

半导体激光器光栅外腔光谱合束技术研究进展

孟慧成^{1,2,3} 谭昊^{1,2} 李建民^{1,2} 卢飞^{1,2} 田飞^{1,2} 高松信^{1,2} 武德勇^{1,2}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

²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

³中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

摘要 半导体激光器由于受波导结构和芯片封装等因素的限制,其快慢轴方向上的光束质量差距较大,主要用作抽运源,即被当成亮度转换器使用,很难作为高亮度光源直接应用。介绍了提高输出光功率密度和输出光束质量的非相干合束技术——光栅外腔反馈光谱合束技术,以及近年来的国内外的的发展现状,梳理了半导体激光器外腔光谱合束技术发展的若干重要动向,为以后半导体激光器光谱合束技术的发展提供了参考。

关键词 激光光学; 光谱合束; 光栅; 外腔; 反馈; 半导体激光器

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.020003

Development of Spectral Beam Combining of Diode Laser by Grating and External Cavity

Meng Huicheng^{1,2,3} Tan Hao^{1,2} Li Jianmin^{1,2} Lu Fei^{1,2} Tian Fei^{1,2}

Gao Songxin^{1,2} Wu Deyong^{1,2}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

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

³Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract Due to the limitations of packaging, waveguide structure and other factors inducing the asymmetrical beam quality on fast and slow axis, diode laser is usually used as pump source and power converter, it is difficult for diode laser to be used as a high-brightness laser source directly. The development of an incoherent beam combining technology—external cavity feedback grating spectral beam combining, which could improve the output optical power density and output beam quality of semiconductor laser, is introduced. A number of important trends in the development of semiconductor laser spectral beam combining technology are summarised, which provides a reference for future development of semiconductor laser spectral beam combining technology.

Key words laser optics; spectral beam combining; grating; external cavity; feedback; diode laser

OCIS codes 140.3298; 050.1950; 140.2010; 140.3490

1 引言

虽然半导体激光器具有高转换效率、体积小、重量轻、可靠性高等优点,但是受其波导结构及芯片封装等因素的限制,光束质量变差和功率密度降低,这使得半导体激光器很难作为直接光源应用于工业加工和国防领域。如何获得高功率、高光束质量的直接半导体激光光源,成为了国际上亟待解决的技术问题,美国^[1]、

收稿日期: 2014-08-11; 收到修改稿日期: 2014-09-04; 网络出版日期: 2015-01-15

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: wdy@caep.com.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

德国^[2]已将其列入国家重大计划进行专项攻克,而激光合束技术被证明是解决该难题的关键技术。

目前国际上半导体激光器合束的主要方法有相干合束^[3]和非相干合束^[4-5]两类,相干合束能有效地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输出,需要合束阵列单元在光谱、相位、振幅及偏振态等方面严格控制。非相干合束技术是通过空间合束^[6]、波长合束^[7]和偏振合束^[8]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。相比于相干合束,非相干合束没有相位、光谱及振幅的要求,容易调试,是目前国际上半导体激光器合束的主要方法,但是受合束机理和所需光学器件的限制,以上3种合束方式并不能够实现理想的定标放大。空间合束增加功率的同时,合束输出的光束质量会有所降低,偏振合束和波长合束由于对合束器件膜系设计的偏振态的考虑,不能够实现很多激光单元的合束,提高倍数有限。

自从2000年美国麻省理工大学林肯实验室首次提出采用光栅-外腔的方法对半导体激光阵列或多个光纤激光器实行外腔光谱合束以来^[9],经过国内外十几年的研究,光栅-外腔光谱合束技术(SBC)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。

2 光栅外腔光谱合束的基本原理

相比于空间合束、波长合束和偏振合束而言,光谱合束是从半导体激光器内部激光振荡、增益竞争及外部光学元件的相互作用出发,实现单个合束单元的光谱锁定和合束输出,其具体的原理如图1所示。

