重要应用。

### 参考文献:

- [1] OVERTON G, BELFORTE D A, NOGEE A, *et al.*. Laser Marketplace 2015: lasers surround us in the year of light [J]. *Laser Focus World*, 2015, 51(1): 32.
- [2] STICKLEY C M, FILIPKOWSKI M E, PARRA E, *et al.*. Future of high efficiency diode lasers [J]. *SPIE*, 2005, 5991: 599110.

- [3] STICKLEY C M, FILIPKOWSKI M E, PARRA E, *et al.*. Overview of progress in super high efficiency diodes for pumping high energy lasers[J]. *SPIE*, 2006, 6104:610405.
- [4] BACHMANN F. Goals and status of the German national research initiative BRIOLAS(brilliant diode lasers)[J]. *SPIE*, 2007, 6456:645608.
- [5] Osram Coordinates High-Brilliance Infrared Laser Project[EB/OL]. [2013-02-22]. <http://www.photonics.com/Article.aspx?PID=6&VID=107&IID=665&AID=53121>.
- [6] Brilliant Industrial Diode Laser[EB/OL]. [2014-03-31]. <http://www.bridle.eu>.
- [7] KANSKAR M, EARLES T, GOODNOUGH T J, *et al.*. 73% CW power conversion efficiency at 50 W from 970 nm diode laser bars[J]. *Electronics Lett.*, 2005, 41(5):245-247.
- [8] PETERS M, ROSSIN V, EVERETT M, *et al.*. High-power, high-efficiency laser diodes at JDSU[J]. *SPIE*, 2007, 6456:64560G.
- [9] CRUMP P, DONG W M, GRIMSHAW M, *et al.*. 100-W + diode laser bars show >71% power conversion from 790-nm to 1000-nm and have clear route to >85% [J]. *SPIE*, 2007, 6456:64560M.
- [10] CRUMP P, GRIMSHAW M, WANG J, *et al.*. 85% Power conversion efficiency 975-nm broad area diode lasers at 50 °C, 76% at 10 °C [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, Long Beach, California, USA, May 21, 2006:JWB24.
- [11] LI H, REINHARDT F, CHYR I, *et al.*. High-efficiency, high-power diode laser chips, bars, and stacks[J]. *SPIE*, 2008, 6876:68760G.
- [12] MARMO J, INJEYAN H, KOMINE H, *et al.*. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman[J]. *SPIE*, 2009, 7195:719507.
- [13] WALLACE J. Materials processing:100 kW fiber laser, power meter serve industry[J]. *Laser Focus World*, 2013, 49(12):13-14.
- [14] TOMM J W, ZIEGLER M, HEMPEL M, *et al.*. Mechanisms and fast kinetics of the catastrophic optical damage(COD) in GaAs-based diode lasers[J]. *Laser Photonics Rev.*, 2011, 5(3):422441.
- [15] WADE J K, MAWST L J, BOTEZ D, *et al.*. 8.8 W CW power from broad-waveguide Al-free active-region ( $\lambda = 805$  nm) diode lasers[J]. *Electron. Lett.*, 1998, 34(11):1100-1101.
- [16] KO H C, CHO M W, CHANG J H, *et al.*. A new structure of 780 nm AlGaAs/GaAs high power laser diode with non-absorbing mirrors[J]. *Appl. Phys. A*, 1999, 68(4):467.
- [17] RESSEL P, ERBERT G, ZEIMER U, HAUSLER K, *et al.*. Novel passivation process for the mirror facets of high-power semiconductor diode lasers[J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2005, 17(5):962964.
- [18] MORITA T, NAGAKURA T, TORII K, *et al.*. High-efficient and reliable broad-area laser diodes with a window structure [J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2013, 19(4):1502104.
- [19] CRUMP P, BLUME G, PASCHKE K, *et al.*. 20W continuous wave reliable operation of 980 nm broad-area single emitter diode lasers with an aperture of 96  $\mu\text{m}$ [J]. *SPIE*, 2009, 7198:719814.
- [20] GAO W, XU Z T, CHENG L S, *et al.*. High power high brightness single emitter laser diodes at axcel photonics[J]. *SPIE*, 2008, 6876:68761F.
- [21] DEMIR A, PETERS M, DUESTERBERG R, *et al.*. 29.5 W Continuous wave output from 100  $\mu\text{m}$  wide laser diode[J]. *SPIE*, 2015, 9348:93480G.
- [22] ZORNA M, HULSEWEDE R, SCHULZE H, *et al.*. New developments of high-power single emitters and laser bars at JENOPTIK[J]. *SPIE*, 2009, 7918:79180S.
- [23] MODAK P, GOUTAIN E, BAMBRICK D, *et al.*. 253 mW/ $\mu\text{m}$  maximum power density from 9xx nm epitaxial laser structures with d/T greater than 1  $\mu\text{m}$ [C]. IEEE 21st Int. Semicond. Laser Conf. Digest, Sorrento, Italy, September 14-18, 2008:135-136.
- [24] YALAMANCHILI P, ROSSIN V, SKIDMORE J, *et al.*. High-power, high-efficiency fiber-coupled multimode laser-diode pump module(9XX nm) with high-reliability[J]. *SPIE*, 2008, 6876:687612.

