

激光与光电子学进展

半导体激光共孔径合成技术研究进展

傅芸^{1,2*}, 谭昊^{1,2}, 郭林辉^{1,2}, 张兰平^{1,2}, 蒋全伟^{1,2}, 高松信^{1,2}, 唐淳^{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

摘要 半导体激光功率的提升对于国防安全、激光通信、激光探测/传感、激光照明、医疗美容等领域有着重要的意义。半导体激光共孔径合成技术可以在保证光束质量的情况下大幅提升输出功率,近年来得到了广泛的关注。半导体激光共孔径光谱合成和半导体激光共孔径相干合成是两种典型的半导体激光共孔径合成技术手段,多家国内外机构在这两种技术上一再取得突破。本文综述了上述半导体激光共孔径合成技术的发展,并对该技术的发展前景进行了展望。

关键词 激光器与激光光学; 激光二极管; 激光共孔径合成; 半导体激光; 激光光谱合成; 激光相干合成

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221150

Review of Developments in Semiconductor Laser Beam Combining Technology

Fu Yun^{1,2*}, Tan Hao^{1,2}, Guo Linhui^{1,2}, Zhang Lanping^{1,2}, Jiang Quanwei^{1,2}, Gao Songxin^{1,2}, Tang Chun^{1,2}¹*Institute of Applied Electronics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;*²*Key Laboratory of High Energy Laser Science and Technology, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*

Abstract The power improvement of semiconductor lasers is of great significance to several fields, including those of national security, laser communication, laser detection/sensing, laser lighting, medical treatment. As the semiconductor laser beam combining technology can considerably improve the output power while ensuring the beam quality, it has attracted wide attention in recent years. Spectral beam combining (SBC) and coherent beam combining (CBC) are two typical semiconductor beam combining technologies, and many institutions have made breakthroughs in relevant research. In this paper, the development of these semiconductor laser beam combining technologies is reviewed and their prospect is discussed.

Key words laser and laser optics; diode lasers; laser beam combining; semiconductor lasers; spectral beam combining; coherent beam combining

1 引言

半导体激光器(LD)具有体积小、质量轻、电光效率高、寿命长、性能稳定、可靠性好等优点,被广泛应用于国防、通信、医疗等多个领域,促进了这些领域技术和产业的快速发展^[1]。然而,LD单管的输出功率低以及LD巴条/叠阵的输出光束质量差限制了其推广与应用。激光阵列合成是获得高功率、高光束质量激光输出的有效技术途径,其合成思想形成于1960年代气

体激光器的研究中^[2]。随着激光技术的不断发展,合成的概念得到了更多的实际应用,多光路激光合成获得高亮度光束的方法被广泛认可,并发展形成了多种合成方式^[2]。

提升LD输出功率最直接的方法是利用光束整形把多个激光单元的光斑拼接在一起^[3-4]。这种LD空间合成技术的典型代表为切割重排技术与光纤合束器合成技术。切割重排技术利用LD空间拼接光束分布呈矩形的特性,将光束沿长轴(一般为慢轴)切割,然后

收稿日期: 2022-03-30; 修回日期: 2022-05-13; 录用日期: 2022-06-13; 网络首发日期: 2022-06-23

基金项目: 基础加强项目(2020-JCJQ-245-12-03)、中国工程物理研究院创新发展基金

通信作者: *fy7133991@126.com

在短轴(一般为快轴)方向重排,达到两方向光束质量均衡的目的。光纤合束器技术把 LD 单管分别耦合进入光纤合成器($N \times 1$)的 N 个输入端,然后在输出端通过一根光纤输出,从而达到合成的目的。上述两种技术已趋于成熟,并且已经作为成熟的泵浦源技术广泛应用于以光纤激光器与固体激光器为代表的高功率激光器当中。但是,该方法的缺点也非常明显,即功率的提升伴随着输出光束质量的下降。因此,该技术无法有效提升输出激光的亮度,限制了直接 LD 在精密加工、长距离通信等领域的应用。

针对空间合成技术无法有效提升 LD 亮度的问题,国内外多家机构开展了大量的研究,发展出一系列 LD 共孔径合成方案。LD 共孔径合成通过光学/电学设计把多个低功率的激光单元在同一空间内进行强度/光场的有效叠加,在保持高功率输出的同时使得合成光的光束质量、中心光斑能量比等指标具有与单路 LD 子束可比拟的特性^[2]。LD 共孔径合成技术使得大功率直接 LD 应用成为可能,现有的 LD 共孔径合成技术已经可以制造千瓦级的 LD 激光系统,并已经应用于激光加工等领域。

LD 光束合成技术是一种系统级技术,其输出指标除了受合成系统所用光器件的影响之外,还依赖于 LD 单管的输出功率与光束质量。国内外多家机构通过外延结构设计及器件工艺提高了 LD 的光束质量,尤其是慢轴方向的光束质量,从而提高了单元器件的亮度^[1]。控制激光器慢轴模式的现有方式有减小慢轴方向脊形条宽、在激光器的波导层刻蚀结构、离子注入、种子振荡功率放大器结构(锥形激光器)等。德国 Fraunhofer IOF 在 2015 年实现了输出功率为 8 W、光束质量为 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、功率与光束质量比达到 $3.3 \text{ W}/(\text{mm} \cdot \text{mrad})$ 的单管 LD^[5-6]。美国 nLight 在 2016 年实现了输出功率近 13 W、光束质量为 $3 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、功率与光束质量比达到 $4.3 \text{ W}/(\text{mm} \cdot \text{mrad})$ 的 LD 单管^[7]。德国 FBH 研究所研制的波长分布式布拉格反射镜(DBR)锥形 LD 激光器,在连续输出功率为 11.4 W 时,转换效率为 44%,光束质量 $M^2(1/e^2) = 1.1$,光谱宽度为 13 pm;而 1060 nm 波长的 DBR 锥形激光器的连续输出功率为 12.2 W、光束质量 $M^2 = 1.2$ 时的功率为 10 W,其中主瓣功率占 70% 以上,线宽 17 pm[半峰全宽(FWHM)]^[11]。LD 单管的发展为后续 LD 合成技术的指标提升提供了强有力的器件支撑。

常见的 LD 共孔径合成方案可分为非相干合成与相干合成两种,其中非相干合成方案里最为典型的是利用波分复用的思想进行光谱合成。相干合成可以分为主动相控相干合成与外腔型相干合成两种方式。另外,把运用偏振分束器(PBS)的偏振合成技术也归为一种成熟的 LD 共孔径合成技术^[8],该技术已经广泛应用于现有的 LD 泵浦制造中,且可以与相干合成技术

与非相干合成技术进行复用。因此,本文将重点介绍光谱合成技术与相干合成技术近年来的研究进展,并对 LD 共孔径合成技术的发展前景进行展望。

2 LD 共孔径光谱合成

LD 共孔径光谱合成(SBC)的思想来源于波分复用。具体来讲,该技术把每个激光单元的输出波长固定在某一个范围内,并且在光谱上进行排布,同时通过光学元件设计使得这些不同波长的光实现共孔径非相干叠加,最终在不牺牲子单元光束质量的情况下实现输出功率的提升。LD 光谱合成的典型输出光谱图如图 1 所示,其中 n 个子单元分别对应不同的波长,在光谱上进行有序排列。LD 光谱合成是目前结构较简单、提升亮度幅度最大的 LD 共孔径合成方案,但这个技术牺牲了输出光谱宽度。

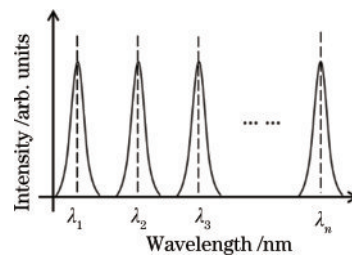


图 1 SBC 典型输出光谱示意图

Fig. 1 Diagram of typical optical spectrum of output from spectral beam combining (SBC)