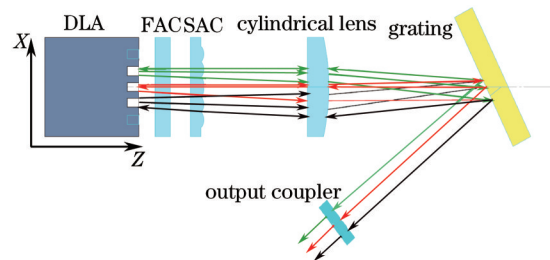


图1 光栅外腔反馈光谱合束原理图

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

由图1可见,光谱合束装置是由半导体激光器阵列(DLA)、快轴准直镜(FAC)、慢轴准直镜(SAC)变换柱透镜、光栅与外腔镜组成。半导体激光器的大发散角,会严重限制了半导体激光器阵列和叠阵的光谱合束,原因在于慢轴光束的发散,使得每个阵列单元之间形成交叉耦合,这种交叉耦合导致多旁瓣输出^[10],这些旁瓣属于高阶模式,包含50%左右的能量,快慢轴准直镜的作用是将快慢轴的发散角压缩到毫弧度量级。DLA和光栅分别位于柱头镜的前后焦面,外腔镜垂直于光栅衍射的-1级方向放置。激光阵列的中心单元与柱头镜的中心光轴、光栅的中心位于同一条直线上,不同合束单元的出射光束通过变换柱头镜,将空间位置转换成不同的入射角度投射到光栅上,不同合束单元的出射光束经过光栅衍射后以相同的衍射角度衍射合束,经由外腔镜输出。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再次经过光栅、变换透镜回到DLA,由于光栅的色散作用,反馈注入每个合束单元的波长略有差异。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,反馈注入的光束在外谐振腔内形成振荡。由于增益竞争的作用,不同的合束单元都以不同的波长运转,并且输出光束将沿中心单元在光栅上实现空间叠加,即功率叠加,且叠加后的输出光束与每个合束单元具有相同的光束质量,组合输出光束空间亮度较合束前会明显增加,实现了DLA输出光束质量的改善,具体的亮度和光束质量变化情况如图2所示。

一般半导体激光器的谱宽为2~3 nm,由图2可以看出,经过光谱合束之后谱宽变宽,因此光栅外腔光谱合束是以牺牲光谱亮度为代价的。光栅外腔光谱合束的结构除了如图1所示的闭环结构外,还有一种引入啁啾布拉格光栅(VBG)的开环结构。

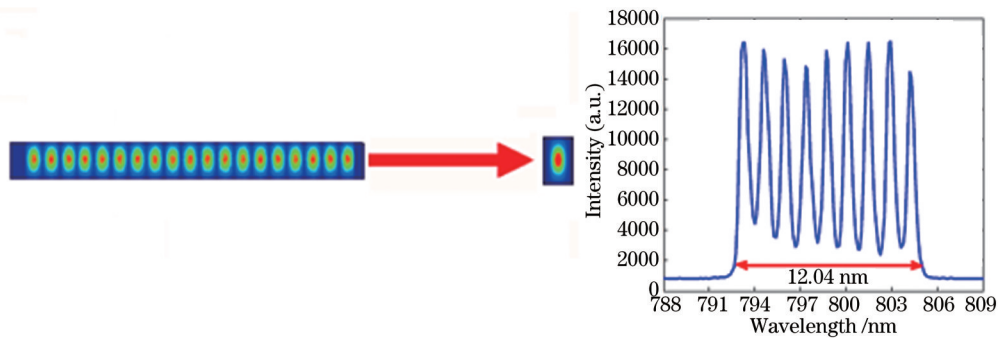


图2 理想的SBC后亮度的提高倍数与合束单元N相一致及光谱展宽

Fig.2 Ideal SBC showing N-fold brightness improvement and spectral extended

3 国内外发展状况

国内外研究机构近几年来开展了许多有关半导体激光器的光谱合束工作的研究,不同的激光单元结构和封装形式的SBC方案各有其特点与优势,本文对不同类型与结构的半导体激光器的SBC技术与发展现状进行了介绍。

3.1 单模输出半导体激光器

半导体激光器单管具有很好的光束质量,基于半导体激光器单管的SBC系统可以实现近衍射极限的激光输出。目前,常用于SBC的单模输出半导体激光器单管有两种:锥形半导体激光器(Taper)与板条耦合光波导激光器(SCOWL)。