- [25] CRUMP P,RODER C,STASKE R,*et al.*. Limitations to peak continuous wave power in high power broad area single emitter 980 nm diode lasers[J]. *Electronics Lett.*,2008,44(21):1253-1255.
- [26] CRUMP P,WENZEL H,ERBERT G,*et al.*. Progress in increasing the maximum achievable output power of broad area diode lasers[J]. *SPIE*,2012,8241:82410U.
- [27] LICHTENSTEIN N,KREJCI M,MANZ Y,*et al.*. Recent developments for BAR and BASE; setting the Trends[J]. *SPIE*,2007,6876:68760C.
- [28] XU Z,GAO W,CHENG L,*et al.*. Highly reliable, high brightness, 915 nm laser diodes for fiber laser applications[J]. *SPIE*,2008,6909:69090Q.
- [29] LI H X,REINHARDT F,CHYR I,*et al.*. High-efficiency, high-power diode laser chips, bars, and stacks[J]. *SPIE*,2008,6876:68760G.
- [30] LI H X,CHYR I,JIN X,*et al.*. >700 W continuous-wave output power from single laser diode bar[J]. *Electron. Lett.*,2007,43(1):27-28.
- [31] LORENZEN D,SCHRDER M,MEUSEL J,*et al.*. Comparative performance studies of indium and gold-tin packaged diode laser bars[J]. *SPIE*,2006,6104:610404.
- [32] CRUMP P,WANG J,CRUM T,*et al.*. >360 W and >70% efficient GaAs-based diode Lasers[J]. *SPIE*,2005,5711:21-29.
- [33] ICHTENSTEIN N,MANZ Y,MAURON P,*et al.*. 325 Watt from 1-cm wide 9xx Laser bars for DPSSL- and FL-applications[J]. *SPIE*,2005,5711:1-11.
- [34] BRAUNSTEIN J,MIKULLA M,KIEFER R,*et al.*. 267 W cw AlGaAs/GaInAs diode laser bars[J]. *SPIE*,2000,3945:17-22.
- [35] MIYAJIMA H,KAN H,KANZAKI T,*et al.*. Jet-type, water-cooled heat sink that yields 255-W continuous-wave laser output at 808 nm from a 1-cm laser diode bar[J]. *Opt. Lett.*,2004,29(3):304-306.
- [36] CRUMP P,FREVERT C,BUGGE F,*et al.*. Progress in high-energy-class diode laser pump sources[J]. *SPIE*,2015,9348:93480U.
- [37] CRUMP P,FREVERT C,HOSLER H,*et al.*. Cryogenic ultra-high power infra-red diode laser bars[J]. *SPIE*,2014,9002:90021I.
- [38] CRUMP P,CKTERAI M,SCHULTZ C M,*et al.*. Studies of limitations to lateral brightness in high power diode lasers using spectrally-resolved mode profiles[C],IEEE International Semiconductor Laser Conference,Meli-Palas Atenea,Palma de Mallorca Spain,September 7-10,2014:23-24.
- [39] SVERDLOV B,PFEIFFER H U,ZIBIK E,*et al.*. Optimization of fiber coupling in ultra-high power pump modules at  $\lambda = 980$  nm[J]. *SPIE*,2013,8605:860508.
- [40] SMITH G M,DONNELLY J P,MISSAGGIA L J,*et al.*. Slab-coupled optical waveguide lasers and amplifiers[J]. *SPIE*,2012,8241:82410S.
- [41] DOGANA M,SMITHB G M,MISSAGGIA L J,*et al.*. Dense array slab-coupled optical waveguide laser capable of 500 W/bar[J]. *SPIE*,2014,8965:89650L.
- [42] FIEBIG C,BLUME G,KASPARI C,*et al.*. 12 W high-brightness single-frequency DBR tapered diode laser[J]. *Electronics Lett.*,2008,44(21):1253-1255.
- [43] REDMOND S M,CREEDON K J,KANSKY J E. Active coherent beam combining of diode lasers[J]. *Opt. Lett.*,2011,36(6):999-1001.
- [44] MISSAGGIA L J,REDMOND S M,BRATTAIN M A,*et al.*. Advanced packaging of high-power slab-coupled optical waveguide laser and amplifier arrays for coherent beam combining[C]. CLEO, San Jose, CA, USA, May 16-21, 2010: CThX4.
- [45] HUANG R K,CHANNA B,MISSAGGIA L J,*et al.*. Coherently combined diode laser arrays and stacks[C]. CLEO/QELS, Baltimore, Maryland, USA, June 2-4, 2009: CWF1.
- [46] HEINEMANN S,LEWIS B,REGAARD B,*et al.*. Single emitter based diode lasers with high brightness, high power and