SBC 技术可以分为稀疏光谱合成和密集光谱合成。稀疏光谱合成要求每个子单元本身的出光波长不相同,进而可以通过光学元件的选波功能使得子单元出光进行共孔径叠加。密集光谱合成则要求对每个激光单元进行锁波和光谱窄化,并进行光谱上的密排,同时通过光栅、体布拉格光栅(VBG)、二向色镜等光学元件实现子单元出光的共孔径叠加。

稀疏光谱合成主要运用的光学元件为光学滤波器(典型代表为二向色镜、体布拉格光栅)。由于滤波元件对某些波长进行反射而某些波长进行透射,所以可以进行串联式排布。如果要合成 n 个激光单元,则需要排布 $n-1$ 个滤波元件。但是,在这种方案中,激光单元的光谱没有做任何处理,因此谱宽较宽,且会随着外界环境温度的改变而改变。因此,子束之间的光谱间隔需设置得较宽,典型值需大于 25 nm ^[9]。并且最后一个滤波元件将承受所有子束的能量,因此该方案对于滤波器的功率承受能力要求较高^[9]。

密集光谱合成的关键技术包含波长锁定与共孔径叠加两个部分,如图 2 所示。波长锁定指运用 LD 外腔结构把每个激光单元的输出波长进行锁定和窄化,使其不受外界环境温度等因素的影响,同时减小输出线宽使得在有限的光谱宽度内有更多的子束排布。共孔径叠加则指的是通过光栅、VBG、特殊晶体、二向色

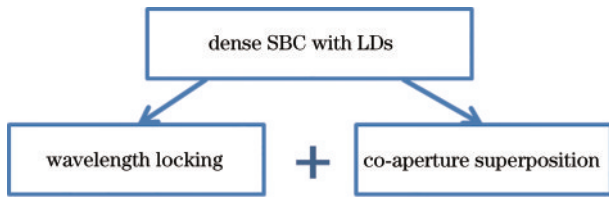


图 2 密集 SBC 的两个关键技术
Fig. 2 Two key parts of dense SBC

镜等器件使得波长锁定之后的子束光轴光瞳重叠。LD 密集光谱合成由于具有较好的环境适应性以及大通道数合成的可能性受到国内外机构的广泛关注,近年来在指标上不断取得突破。

由于锁波的外腔结构与共孔径叠加的方式不同,LD 密集光谱合成的技术方案可以大致分为开环光谱合成与闭环光谱合成^[10]。LD 开环光谱合成的波长锁定子系统与共孔径叠加子系统是分立的,由不同的光学元件实现;LD 闭环光谱合成采用的光学设计同时实现子单元光谱的锁定窄化以及各个子单元的共孔径叠加。

2.1 LD 闭环光谱合成

LD 闭环光谱合成是目前 SBC 技术中主流的技术方案,拥有输出亮度提升幅度大、结构简单、工程潜力大等优势。

目前,国外研究 LD 闭环光谱合成系统的机构主要有美国 MIT 林肯实验室、Aculight Corporation、Coherent Inc.、Teradiode 公司、Alfalight Inc.,德国 University of Potsdam、Fraunhofer 研究室、FBH 实验室,以及丹麦科技大学(DUST)等。国内的中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(CIOMP)、北京工业大学(BUT)、长春理工大学、华中科技大学、四川大学、中国工程物理研究院(CAEP)等机构也陆续对此方案开展了研究。LD 闭环光谱合成目前的输出指标已经达到千瓦级以上^[11]。

LD 闭环光谱合成的结构示意图如图 3 所示。波长选择结构与输出反馈对每个激光单元构成外

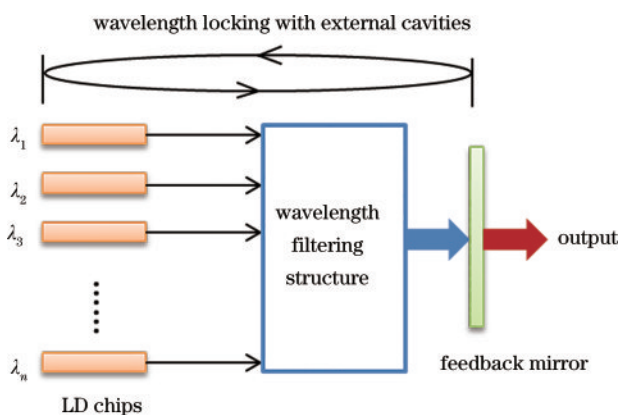


图 3 闭环 SBC 系统结构示意图
Fig. 3 System structure diagram of SBC with closed loop

腔,使得每个子单元的波长锁定在光谱的不同位置上;同时,波长选择结构也使得各个子束输出时光轴方向完全重叠,从而使得光场和强度均得到有效叠加。

波长选择结构中最典型的方案为衍射光栅与低反镜的组合,主要基于衍射光栅对不同波长的光有不同衍射角的特性对子束进行选波锁定,其子束光谱间隔完全取决于面光栅的衍射特性。基于光栅外腔的闭环光谱合成是目前光谱合成的研究热点,近期得到了长足的发展。而基于特殊滤波器、偏振晶体等结构的 LD 闭环光谱合成绕开了光栅结构,也可以得到较为突出的合成指标。因此,把 LD 闭环光谱合成分为光栅外腔型和其他类型进行简单介绍。

1) 基于光栅外腔的 LD 闭环光谱合成

基于光栅外腔的 LD 闭环光谱合成基本结构如图 4 所示。多个激光单元经过准直之后,以相同的指向性打向变换透镜,每一路透射光以不同的角度输入衍射光栅。衍射光栅的衍射光打向输出耦合镜,一小部分反馈至 LD 芯片实现外腔锁波,大部分实现合成输出。由于光栅的衍射效应,不同的激光单元锁定在不同的光谱位置上,最终在光谱上实现密集波复用,经过衍射光栅实现空间光叠加。

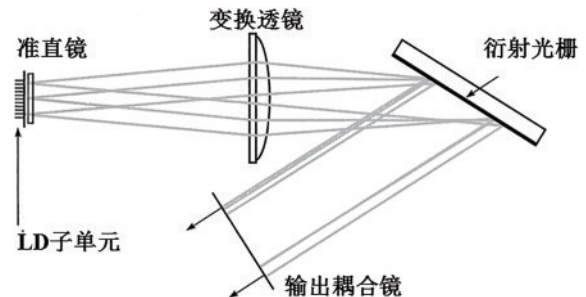


图 4 锁波-合成复合型 SBC 系统结构示意图^[9]
Fig. 4 Schematic diagram of SBC system with hybrid of wavelength-lock and superposition^[9]

该方案首先于 2000 年由美国 MIT 林肯实验室提出。该机构运用 11 个 $100\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ 的激光单元实现了 $\sim 4\ \text{W}$ 的合成输出,合成电光效率可以达到 50%,且合成的输出光束质量 M^2 约为 20。该方案运用的 LD 单管波长在 2050 nm 附近,光栅刻线为 600 line/mm,输出耦合镜的反射率为 10%。其输出光谱与输出功率如图 5 所示^[12-13]。

近 10 年来,随着 LD 芯片技术和光栅光谱合成技术的不断发展,LD 闭环光谱合成系统的输出指标得到了飞跃式的发展。表 1 罗列了 LD 光栅光谱合成的发展近况。从表中可以看出,近年来基于该方案的光谱合成技术发展迅猛,现有的最大功率为 2018 年 TRUMPF 公司报道的 4 kW,而国内现有最高合成功率为 2018 年中国工程物理研究院实现的 710 W。