3.1.1 锥形半导体激光器

锥形半导体激光器能够消除因散热不及时和灾变光学镜面损伤(COMD)带来的不良影响,克服了传统脊形或掩埋异质结构的单模半导体激光器在增大功率时激光光束质量恶化的缺点,且具有单横模式大的优点。

2010年德国夫琅禾费实验室和丹麦技术大学合作^[11],采用拥有12个锥形合束单元的半导体激光线阵[在连续波(CW)30 A时输出光功率为14.5 W,波长为980 nm]进行光栅外腔光谱合束实验,结构如图3所示,在驱动电流CW 30 A时得到光谱合束输出功率为9.3 W,光谱合束效率为63%,光束质量因子 M^2 约为5.3,与单个的合束单元在相同电流下自由运转时的慢轴 M^2 相当。

半导体激光器线阵进行光谱合束时,由于芯片封装应力造成Smile效应,在非合束方向上反馈光的错位、离轴直接降低有效反馈量甚至不形成有效反馈。为消除非合束方向对反馈效率的影响,该实验组在实验装置中引入一柱头镜 L_2 ,其作用是将快轴方向的光束聚焦于外腔镜上,消除由于芯片封装带来的Smile效应对反馈光强的影响,增强反馈作用,提高这个装置的稳定性。

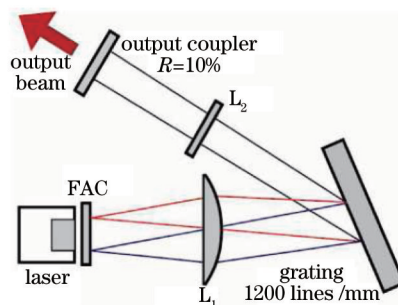


图3 基于锥形半导体激光器的SBC装置

Fig.3 Experimental setup of the SBC of the tapered diode laser

2013年该实验组还对两个分布布拉格反射(DBR)锥形半导体激光器单管利用VBG进行光谱合束,再将合束光束通过非线性晶体的三阶和频,获得了慢轴 $M^2 \approx 1.3$,快轴 $M^2 \approx 1.1$,输出功率为3.9 W,近衍射极限的绿光输出,谱宽在5 pm左右,光-光转换效率约为24.8%^[12],其结构示意图如图4所示。

由于锥形半导体激光器大的横模尺寸会导致输出光杂散以及高功率时影响单横模式输出的稳定性等问题,与普通的单模输出半导体激光器一样存在着增大有源区和模式之间的矛盾,未能得到广泛的使用。

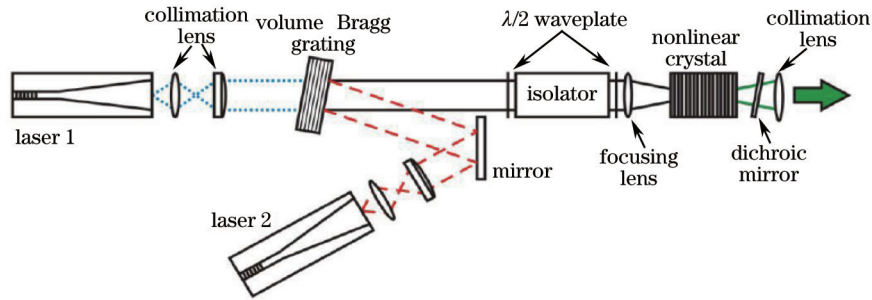


图4 DBR锥形激光器光谱合束及三阶和频示意图

Fig.4 Experimental setup for SBC of DBR -tapered diode lasers with subsequent sum frequency generation

3.1.2 板条耦合光波导激光器

SCOWL是一种新型结构的平面激光器,自2000年第一次报道以来,板条耦合光波导激光器一直是研究热点,其设计思想是基于高阶波导模式的板条耦合机理,即将一个高阶模式的光束转化成一个单模光束。借助多模波导管实现单空间模式的光束输出、光束质量近衍射极限且输出光斑近圆形。由于板条耦合光波导激光器为专利技术,拥有此项技术的机构很少,目前未有商业化产品可供购买,因此并未广泛应用于SBC技术中。目前国际上从事板条耦合光波导激光器光谱合束研究的只有美国麻省理工大学林肯实验室。