- narrow linewidth[J]. *SPIE*,2011,7918:79180M.
- [47] PRICE K,KARLSEN S,LEISHER P,*et al.*. High brightness fiber coupled pump laser development[J]. *SPIE*,2010,7583:758308.
- [48] DUESTERBERG R,XU L,SKIDMORE J A,*et al.*. 100 W High-brightness multi-emitter laser pump[J]. *SPIE*,2011,7918:79180V.
- [49] GAPONTSEV V,MOSHEGOV N,TRUBENKO P,*et al.*. High-brightness 9XX-nm pumps with wavelength stabilization [J]. *SPIE*,2010,7583:75830A.
- [50] PIERER J,LUTZELSCHWAB M,GROSSMANN S,*et al.*. Automated assembly processes of high power single emitter diode lasers for 100 W in 105  $\mu\text{m}$ /NA 0.15 fiber module[J]. *SPIE*,2011,7918:79180I.
- [51] SCHRODER D,WERNER E,FRANKE A,*et al.*. Roadmap to low cost, high brightness diode laser power out of the fiber [J]. *SPIE*,2010,7583:758309.
- [52] werner m,wessling c,hengesbach s,*et al.*. 100 W/100  $\mu\text{m}$  passively cooled, fiber coupled diode laser at 976 nm based on multiple 100  $\mu\text{m}$  single emitters[J]. *SPIE*,2009,7198:71980P.
- [53] LIU R,JIANG X C,YANG T,*et al.*. High brightness 9xxnm fiber coupled diode lasers[J]. *SPIE*,2015,9348:93480V.
- [54] TIMMERMANN A,BARTOSCHOWSKI D,SCHLUTER S,*et al.*. Intensity increasing up to 4 MW/cm<sup>2</sup> with BALBs via wavelengths coupling[J]. *SPIE*,2009,7198:71980X.
- [55] VOB M,MEINSCHIEN J,BRUNS P,*et al.*. High brightness fibre coupled diode lasers of up to 4-kW output power for material processing[J]. *SPIE*,2012,8241:824103.
- [56] WOLF P,KOHLER B,ROTTER K,*et al.*. High-power, high-brightness and low-weight fiber coupled diode laser device [J]. *SPIE*,2011,7918:79180O.
- [57] KOHLER B,SEGREF A,WOLF P,*et al.*. Multi-kW high-brightness fiber coupled diode laser[J]. *SPIE*,2013,8605:86050B.
- [58] STROHMAIER S,TILLKORN C,OLSCHOWSKY P,*et al.*. High-power, high-brightness direct-diode lasers[J]. *Optics & Photonics News*,2010,21(10):25-29.
- [59] LASERLINE[EB/OL]. [2013-05-07]. <http://www.laserline.com>.
- [60] MALCHUS J,KRAUSE V,REHMANN G,*et al.*. A 40 kW fiber-coupled diode laser for material processing and pumping applications[J]. *SPIE*,2015,9348:934803.
- [61] MALCHUS J,KRAUSE V ,KOESTERS A,*et al.*. A 25 kW fiber-coupled diode laser for pumping applications [J]. *SPIE*,2014,8965:89650B.
- [62] MATTHEWS D G,KLEINE K,KRAUSE V,*et al.*. A 15 kW Fiber-coupled diode laser for pumping applications [J]. *SPIE*,2012,8241:824103.
- [63] 朱洪波,张金胜,马军,等. 10 kW 连续输出半导体激光熔覆光源[J]. *光学精密工程*,2013,21(4):829-833.  
ZHU H B,ZHANG J SH,MA J,*et al.*. 10 kW CW diode laser cladding sources[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,21(4):829-833. (in Chinese)
- [64] KELEMEN M T,WEBER J,KAUFEL G,*et al.*. Tapered diode lasers at 976 nm with 8 W nearly diffraction limited output power[J]. *Electron. Lett.*,2005,41,(18):1011-1013.
- [65] PASCHKE K,SUMPF B,DITTMAR F,*et al.*. Nearly-diffraction limited 980 nm tapered diode lasers with an output power of 7.7 W[J]. *IEEE*,2005,11:1223-1227.
- [66] DITTMAR F,SUMPF B,FRICKE J,*et al.*. High-power 808 nm tapered diode lasers with nearly diffraction-limited beam quality of  $M^2 = 1.9$  at  $P = 4.4$  W[J]. *IEEE*,2006,18:601-603.
- [67] HASLER K H,SUMPF B,ADAMIEC P,*et al.*. 5-W DBR tapered lasers emitting at 1060 nm with a narrow spectral linewidth and a nearly diffraction-limited beam quality[J]. *IEEE*,2008,20(19):1648-1650.
- [68] UNGER A,UTHOFF R,STOIBER M,*et al.*. Tailored bar concepts for 10 mm-mrad fiber coupled modules scalable to kW-class direct diode lasers[J]. *SPIE*,2015,9348:934809.
- [69] FRITSCHKE H,KRUSCHE B,KOCH R,*et al.*. High brightness, direct diode laser with kW output power[J]. *SPIE*,