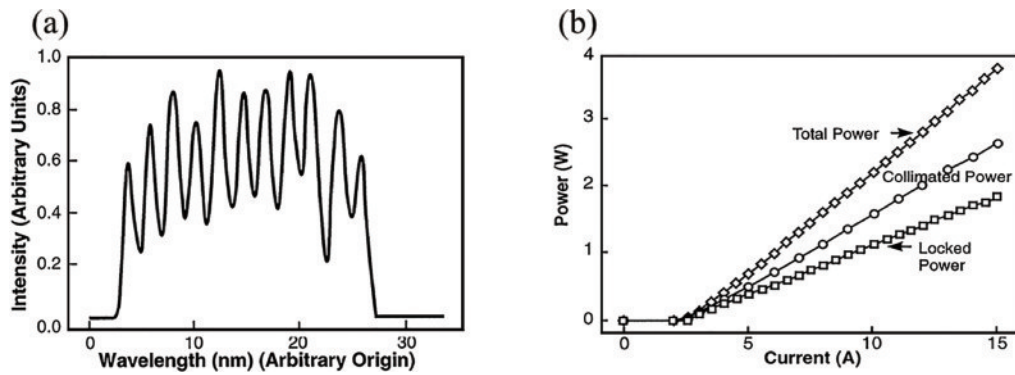
图5 基于11路单管的SBC系统特性。(a) 输出光谱;(b) 电流-功率曲线^[12]Fig. 5 Characteristics of SBC system with 11 laser diodes. (a) Output spectrum; (b) curve of output power versus input current^[12]

表1 闭环SBC技术发展近况

Table 1 Recent developments of SBC technology with closed loop

Year	Institution	Number of combining routes	Output power /W	Beam quality M^2	Reference
2000	MIT	4	11	~20	[13]
2004	Aculight	200	27	1.5	[14]
2006	MIT	100	35	1.35	[15]
2008	MIT	25	20	10	[16]
2008	Coherent	49	100	~16	[17]
2009	BUT	19	20.1	32	[18]
2009	DUST	12	9	6.4	[19]
2009	Coherent	50	146	32.5	[10]
2010	Fraunhofer	8	28 (pulse peak power)	2	[20]
2010	DUST	12	9.3	5.3	[21]
2012	Alfalight	19	200	76.2	[22]
2012	TeraDiode	-	2030	3.75	[23]
2013	CIOMP	19	50.8	10.9	[24]
2013	CIOMP	56	140.6	14.14	[25]
2013	DUST	2	3.9	1.3	[26]
2014	BUT	13	58.8	1.6	[27]
2015	CAEP	27	127	11.5	[28]
2017	CAEP	27	579.2	18.4	[29]
2017	CAEP	9	44	12.2	[30]
2018	CAEP	162	710	7.3	[31]
2018	TRUMPF	-	4000	50	[32]
2020	CIOMP	19	363.5	16.37	[33]
2021	Sichuan University	12	350	16.2	[34]
2021	Sichuan University	12	600	32.4	[35]

此外,为了提升LD光栅外腔闭环SBC技术的输出指标,国内外多家机构对系统进行了理论分析。四川大学于2007年分别分析了光束质量退化与变换透镜焦距、子束中心波长间隔、单元阵列封装误差之间的关系^[36],并于2009年分析了LD外腔面反射率、输出耦

合镜反射率、变换透镜透过率、闪耀光栅衍射效率对合成效率的影响^[37]。2017年,德国TRUMPF公司对影响合成光束质量的因素,包括自由运转光、smile效应、互锁效应进行了理论和实验方面的分析,为设计高亮度SBC系统提供了重要参考^[38]。而在2020年,海口大

学分析了镜面洁净度与合成效率之间的关系^[39],对合成系统走向工程化提供了一定的参考价值。综合上述分析,对合成效率影响较大的因素有外腔面的反射率、子束阵列的指向误差、光学透镜的透过率(包括镜面洁净度)、输出耦合镜反射率、闪耀光栅衍射效率、自由运转光等。对合成光束质量影响较大的因素有子束之间的串扰效应(互锁效应)、smile 效应、子束中心波长间隔等。单元阵列之间的封装误差对合成效率影响不大。

2) 基于其他元件的 LD 外腔光谱合成

利用光栅进行子束锁波固然是最简便且集成度最高的方法,但合成通道数的进一步拓展、合成效率的进一步增加以及光束质量的进一步优化却受到光栅尺寸、衍射效率及刻线数等因素的限制。基于此考虑,近年来国外研究机构开始探索其他具有选波效应的光学元件/光学结构对激光合成子单元进行锁波,以下介绍两个典型的方案。

美国 Nuburu 公司于 2018 年提出了基于光学薄膜滤波器(TFF)与输出耦合镜共同构成外腔对子束波长进行锁定的方案。该方案利用多个不同滤波范围的 TFF 对每个激光子单元构成较窄的滤波通道,从而实现多通道密集波长合成。这个方案当中的 TFF 还可以更换为 VBG^[40]。

2020 年,西班牙 Universitat Politècnica de Catalunya 提出了基于 Lyot 滤波器的光谱合成方案。该方案利用偏振相关晶体与输出耦合镜构成外腔,通过调节每个子束的偏振态实现不同波长的锁波。根据该报道,基于该结构可以实现 1.1 kW 的光谱合成输出,合成光谱的总宽度仅为 7 nm,可以耦合进入纤芯为 400 μm、数值孔径(NA)为 0.22 的光纤(光束质量 M^2 约为 150)^[11]。

2.2 LD 开环光谱合成

对于 SBC 系统而言,闭环光谱合成技术为主流的发展技术,拥有系统简单、集成度高等一系列优势,非常有助于其成本控制和工程化应用。但是,闭环光谱

合成方案把锁波和合成并在了同一个系统中完成,所有因素互相影响、互相牵制,对光学器件精度和系统调节精度的要求较高。

基于此考虑,许多研究结构把锁波系统和合成系统分离开,虽然增加了系统的复杂度,但反而更有利于大功率光谱合成系统的实现。典型的开环光谱合成如图 6 所示。表 2 罗列了 LD 开环光谱合成的研究进展,根据外腔锁波所用关键器件的不同,可以分为啁啾 VBG 锁波、衍射光栅锁波以及 TFF 外腔锁波三个大类。

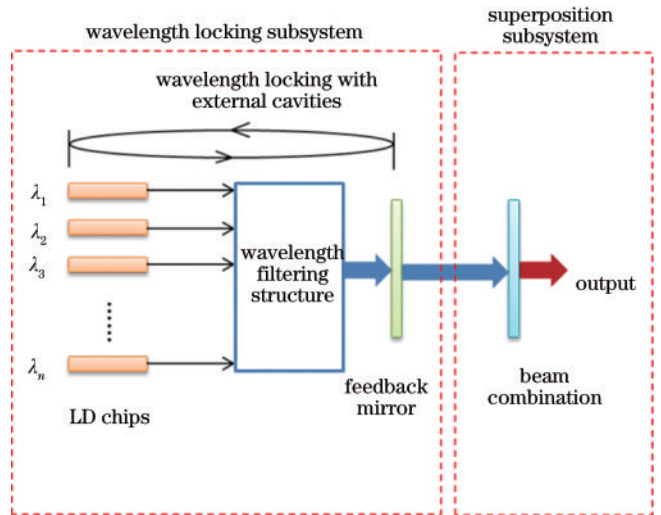


图 6 锁波-合成分离式 SBC 系统结构示意图

Fig. 6 System structure diagram of SBC with diverse of wavelength-lock and superposition

在表 2 所列出的众多 LD 开环 SBC 系统中,德国 TRUMPF 公司在 2017 年提出的千瓦级方案值得重点关注。该方案把具有选波功能的 TFF 与光栅结合起来,利用 TFF 在不同角度下滤波曲线不同的特点对每个子束进行锁波,然后利用光栅把多个子束的光轴进行叠加,实现共孔径合成,其系统结构如图 7 所示^[45]。