板条耦合光波导激光器电-光效率相对较低,在保持原有的光束质量不变的情况下,得到高功率、高亮度的激光输出,该实验室早在2005年就有关于板条耦合光波导激光器作为合束单元光谱合束的报道^[13]。2007年,又采用自行研制的波长为970 nm的板条耦合光波导激光器,在准连续运行时,通过光谱合束获得了 $M^2=1.2$ 、峰值功率为50 W的光谱合束输出,在连续运行时,获得了 $M^2=2$ 、功率为30 W的光谱合束输出,其结构示意图如图5所示^[14]。

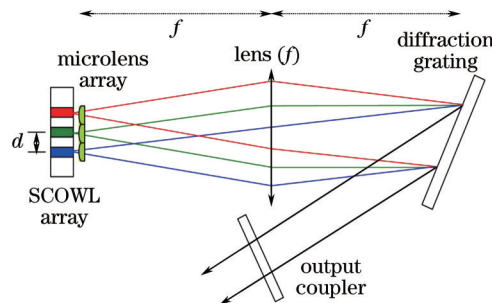


图5 基于SCOWL的SBC结构图

Fig.5 Experimental setup for SBC of SCOWL array

3.2 宽发射面半导体激光器

宽发射面半导体激光器电-光转换效率高、输出功率高,商用化的半导体激光器产品中多是宽发射面半导体激光器,在国际上有较多的机构从事宽发射面半导体激光器光谱合束研究,主要有德国波茨坦大学、美国Coherent公司、美国Aculight公司、美国TeraDiode公司、美国麻省理工大学林肯实验室和丹麦技术大学等。

2009年,Coherent公司采用5片、100/500 μm 的mini-bar封装的叠阵,分别进行了闭环与开环SBC实验^[15],并将合束后的激光耦合进100 μm 、数值孔径0.22的光纤中。在闭环实验中,光纤输出端得到了最高150 W的连续激光输出,在高驱动电流下,效率仍能接近90%;而在开环实验中,光纤输出端得到了最高130 W的连续激光输出,在高驱动电流下,效率仅为80%左右。

由实验结果分析,开环结构虽然具有紧凑的光路,但是由于啁啾VBG需要相当高的波长与控制精度,因此,在高驱动电流下啁啾VBG对半导体激光器波长的不完全控制会导致效率的急剧降低。而闭环结构虽然体积庞大,但是系统具有更好的稳定性,如图6所示。

对于宽发射面半导体激光器光谱合束来说,不管是开环结构还是闭环结构,都会有耦合腔的引入,最终获得合束的光束质量并不是理想的等同于单个合束单元的光束质量。另外对于宽发射面半导体激光器而言其本身发光单元的光束质量比较差,为了使得合束后的光束质量更加优于单个合束单元的光束质量,德

国波茨坦大学和丹麦技术大学提出了一种基于离轴反馈的光谱合束方法^[16-17]。

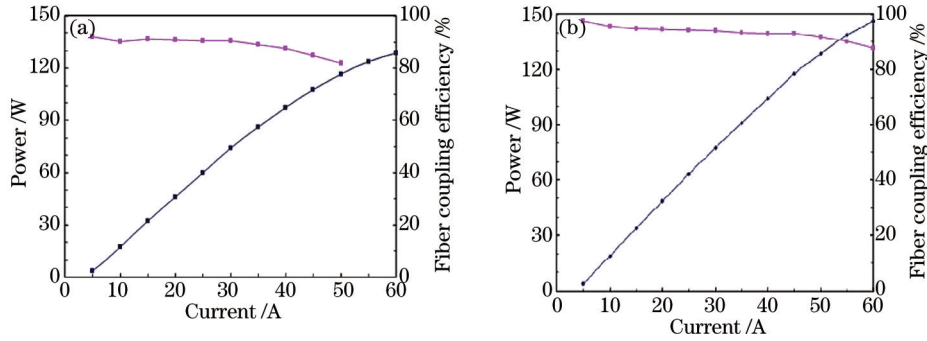


图6 基于(a)开环与(b)闭环结构的100 μm , 0.2 NA裸纤输出功率与效率曲线

Fig.6 Demonstration of power and efficiency from uncoated 100 μm , 0.2 NA fiber using