- 2014,8965:89650G.
- [70] DIRECTPHOTONICS[EB/OL]. [2014-06-07]. <http://www.directphotonics.com>.
- [71] HENGESBACH S, KRAUCH N, HOLLY C, *et al.*. High-power dense wavelength division multiplexing of multimode diode laser radiation based on volume Bragg gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(16):3154-3157.
- [72] FRICKE J, CRUMP P, DECKER J, *et al.*. High-brilliance diode lasers with monolithically-integrated surface gratings as sources for spectral beam combining[C]. High Power Diode Lasers and Systems Conference, Coventry, United Kingdom, October 16-17, 2013:2-3.
- [73] CHANN B, GOYAL A K, FAN T Y, *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]. *Optics Lett.*, 2006, 31(9):1253-1255.
- [74] ROH S D, GRASSO D M, SAMLL J A. Very high brightness, fiber coupled diode lasers[J]. *SPIE*, 2009, 7198:71980Y.
- [75] FARMER J N, LOWENTHAL D D, PIERCE J W. Incoherent beam combination of diode laser bars[C]. LEOS, San Francisco, USA, November, 8-11, 1999:796-797.
- [76] DANEU V, SANCHEZ A, FAN T Y, *et al.*. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity[J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25(6):405-407.
- [77] CHANN B, HUANG R K, MISSAGGIA L J, *et al.*. Near-diffraction-limited diode laser arrays by wavelength beam combining[J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(16):2104-2106.
- [78] GOPINATH J T, CHANN B, FAN T Y, *et al.*. 1450-nm high-brightness wavelength-beam combined diode laser array[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(13):9405-9410.
- [79] TERADIODE[EB/OL]. [2013-07-05]. <http://www.teradiode.com>.
- [80] HECHT J. Beam combining cranks up the power[J]. *Laser Focus World*, 2012, 48(6):41-43.
- [81] ZHANG J, PENG H Y, LIU Y, *et al.*. Fiber-coupled diode laser flexible processing source for metal sheet welding[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2012, 33(8):895-900.
- [82] 张志军, 刘云, 缪国庆, 等. 2 kW 半导体激光加工光源[J]. *发光学报*, 2013, 34(3):334-339.  
ZHANG ZH J, LIU Y, MIAO G Q, *et al.*. The 2 kW Semiconductor laser processing light[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013, 34(3):334-339. (in Chinese)
- [83] ZHANG J, PENG H Y, FU X H, *et al.*. CW 50W,  $M^2 = 10.9$  Diode laser source by spectral beam combining based on a transmission grating[J]. *Opt. Express*, 2013, 2(3):3627-3632.
- [84] 彭航宇, 张俊, 付喜宏, 等. 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.  
PENG H Y, ZHANG J, FU X H. High-efficiency external cavity spectral-beam-combined diode laser array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2013, 40(7):0702015. (in Chinese)
- [85] 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.  
ZHANG J, PENG H Y, CAO J SH, *et al.*. 970 nm Hundred-watt level diode laser source by wavelength beam combining with external cavity feedback[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11):1114001. (in Chinese)
- [86] ZHANG J, PENG H Y, LIU Y, *et al.*. Hundred-watt diode laser source by spectral beam combining[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2014, 11:125803