表 2 开环 SBC 技术发展近况

Table 2 Recent developments of SBC technology with open loop

Wavelength-lock device	Year	Institution	Output power /W	Number of combining routes	Beam quality M^2	Reference
Chirp VBG	2006	MIT	89.5	3	26	[41]
	2008	BUT	11.2	49	6	[42]
	2009	Coherent Inc.	130	50	32.5	[10]
Diffraction grating	2006	University of Potsdam	10	25	13	[43]
	2010		14	25	12	[44]
TFF	2017	TRUMPF	1100	230	19	[45]

上述系统对 230 路子束进行了光谱合成,实现了 1.1 kW 的合束输出,输出光束质量(两个方向) M^2 约为 19,其输出电光曲线和光斑分布如图 8 所示^[45]。该

方案证明了开环 SBC 技术与闭环 SBC 技术一样,拥有实现千瓦级直接 LD 激光输出的能力。

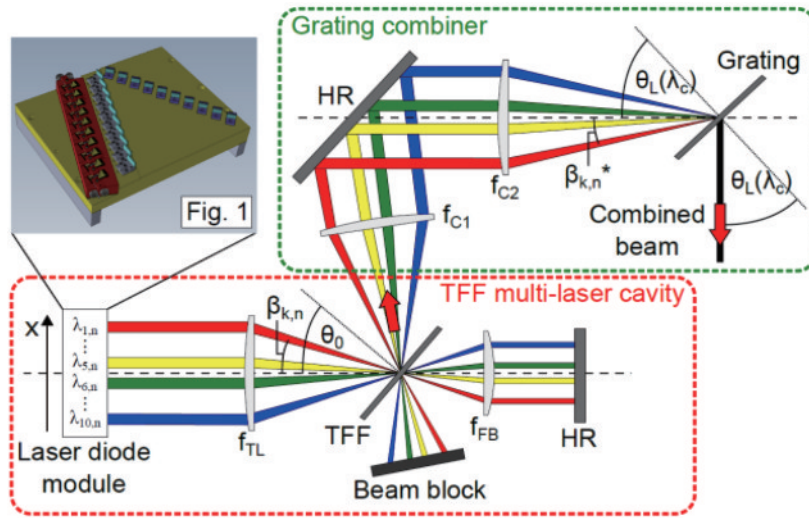


图 7 利用 TFF 对子束波长进行锁定,然后利用光栅进行共孔径叠加的 SBC 系统结构^[42]

Fig. 7 Diagram of SBC system based on wavelength-lock with TFF and superposition with optical gratings^[42]

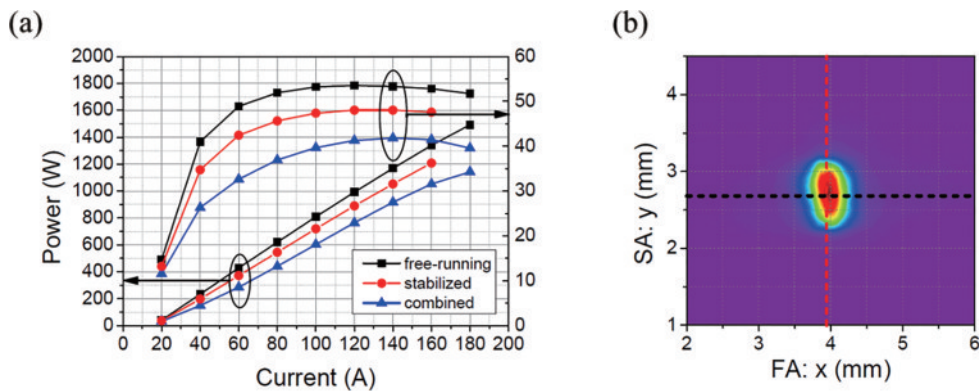


图 8 利用 TFF 的开环 SBC 输出特性^[45]。(a)电-光输出曲线;(b)光斑分布

Fig. 8 Output characteristics of SBC with open loop using TFF^[45]. (a) Output power versus input current; (b) light spot distribution

3 半导体激光共孔径相干合成

与 SBC 不同,LD 相干合成(CBC)把多个波长一致的高相干激光单元进行共孔径叠加,通过相干相长效应得到合成激光。20 世纪中后期,CBC 就被广泛提出,并有许多研究者进行了大量的研究,但由于当时 LD 的输出指标较差,这些系统没有得到较高指标的输出。而在 2010 年后,随着 LD 芯片技术的发展,以及通信、卫星、雷达等应用方向的牵引,CBC 技术得到了蓬勃的发展。

CBC 的输出激光线宽与子单元激光基本一致,且输出光的光束质量基本不发生退化,甚至于更优。但是,CBC 技术虽然在不牺牲光谱的情况下提升了输出亮度,但是系统相比于 SBC 技术结构更加复杂,且对 LD 单管的相干性和输出光束质量要求很高,这无疑增加了 LD 高效相干合成的难度。不过随着单模 LD 指标的不断提升,以及半导体芯片的不断发展,CBC 技术如今已经可以实现 >40 W 的直接 CBC 输出^[46]。

CBC 技术由相位锁定方式的不同可以分成两种

主要的技术路线,分别称为外腔型相干合成与主动相干相干合成两个大类。外腔型相干合成一般把多个激光单元锁定到一个外腔上实现锁相,而主动相干相干合成是通过对每一个子单元的输出相位进行主动的、人为的调控而实现的。两者的区别如图 9 所示^[47]。一般而言,主动相干相干合成需要一个窄线宽、高光束质量的种子光注入多个放大芯片,且需要电控手段对相位进行实时调节,但是外腔型相干合成仅需在光路上构建外腔即可。但是,虽然主动相干相干合成的系统结构比外腔型相干合成更为复杂,但系统鲁棒性更高,且相干合成效率以及输出功率也更高。

进行了相位锁定及调控之后,多个子束需要进行共孔径叠加。该部分可以通过两种方式实现,一种是直接通过波束形成的方式在远场进行叠加,另一种是通过光学设计使各路子束在近场进行叠加。显而易见的是,近场叠加相比远场叠加合成效率更高。近场叠加一般通过两种方式实现,第一种是通过合成镜片(包括 PBS、分束器等)实现,第二种是通过相位光栅实现,如图 10 所示。第一种方式光束质量退化较小,但随着

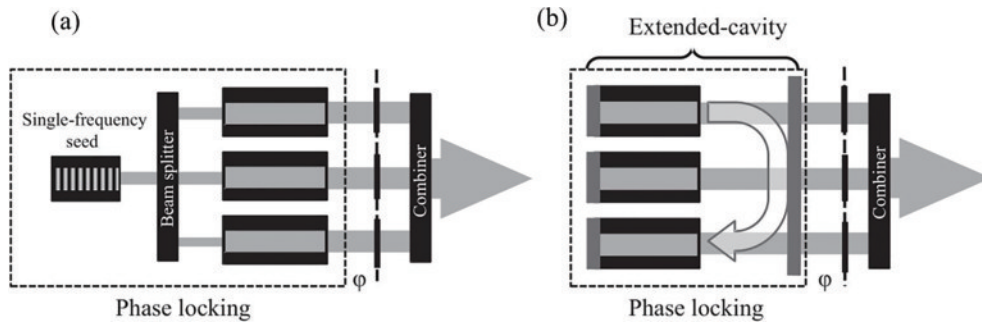


图 9 两种 CBC 相位锁定方案^[47]。(a)主动相位控制;(b)外腔锁相

Fig. 9 Two ways of CBC phase-lock^[47]. (a) Active phase control; (b) phase-lock with external cavity