(a) open-loop and (b) closed-loop SBC

2009年丹麦技术大学 Vijayakumar^[18]等利用图7(a)所示的旁轴反馈对高功率宽发射面半导体激光器线阵(19个发光单元)采用离轴光谱合束技术,在30 A的工作电流下获得9 W的光功率输出,亮度为79 $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。合束之后快轴方向的光束质量因子 M^2 为1.9,慢轴方向 M^2 为6.4。相比于单个发光单元自由运转时的光束质量,慢轴方向的光束质量提高了5~6倍。

2010年 Jechow 等^[19]利用双光栅离轴反馈的方法进一步提高合束光束的光束质量,通过如图7(b)所示离轴反馈装置,慢轴方向的光束质量较单个发光单元自由运转时提高了6倍左右。

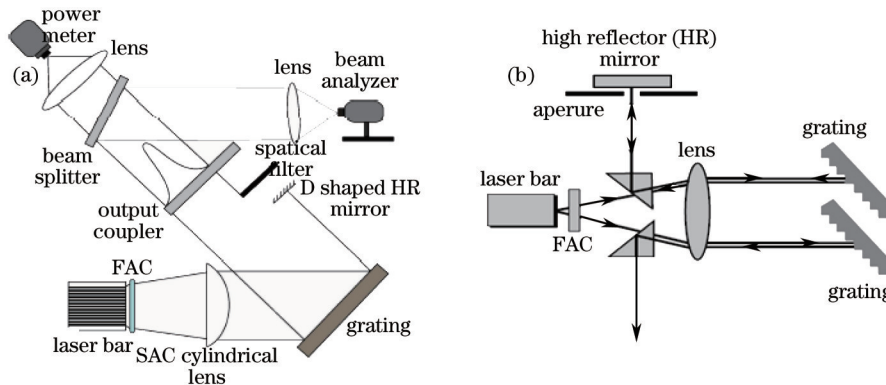


图7 离轴反馈(SBC)实验原理图。(a)单光栅;(b)双光栅

Fig.7 Schematic of the experimental setup of off-axis SBC. (a) Single grating; (b) two gratings

以上所提到的关于半导体激光器光谱合束技术都是以多个合束单元线性排列为前提的,2014年波茨坦大学的 Zink 等^[20]实现了基于单个半导体激光器发光单元的光栅外腔自锁定光谱合束实验,如图8(a)所示。实现了条宽1000 μm 的宽发射截面(BAL)半导体激光器光谱合束实验,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,如图8(b)所示。合束光束的快轴光束质量因子 $M^2 < 1.5$,慢轴 M^2 则由原来的125变为了 $M^2 < 3$,极大地改善了光束质量。

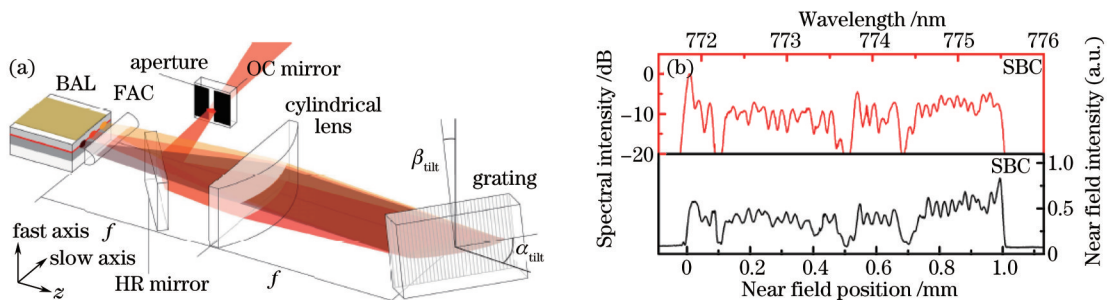


图8 (a)基于单个宽发射截面的SBC示意图;(b)输出光谱(红色)与近场强度分布(黑色)示意图

Fig.8 (a) Sketch of the SBC setup of a BAL; (b) spectral (red) and near field (black) intensity distribution of the BAL emission