#### 作者简介:



王立军(1946—),男,吉林舒兰人,中国科学院院士,博士生导师,主要从事大功率半导体激光器及应用方面的研究。  
E-mail:wanglj@ciomp.ac.cn



张俊(1986—),男,重庆渝北人,博士,助理研究员,主要从事半导体激光线阵合束及应用方面的研究。E-mail:jzh\_ciomp@163.com



彭航宇(1983—),男,浙江黄岩人,博士,副研究员,主要从事大功率半导体激光合束及应用方面的研究。E-mail: imphy@163.com

## 《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊, A4 开本; 刊号: ISSN 2095-1531/CN 22-1400/04; 国内外公开发行人, 邮发代号: 国内 12-140, 国外 BM6782。

- ★ 荷兰 Scopus 数据库
- ★ 美国《乌利希国际期刊指南》
- ★ 美国《化学文献》
- ★ 波兰《哥白尼索引》
- ★ 俄罗斯《文摘杂志》
- ★ 中国精品科技期刊
- ★ 中国科技核心期刊
- ★ 中国光学学会会刊
- ★ 中国科技论文与引文数据库
- ★ 中国期刊全文数据库
- ★ 万方数字化期刊全文数据库
- ★ 中国科技期刊数据库
- ★ 中国光学期刊网数据库

**主要栏目:**微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

**发稿类型:**学术价值显著、实验数据完整的原创性论文; 研究前景广阔, 具有实用、推广价值的技术报告; 有创新意识, 能够反映当前先进水平的阶段性研究简报; 对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告; 以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

协办单位: 激光与物质相互作用国家重点实验室

编辑出版: 《中国光学》编辑部

投稿网址: <http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址: [chineseoptics@ciomp.ac.cn](mailto:chineseoptics@ciomp.ac.cn); [zgxcn@126.com](mailto:zgxcn@126.com)

联系电话: 0431-86176852; 0431-84627061      传      真: 0431-84627061

编辑部地址: 长春市东南湖大路 3888 号(130033)