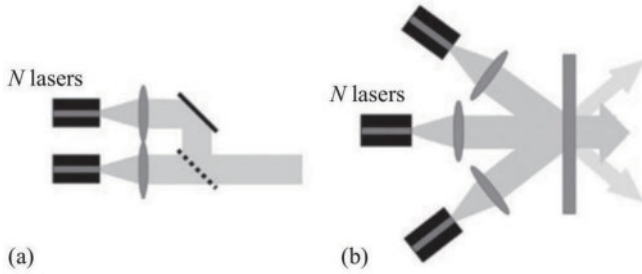


图 10 CBC 共孔径叠加方案^[47]。(a)基于分束器;(b)基于相位光栅

Fig. 10 Ways of CBC superposition^[47]. (a) Use of beam splitter; (b) use of phase grating

合成子束的增加,系统结构就越发复杂,且合成效率也不断降低;第二种方式系统集成度高,但相位光栅

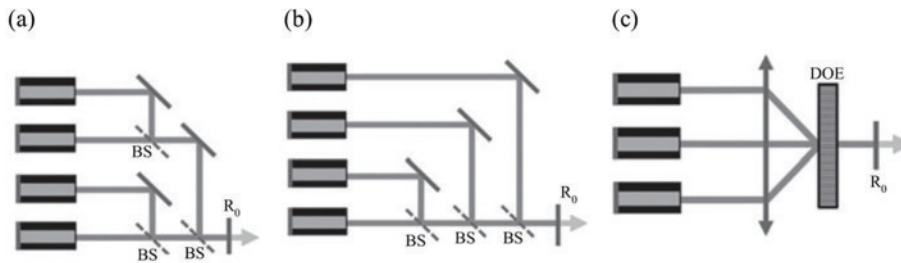


图 11 外腔构建方案^[47]。(a)二叉树型;(b)串联型;(c)DOE 型

Fig. 11 Construction ways of external cavity^[47]. (a) Binary tree; (b) cascaded; (c) DOE

外腔型 CBC 技术可以从外腔构建的方式分为相位外腔型和偏振外腔型。相位外腔型一般利用 Talbot 效应、远场角度滤波、相位光栅等方式构建外腔,通过外腔构成的相位选择条件对激光光子单元进行相位锁定。偏振锁定型比较特殊,这个方案运用偏振晶体中 o 光与 e 光的偏振分离效应构建外腔,对激光光子单元进行相位的锁定。

1) 相位外腔型相干合成

表 3 罗列了近 10 年来相位外腔型 CBC 的发展近况。首先可以确定的是,运用外腔可以使得 LD 单管的线宽锁定至一个非常窄的范围之内,可以使得 LD 的相位噪声得到有效控制,并且,外腔型 CBC 技术的合成路数具有可拓展性。但是,从合成功率可以看出,

决定了光束质量退化情况,稍有不慎则会发生较大的退化。

提升 CBC 效率的关键在于合成子束相位的锁定与调控。合成子束的相位噪声势必会极大影响合成功率、合成效率及合成光束质量。因此,下面从不同的锁相技术出发对 CBC 技术发展的近况进行概述。

3.1 外腔型相干合成

外腔型相干合成主要通过构建外腔对激光光子单元进行相位锁定。构建外腔的方式一般有如图 11 所示的 3 种,分别为二叉树型、串联型和衍射光元件(DOE)型。并且外腔的位置可以在 LD 单管的前端,也可以在后端。这些不同的组合方式构成了外腔相干合成的多样性,并且可以针对不同的要求设计基于不同原理、不同器件的外腔形态。

现有基于外腔型 CBC 的 LD 输出功率基本不超过 10 W。

为了更好地说明相位外腔型 CBC,下面着重介绍 2017 年法国 CNRS 报道的基于相位光栅外腔锁相和 DOE 近场合成的相干系统,其结构示意图如图 12(a)所示。该系统运用窄脊锥形放大芯片前后腔均出光的特性,在后腔构建锁相外腔,在前腔进行光束共孔径叠加。后腔锁相子系统运用了一个 DOE 与一个高反镜构建,使得每个芯片脊型区前向输出相位一致,为前向高效合成打下了基础。随后,5 路经过锁相的锥形放大 LD 芯片输入一个 DOE 进行共孔径合成,实现光场叠加。该系统最终输出 7.5 W 的合成激光,合束效率为 78%,输出 DOE 不同衍射级次的功率分布如

表 3 外腔型 CBC 技术发展近况

Table 3 Recent developments of external cavity CBC technology

Year	Institution	Number of routes	Power / W	Line width / pm	Phase-lock technology	Key device	CBC mode	Reference
2008	CNRS	9	1.7	100		Tilt VBG	Far-field	[48]
2009	MIT	11	7	-		SCOWL array	Far-field	[49]
2010	ORNL	47	12.8	70		V type cavity	Far-field	[50]
2010	CNRS	10	0.365	-	Talbot cavity	External phase adjustment+phase grating	Near-field	[51]
2013	ORNL	10	4.5	~0.016		V type cavity	Far-field	[52]
2015	CNRS	2	5.9	-	Narrow band filter grating	MOPA chips	Near-field	[53]
2017	CNRS	5	7.5	-	External cavity with phase gratings	MOPA chips+DOE	Near-field	[54]
2018	ORNL	10	4.8	100	Talbot cavity	Integrated board area LD	Far-field	[55]

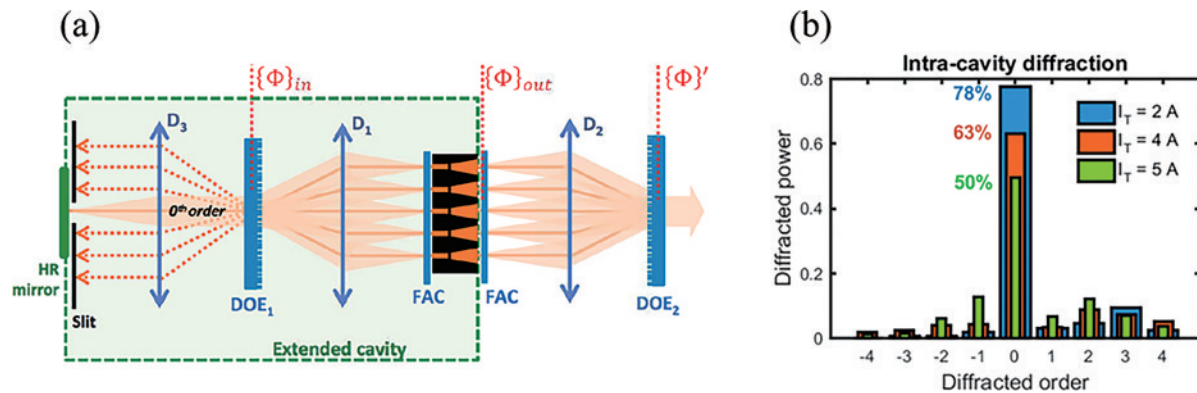
图 12 基于锥形放大芯片的 CBC^[54]。(a) 系统结构图；(b) 不同衍射级数的功率分布Fig. 12 CBC with conical amplification chip^[54]. (a) System structure diagram; (b) power distributions of different diffraction orders

图 12(b) 所示, 输出功率的抖动不超过 5%, 光束质量 M^2 不大于 1.4。

2) 偏振外腔型相干合成

2011 年, 新加坡南洋理工大学提出了运用偏振晶体与多级玻片一起组成锁相外腔, 采用了二叉树结构设计, 并且运用 PBS 进行合成^[56]。最终, 该系统实现了 19 路子单元 7.2 W 的输出, 输出光束质量 M^2 为 11.5, 输出亮度相比于单路激光提高了近一倍^[57]。可能由于偏振外腔型相干合成的结构比较复杂, 该方案的后续研究较少。