目前国际上报道的关于外腔反馈光谱合束均是基于反射式衍射光栅,由于合束机理和空间限制,反射式光栅光谱合束结构中投射到光栅处的入射角和衍射角均与光栅设计的 Littrow 角有一些偏离,由此合束效率受到很大影响,同时受空间位置的限制,合束单元个数受到限制,不能够实现定标放大。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在此基础上提出了基于透射式光栅的外腔光谱合束结构,2013年该实验组实现了中心波长为 970 nm 的单个半导体激光阵列的光谱合束,合束光束慢轴 $M^2=10.9$,光电效率为 45%。同年,研制出了以中心波长为 970 nm,三激光阵列的光栅外腔反馈光谱合束半导体激光光源,实现连续激光功率为 140.6 W、光束质量为 $4.367 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 的激光输出^[21-22]。

国内关于半导体激光器光谱合束起步较晚,除了中国科学院长春光学精密机械与物理研究所以外还有北京工业大学,2014年该实验组将光束整形器件(BTS)引入到外腔反馈光谱合束中,减小 Smile 效应和慢轴发散角对合束的影响,较易实现单个发光单元的反馈锁定。对 19 个发光单元半导体激光阵列条进行光谱合束实验,获得了 58.8 W 的连续激光输出,光电效率高达 51%^[23-25]。合束后快轴 $M^2=1.3$,慢轴 $M^2=11.6$,光束质量等同于单个发光单元的光束质量。四川大学^[26]和中国工程物理研究院应用电子学研究所^[27]也做了一些相关研究,但都只是在技术可行性方面做了一个初步验证。

国内外有很多的研究机构从事光谱合束的研究,由于专利问题,都处在实验室研究阶段,没有推出相应的产品,只有美国 TeraDiode 公司在 2012 年利用林肯实验室的技术,推出了 3 款光谱合束直接半导体激光光源^[28],如表 1 所示。

表 1 TeraDiode 公司 SBC 高亮度直接半导体激光光源
Table 1 Direct diode laser source by SBC from TeraDiode

Company	Power /W	Fiber /NA	λ - stabilized	Brightness /[MW/($\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$)]
TDI2000W	2030	50 mm/0.15	yes	1468
TDI1000W	940	50 mm/0.14	yes	778
TDI450W	480	100 mm/0.10	yes	194

2 kW 尾纤输出的光谱合束直接半导体激光光源的光光参量积(BPP)为 $3.75 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,亮度可以与目前同等量级的工业应用的光纤激光器及 CO_2 激光器相比拟,是目前同等量级的直接半导体激光光源 10~30 倍。由于每个合束单元利用外腔来反馈注入锁定在不同的波长工作,中心波长是很稳定的不会随着电流和温度的变化出现漂移。TeraDiode 公司利用 2 kW 技术欲实现 4、6、8、10 kW 尾纤输出高亮度激光光源,如图 9 所示。

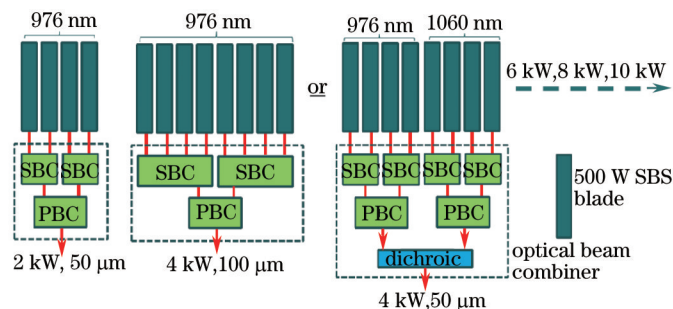


图 9 高亮度 SBC 直接激光光源原理示意图

Fig.9 Sketch of the high brightness direct laser source by SBC

4 展 望

SBC 技术最大的优点就是可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大多是宽发射面结构,受其波导结构和封装的限制,不能够达到衍射极限输出,与此同时 SBC 技术所得到的合束输出光束的光束质量与单个激光单元光束质量还有一定差距,需对变换透镜、衍射光栅等元件的参数和特性进行进一步研究,以获得与激光单元相同的光束质量输出,或者采取离轴反馈形式的光谱合束方式来提高光束质量,同时发展具有高光束质量的单元器件,如 Taper 激光器、板条耦合光波导激光器等。