3.2 主动相控相干合成

主动相控相干合成的关键在于实时主动地调控多路子束的输出相位。主震荡功率放大(MOPA)技术是大多数主动相控相干合成系统的关键。MOPA 技术输出放大光与种子光具有近乎相同的线宽和光束质量, 但亮度得到了明显的提升。基于 MOPA 的主动相控相干合成技术把一个窄线宽、高光束质量的种子光进行均匀分光之后注入到多路放大芯片当中, 通过对放大芯片施加不同的调节电流或添加额外相位调制器的方式来调节芯片输出的相位, 最终达到相干相长的

目的。

与 LD 外腔型相干合成有众多实现方式不同, LD 主动相控相干合成的光路结构相差不大, 且基本都使用窄脊锥形放大 LD 芯片进行, 不同之处仅在所使用的相位主动控制算法以及共孔径叠加方式上。图 13 展示了 900 路基于 MOPA 的 LD 主动相控相干合成系统结构图^[58], 其他主动相控相干合成系统与其大同小异。主动相控相干合成的指标相比于外腔型相干合成有明显的飞跃。下面对主动相控 CBC 的发展近况进行概述。

1995 年, 美国 SDL Inc. 将 4 路 MOPA 输出进行了远场相干合成, 其系统结构如图 14 所示。该结构与现在主流的系统结构已经非常相似, 即把一个 DBR 半导体激光器分别注入 4 个锥形半导体放大器中, 在注入的过程中需要对种子光的相位进行调整, 最后在远场实现相干合成。该系统实现了 >5 W 的合成激光(脉冲状态), 且完全实现了单横模输出^[59]。进入 21 世纪后, 随着单模种子 LD 指标的提升以及锥形放大芯片的不断发展, CBC 已经可以实现 >20 W 的合束输出, 其发展近况归纳在表 4 中。

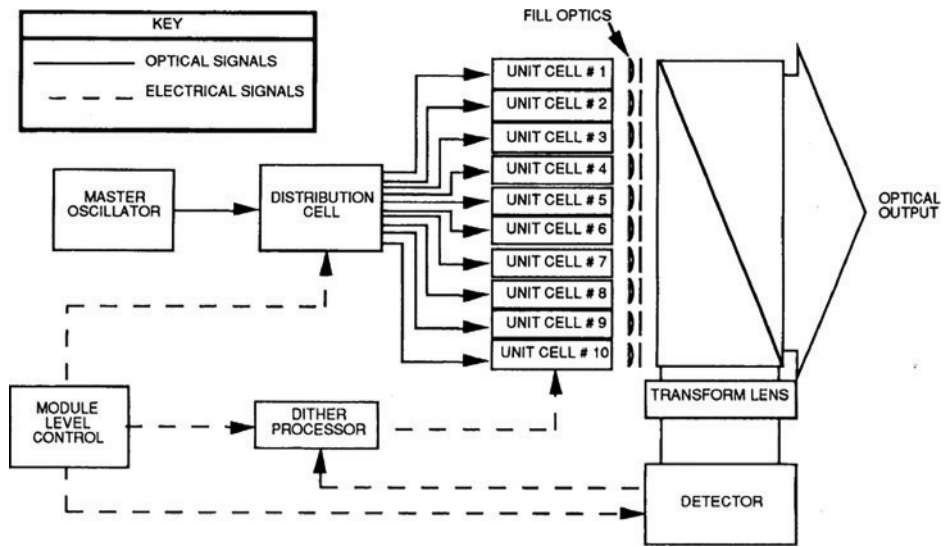


图 13 基于 MOPA 技术的 900 路主动相控 CBC 系统结构^[58]

Fig. 13 System structure of active phase control CBC based on MOPA technology with 900 laser diodes^[58]

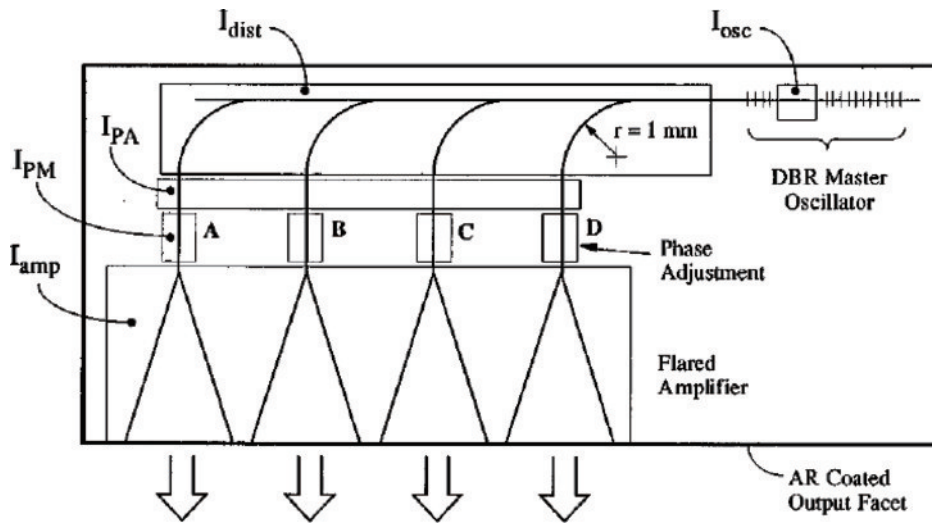


图 14 基于锥形放大芯片和 MOPA 技术的 4 路主动相控 CBC 系统结构^[59]

Fig. 14 System structure of active phase control CBC based on conical amplification chip and MOPA technology with 4 laser diodes^[59]

表 4 主动相控 CBC 技术的发展近况

Table 4 Recent developments of active phase control CBC technology

Year	Institution	Number of routes	Power /W	Combing efficiency /%	Key technology/device	Reference
1995	Mcdonnell	900	5.5	15.2	Phase adjustment on chips	[58]
1995	SDL Inc	4	5	91.4	MOPA chips	[59]
2009	MIT	218	38.5	72	SCOWL array	[49]
2012	MIT	21	1.2	81	SPDG algorithm+phase locking with DOE gratings	[60]
2012	MIT	47	40	87	SPDG algorithm+beam combination with DOE gratings	[46]
2017	CNRS	5	11.3	76	DOE	[54]
2019	CNRS	3	12.9	65	Phase adjustment on MOPA chips	[61]
2019	CNRS	2	13	70	Phase stabilization	[62]
2019	CNRS	4	9.7	66	MOPA chips+phase adjustment with PZT	[63]
2019	CNRS	4	22.7	64	Quasi-continuous output	[64]

续表

Year	Institution	Number of routes	Power /W	Combing efficiency /%	Key technology/device	Reference
2019	Russian Academy of Sciences	20	1	-	Zigzag structures	[65]
2020	CIOMP	4	6.9	72	Near-field combination+polarization combination	[66]
2021	FBH	4	17	>80	Special MOPA chips	[67]

下面简要介绍 2019 年法国 CNRS 实验室提出的 4 路 MOPA 相干合束方案。该方案输出峰值功率为 22.7 W 的准连续光,其系统结构如图 15(a)所示。该系统采用了 DFB 单模 LD 作为种子光,使用二叉树式

分束结构进行均匀分束,然后注入进锥形放大芯片中;锥形放大芯片输出的放大光通过合束镜进行近场相干叠加,合束效率为 64%^[64]。该系统在不同输入电流下的合束脉冲形态以及合束光斑分布如图 15(b)所示。

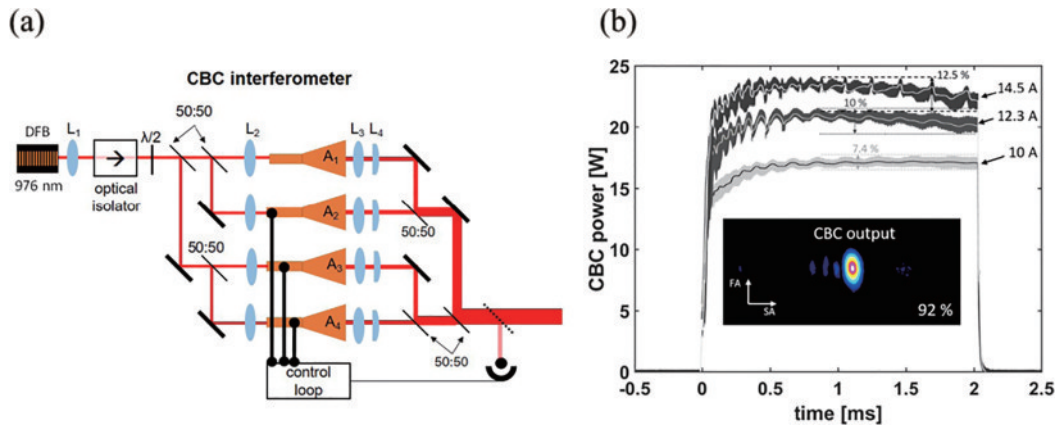


图 15 基于锥形芯片的 MOPA 准连续 CBC^[64]。(a)系统结构;(b)输出特性

Fig. 15 MOPA quasi-continuous CBC based on conical amplification chip^[64]. (a) System structure; (b) output characteristics

目前,CBC 的研究主要集中在系统性能指标的提上,对系统的定量理论分析比较少。但可以预见的是,每一路 LD 子束输出的单模能量比与相位噪声与 CBC 的效率息息相关。相干合成相控算法的带宽、收敛速度与复杂度和相干合成通道数的拓展性有较大的关系。

4 总结与展望

半导体激光阵列具有电光转换效率高、波长覆盖范围广、体积小、重量轻、寿命长、可靠性高和功耗低等优点,在材料加工、生物医疗和军事方面有着重要应用,但是,当前半导体激光阵列存在的主要问题就是光束质量差和单元出光功率低,限制了其应用。有效解决途径就是激光合成技术。激光合成技术将多个单管的光强进行有效叠加,是提高激光器输出功率与亮度的主要途径。根据作用机理的不同,激光合成技术可分为 SBC 和 CBC。近几年,这两种方法均取得了一定进展^[68]。

SBC 是现有亮度提升最大的合成方案,可以分为闭环 SBC 与开环 SBC 两大部分。该技术基于波分复用的思想,把激光子单元的线宽压窄且固定在不同的光谱位置上,然后进行共孔径合成。现有基于 SBC 的最高输出功率为 4 kW。CBC 技术首先对激光子单元

进行锁相和相位调整,然后进行共孔径合成。现有基于 CBC 的 LD 系统最大输出功率为 40 W。受到空间光通信、空间光传感/探测等应用领域的牵引,高相干性高亮度 LD 的需求越来越大,因此 CBC 技术仍有巨大的发展空间。

参 考 文 献

- [1] 王立军,彭航宇,张俊,等. 高功率高亮度半导体激光器合束进展[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0401001. Wang L J, Peng H Y, Zhang J, et al. Development of beam combining of high power high brightness diode lasers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(4): 0401001.
- [2] 姜曼,马鹏飞,栗荣涛,等. 激光光谱合成技术研究进展与展望(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(12): 20201053. Jiang M, Ma P F, Su R T, et al. Research progress and prospect of spectral beam combining(Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(12): 20201053.
- [3] Karlsen S R, Price R K, Reynolds M, et al. 100-W 105- μm 0.15NA fiber coupled laser diode module[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7198: 71980T.
- [4] Xu D, Guo Z J, Zhang T J, et al. 600 W high brightness diode laser pumping source[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10086: 1008603.
- [5] Kanskar M, Bao L, Chen Z, et al. Flared oscillator

- waveguide diodes (FLOW-diodes) enable high brightness fiber-coupled modules[C]//2016 International Semiconductor Laser Conference (ISLC), September 12-15, 2016, Kobe, Japan. New York: IEEE Press, 2016.
- [6] Kanskar M, Bao L, Chen Z, et al. Continued improvement in reduced-mode (REM) diodes enable 272 W from 105 μm 0.15 NA beam[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10086: 1008609.
- [7] Eckstein H C, Zeitner U, Tünnermann A, et al. Numerical simulation and optimization of microstructured high brightness broad area laser diodes[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9382: 93821H.
- [8] 韩淋, 刘媛媛, 王翠鸾, 等. 大功率半导体阵列激光器的偏振复用技术研究[J]. 半导体光电, 2008, 29(6): 831-834.
Han L, Liu Y Y, Wang C L, et al. Study on polarization multiplexing technology for high-power diode laser arrays[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2008, 29(6): 831-834.
- [9] 王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展[J]. 中国光学, 2015, 8(4): 517-534.
Wang L J, Peng H Y, Zhang J. Advance on high power diode laser coupling[J]. Chinese Optics, 2015, 8(4): 517-534.
- [10] Roh S D, Grasso D M, Small J A. Very high-brightness fiber-coupled diode lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7198: 71980Y.
- [11] Garre-Werner G, Montiel-Ponsoda J J, Raab V, et al. 1 kW CW fiber-coupled diode laser with enhanced brightness[C]//OSA High-brightness Sources and Light-driven Interactions Congress 2020 (EUVXRAY, HILAS, MICS), September 12-15, 2016, Washington, DC. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2020: HM2B.7.
- [12] Daneu V, Sanchez A, Fan T Y, et al. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity[J]. Optics Letters, 2000, 25(6): 405-407.
- [13] Fan T Y, Sanchez A, Daneu V, et al. Laser beam combining for power and brightness scaling[C]//2000 IEEE Aerospace Conference. Proceedings (Cat. No.00TH8484), March 25, 2000, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2000: 49-54.
- [14] Hamilton C E, Tidwell S C, Meekhof D, et al. High-power laser source with spectrally beam-combined diode laser bars[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5336: 1-10.
- [15] Chann B, Huang R K, Missaggia L J, et al. Near-diffraction-limited diode laser arrays by wavelength beam combining[J]. Optics Letters, 2005, 30(16): 2104-2106.
- [16] Gopinath J T, Chann B, Fan T Y, et al. 1450-nm high-brightness wavelength-beam combined diode laser array[J]. Optics Express, 2008, 16(13): 9405-9410.
- [17] Grasso D M, Roh S D. High-power very high-brightness fiber-coupled diode laser arrays[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6952: 69520B.
- [18] 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(11): 1633-1638.
Liu B, Li Q, Zhang X, 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(11): 1633-1638.
- [19] Vijayakumar D, Jensen O B, Thestrup B. 980 nm high brightness external cavity broad area diode laser bar[J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5684-5690.
- [20] Hugger S, Aidam R, Bronner W, et al. Power scaling of quantum cascade lasers via multiemitter beam combining[J]. Optical Engineering, 2010, 49(11): 111111.
- [21] Vijayakumar D, Jensen O B, Ostendorf R, et al. Spectral beam combining of a 980 nm tapered diode laser bar[J]. Optics Express, 2010, 18(2): 893-898.
- [22] 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(3): 3296-3301.
- [23] Huang R K, Chann B, Burgess J, et al. Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber, CO₂, and solid state lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8241: 824102.
- [24] Zhang J, Peng H Y, Fu X H, 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.
- [25] 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 S, 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.
- [26] 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 lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8604: 860404.
- [27] Zhu Z D, Gou L, Jiang M H, 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.
- [28] Meng H C, Sun T Y, Tan H, et al. High-brightness spectral beam combining of diode laser array stack in an external cavity[J]. Optics Express, 2015, 23(17): 21819-21824.
- [29] Meng H C, Ruan X, Du W C, et al. Scaling the spectral beam combining channel by multiple diode laser stacks in an external cavity[J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(4): 045811.
- [30] Meng H C, Ruan X, Wang Z, et al. Spectral bandwidth narrowing of high brightness spectral beam combining diode laser[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 1501506.
- [31] Tan H, Meng H C, Ruan X, et al. High-power direct diode laser output by spectral beam combining[J]. Laser Physics, 2018, 28(3): 035802.
- [32] Ried S, Rauch S, Irmeler L, et al. Next generation diode lasers with enhanced brightness[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10514: 105140G.
- [33] 张俊, 彭航宇, 付喜宏, 等. 基于光谱合束的 800 nm 高亮度半导体激光光源[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701021.
Zhang J, Peng H Y, Fu X H, et al. High-brightness 800-nm semiconductor laser source based on spectral