由于光栅损伤阈值及光谱合束机理的限制,即使采用透射光栅光谱合束结构,参与合束的合束单元个数仍有限,可以将光谱合束与波长合束、偏振合束相结合,从此增加合束单元个数从而得到高功率、高光束

质量的激光输出。

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)[C]. Proceedings of an Overview in 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. Spatial coherent measurement of multiple coherent laser combination[C]. SPIE, 2011, 6723: 67232G.
- 4 Zhang Jun, Peng Hangyu, Wang Lijun. High power diode laser beam combining technology and applications[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3193-3197.
张 俊, 彭航宇, 王立军. 半导体激光光束技术及应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3193-3197.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 Tso Yee Fan, Antonio Sanchez, Vincenzo Daneu, *et al.*. Laser beam combining for power and brightness scaling[J]. IEEE Aerospace Conf Proc, 2000, 3: 49-54.
- 10 Xiao Y, Brunet F, Kanskar M, *et al.*. 1-kilowatt CW all-fiber laser oscillator pumped with wavelength-beam-combined diode stacks[J]. Optics Express, 2012, 20(30): 3296-3301.
- 11 Deepak Vijayakumar, Ole Bjarlin Jensen, Ralf Ostendorf, *et al.*. Spectral beam combining of a 980 nm tapered diode laser bar[J]. Optics Express, 2010, 18(2): 893-898.
- 12 Müller A, Jensen O B, Hasler, K -H, *et al.*. Efficient concept generating 3.9 W of diffraction-limited green light with spectrally combined tapered diode laser[C]. SPIE, 2013, 8604: 860404.
- 13 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.
- 14 Huang R K, Chann B, Missaggia L J, *et al.*. High brightness wavelength beam combined semiconductor laser diode arrays[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(4): 209-211.
- 15 Roh S D, Grasso D M, Small J A. Very high brightness, fiber coupled diode lasers[C]. SPIE, 2009, 7198: 7198Y0.
- 16 Andreas Jechow, Volker Raab, Ralf Menzel. High CW power using an external cavity for spectral beam combining of diode laser-bar emission[J]. Appl Opt, 2006, 45(15): 3545-3547.
- 17 Jensen O B, Thestrup B, Andersen P E, *et al.*. Near-diffraction-limited segmented broad area diode laser based on off-axis spectral beam combining[J]. Appl Phys B, 2006, B83(2): 225-228.
- 18 Deepak Vijayakumar, Ole Bjarlin Jensen, Birgitte Thestrup, *et al.*. 980 nm high brightness external cavity broad area diode laser bar[J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5684-5690.
- 19 Andreas Jechow, Danilo Skoczowsky, Mark Lichtner, *et al.*. High-brightness emission from stripe-array broad area diode lasers operated in off-axis external cavities[C]. SPIE, 2010, 7583: 758312.
- 20 Christof Zink, Nils Werner, Andreas Jechow, *et al.*. Multi-wavelength operation of a single broad area diode laser by spectral beam combining[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(3): 253-256.
- 21 Zhang Jun, Peng Hangyu, Fu Xi hong, *et al.*. CW 50 W/M²=10.9 diode laser source by spectral beam combining based on a transmission grating[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3627-3632.
- 22 Peng Hangyu, Zhang Jun, Fu Xihong, *et al.*. High-efficiency external cavity spectral-beam-combined diode laser array

- [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702015.
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.
- 23 Liu Bo, Zhang Xue, Han Junting, *et al.*. Wavelength beam combining of laser diode array by wavelength λ -chirped volume Bragg grating external cavity[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(7): 1057-1062.
刘波, 张雪, 韩军婷, 等. 波长啁啾体布拉格光栅外腔实现激光二极管阵列的波长光束组合[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(7): 1057-1062.
- 24 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.
- 25 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]. Optics Express, 2014, 22(15): 17804-17809.
- 26 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.
- 27 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.
- 28 Huang Robin K, Chann Bien, Burgess James, *et al.*. Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber, CO₂, and solid state lasers[C]. SPIE, 2012, 8241: 824102.

栏目编辑: 张雁