- beam combining[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701021.
- [34] Yu H, Tan S Y, Pan H D, et al. Development of a 350 W, 50 μm , 0.15 NA wavelength stabilized fiber coupled laser diode module for pumping Yb-doped fiber laser[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11262: 112620V.
- [35] Yu H, Tan S Y, Pan H D, et al. High efficiency 600 W, 100 μm wavelength stabilized fiber coupled laser diode module for fiber laser pumping[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11668: 116680E.
- [36] 张艳, 张彬, 祝颂军. 谱合成光束特性的模拟分析[J]. 物理学报, 2007, 56(8): 4590-4595.
Zhang Y, Zhang B, Zhu S J. Analysis of the property of the beam after spectral beam combining[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8): 4590-4595.
- [37] 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): 864-868, 872.
Zhang Y, Zhang B. Analysis of the spectral beam combining efficiency of diode laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(5): 864-868, 872.
- [38] Haas M, Rauch S, Nagel S, et al. Beam quality deterioration in dense wavelength beam-combined broad-area diode lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2017, 53(3): 2600111.
- [39] 董天为, 翁浚溥, 孟海螺, 等. 激光合束技术下光学镜面激光传输损耗的特性研究[J]. 激光杂志, 2020, 41(9): 182-187.
Dong T W, Weng J P, Meng H L, et al. Study on the characteristics of laser transmission loss of optical mirror under laser beam combining technology[J]. Laser Journal, 2020, 41(9): 182-187.
- [40] Zediker M S, Stegeman R. Very dense wavelength beam combined laser system: US20210257813[P]. 2021-08-19.
- [41] 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 Letters, 2006, 31(9): 1253-1255.
- [42] 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.
Liu B, Zhang X, Han J T, et al. Wavelength beam combining of laser diode array by wavelength-chirped volume Bragg grating external cavity[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(7): 1057-1062.
- [43] Jechow A, Raab V, Menzel R. High cw power using an external cavity for spectral beam combining of diode laser-bar emission[J]. Applied Optics, 2006, 45(15): 3545-3547.
- [44] Jechow A, Skoczowsky D, Lichtner M, et al. High-brightness emission from stripe-array broad area diode lasers operated in off-axis external cavities[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7583: 758312.
- [45] Haas M, Rauch S, Nagel S, et al. Thin-film filter wavelength-stabilized, grating combined, high-brightness kW-class direct diode laser[J]. Optics Express, 2017, 25(15): 17657-17670.
- [46] Creedon K J, Redmond S M, Smith G M, et al. High efficiency coherent beam combining of semiconductor optical amplifiers[J]. Optics Letters, 2012, 37(23): 5006-5008.
- [47] Lucas-Leclin G, Albrodt P, Pabœuf D, et al. Coherent beam combining architectures for high-power laser diodes [M]//Divliansky I. Advances in high-power fiber and diode laser engineering. London: Institution of Engineering and Technology, 2019: 37-87.
- [48] Pabœuf D, Lucas-Leclin G, Georges P, et al. Narrow-line coherently combined tapered laser diodes in a Talbot external cavity with a volume Bragg grating[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(21): 211102.
- [49] Huang R K, Chann B, Missaggia L J, et al. Coherent combination of slab-coupled optical waveguide lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7230: 72301G.
- [50] Liu B, Liu Y, Braiman Y. Coherent beam combining of high power broad-area laser diode array with a closed-V-shape external Talbot cavity[J]. Optics Express, 2010, 18(7): 7361-7368.
- [51] Pabœuf D, Emaury F, de Rossi S, et al. Coherent beam superposition of ten diode lasers with a Dammann grating [J]. Optics Letters, 2010, 35(10): 1515-1517.
- [52] Liu B, Braiman Y. Coherent beam combining of high power broad-area laser diode array with near diffraction limited beam quality and high power conversion efficiency [J]. Optics Express, 2013, 21(25): 31218-31228.
- [53] Schimmel G, Doyen I, Janicot S, et al. Passive coherent combining of two tapered laser diodes in an interferometric external cavity[C]//2015 IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference, October 14-15, 2015, Coventry, UK. New York: IEEE Press, 2015: 11-12.
- [54] Schimmel G, Janicot S, Hanna M, et al. Coherent beam combining architectures for high power tapered laser arrays[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10086: 100860O.
- [55] Liu B, Braiman Y. Coherent addition of high power broad-area laser diodes with a compact VBG V-shaped external Talbot cavity[J]. Optics Communications, 2018, 414: 202-206.
- [56] Ng S P, Phua P B. Coherent polarization locking of a diode emitter array[J]. Optics Letters, 2009, 34(13): 2042-2044.
- [57] Purnawirman, Phua P B. High power coherent polarization locked laser diode[J]. Optics Express, 2011, 19(6): 5364-5370.
- [58] Levy J L, Roh K. Coherent array of 900 semiconductor laser amplifiers[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2382: 58-69.
- [59] Osinski J S, Mehuys D, Welch D F, et al. Phased array of high-power, coherent, monolithic flared amplifier master oscillator power amplifiers[J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(5): 556-558.
- [60] Montoya J, Augst S J, Creedon K, et al. External cavity beam combining of 21 semiconductor lasers using SPGD [J]. Applied Optics, 2012, 51(11): 1724-1728.
- [61] Albrodt P, Jamal M T, Hansen A K, et al. Recent progress in brightness scaling by coherent beam combining of tapered amplifiers for efficient high power

- frequency doubling[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10900: 109000O.
- [62] Albrodt P, Hamperl J, Niemeyer M, et al. Coherent superposition of pulsed high-brightness tapered amplifiers [C]//2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 23-27, 2019, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2019.
- [63] Hamperl J, Albrodt P, Georges P, et al. Compact module for high power coherent beam combining of tapered amplifiers[C]//2019 IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference, October 9-10, 2019, Coventry, UK. New York: IEEE Press, 2019: 33-34.
- [64] Albrodt P, Niemeyer M, Crump P, et al. Coherent beam combining of high power quasi continuous wave tapered amplifiers[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 27891-27901.
- [65] Bogatov A P, Drakin A E, Mikaelyan G T. Coherent combining of diode laser beams in a master oscillator-zigzag slab power amplifier system[J]. Quantum Electronics, 2019, 49(11): 1014-1018.
- [66] Zhu H B, Duan X M, Fan S L, et al. Scalable structure of coherent polarization beam combining based on tapered diode laser amplifiers[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 132: 106470.
- [67] Crump P, Blume G, Feise D, et al. Single-pass tapered semiconductor optical amplifiers and modules for efficient coherent beam combining[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11705: 117050M.
- [68] 梁丹华, 孙华燕, 樊桂花, 等. 半导体激光阵列合束技术的研究[J]. 装备制造技术, 2013(12): 115-117.
Liang D H, Sun H Y, Fan G H, et al. The study of laser beam combining technology for laser diode array[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2013(12): 115-117.