

光纤激光器光谱合束技术综述

张大勇,郝金坪,朱 辰,张 昆,张利明
(固体激光技术重点实验室,北京 100015)

摘 要:对实现高功率、高光束质量输出的光纤激光器光谱合束技术进行了综述。针对体布拉格光栅合束和多层介质膜光栅合束两种技术方案进行介绍,从合束原理、高功率窄线宽光纤激光器单元、光栅器件以及合束方案等方面进行分析。同时,针对近年来国内外在光纤激光光谱合束技术领域的发展也进行了归纳性的介绍。

关键词:光纤激光器;光谱合束;体布拉格光栅;多层介质膜光栅

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.05.001

Review on spectral beam combining of fiber lasers

ZHANG Da-yong, HAO Jin-ping, ZHU Chen, ZHANG Kun, ZHANG Li-ming
(Science and Technology on Solid-state Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract: The technology on spectral beam combining of fiber lasers to achieve high power laser output and high beam quality is reviewed and illustrated. Two ways of spectral beam combining including volume Bragg grating combining and multilayer dielectric grating combining are introduced. The principle of spectral beam combining, high power narrow bandwidth fiber lasers, grating components and the schemes of beam combining are analyzed. Furthermore, the developments of spectral beam combining of fiber lasers at home and abroad are summarized as well.

Key words: fiber laser; spectral beam combining; volume Bragg grating; multilayer dielectric grating combining

1 引 言

高功率、高光束质量一直是固态激光器追求的目标,随着高端工业应用、特别是潜在的军事应用等需求的牵引,高功率、高光束质量的全固态激光器技术发展方兴未艾。光纤激光器具备转换效率高、光束质量好、热管理简单、使用灵活等一系列优点,逐渐成为高功率全固态激光器技术研究的热点。光纤激光器由于热效应、非线性效应、光纤损伤、泵浦耦合、模场直径等因素的限制,单纤单模的激光输出被限制在了万瓦量级^[1],若要获得更高功率水平,则需要采用多单元光束合束方式实现,目前发展较快的主要有相干合束(coherent-

ly combining)和光谱合束(SBC, spectral beam combining)。相干合束理论上可以无限合成功率,但由于单元光束空间分离(填充因子)的缘故,光束质量无法达到衍射极限,且对单元光束的相位稳定性和控制精度要求极高^[2],工程上实现难度较大;光谱合束一般只能在增益介质的增益带宽内有限合成功率,但设计相对简单,对单元光束稳定性和控制要求较低^[2],同时又能实现衍射极限的光束质量,目前是光纤激光器实现高功率、高光束质量激光输出的较好选择。

2 光谱合束技术的原理

目前,光谱合束技术主要基于两类色散元件,一

种是体布拉格光栅 (volume Bragg grating, VBG), 一种是多层介质膜光栅 (multilayer dielectric grating, MLDG)。

体布拉格光栅合束的基本原理如图1所示^[3]。



图1 反射式体布拉格光栅光谱合束原理图

Fig. 1 Schematic diagram of spectral beam combining

by a reflecting volume Bragg grating

当一束平面波入射至一块非倾斜(光栅向量平行于光栅表面的法线方向)的反射式体布拉格光栅上时,衍射效率可以由下式计算出来^[3]:

$$\eta(\Delta\lambda) = \left(1 + \frac{1 - \left(\frac{\lambda_0^2 \Delta\lambda}{2n_{av}\delta n}\right)^2}{\sinh^2\left(\left(\frac{2\pi n_{av}t\delta n}{\lambda_0^2 f}\right)^2 - \left(\frac{\pi f t \Delta\lambda}{\lambda_0}\right)^2\right)^{1/2}}\right)^{-1} \quad (1)$$

其中, λ_0 为光栅的中心波长, t 是光栅的厚度; n_{av} 是光栅介质的折射率平均值,光栅介质的折射率按正弦函数周期性变化; δn 是折射率调制的振幅; f 是光栅的空间频率; $\Delta\lambda$ 表示入射平面波与 λ_0 的波长差。当平面波波长和入射至光栅的角度满足波长 λ_0 对应的布拉格条件,即 $\Delta\lambda = 0$ 时,获得了最大的衍射效率 η_0 ,表示为:

$$\eta_0 = \tanh^2 \frac{2\pi n_{av} t \delta n}{\lambda_0^2 f} \quad (2)$$

对于体布拉格光栅而言,当入射光波长和角度满足布拉格条件时,衍射效率获得最大值,近似于1;而对于其他偏离布拉格条件的波长而言,衍射效率近似为0。所以,如图1所示,当两束具有一定波长差的光束以共轭的角度入射至光栅并在光栅上发生光斑重叠时,如果其中一束光 λ_1 满足布拉格条件而另一束光 λ_2 在光栅上的衍射效率为0,那么波长 λ_1 的光束以最大衍射效率发生衍射,而波长 λ_2 的光束透射经过光栅。这样,波长 λ_1 和 λ_2 的两束光经过光栅作用后同轴输出,即实现了波长不同的两束光的同光路合束。以此类推,当存在 N 个中心波长不同的体布拉格光栅时,即可实现 $N+1$ 路不同波长光束的光谱合束。

多层介质膜光栅是一种平面光栅,其合束原理

如图2所示。

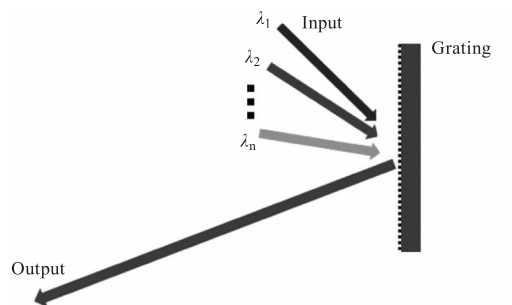


图2 多层介质膜光栅光谱合束原理图

Fig. 2 Schematic diagram of spectral beam combining

by a multilayer dielectric grating

式(3)为平面衍射光栅的光栅方程:

$$d(\sin\theta_1 + \sin\theta_2) = m\lambda \quad (3)$$

其中, d 为光栅的缝距; θ_1 和 θ_2 分别为光束的入射角度和衍射角度; m 为衍射级次; λ 为波长。由此可算出不同波长光束以同一衍射角度出射时对应的不同入射角度。

由于多层介质膜光栅的衍射主峰有一定的宽度,所以与衍射峰中心波长相差不大的其他波长,也可以在多层介质膜光栅上获得很高的衍射效率。这样,有一定波长差的多路光束,以不同的特定角度入射至多层介质膜光栅上的同一点,即可实现多路光束的同方向输出,也就完成了多路光束的光谱合束。

3 光纤激光器光谱合束需要面对的主要技术问题

3.1 高功率窄线宽光纤激光器技术

为了获得更高的合束功率,同时保持合束路数最少使系统尽可能简单,则要求单元光束有尽可能高的功率水平。光谱合束是利用光栅元件的衍射效应实现的,为了避免色散、影响合束效率和光束质量,对单元光束的单色性要求较高。同时,为了充分利用光栅的带宽和光谱分辨率,以实现更多路数的激光合束,需要产生不同中心波长的多路光束匹配光栅的入射条件,因此需要考虑单元光束的中心波长控制问题。

对单元光纤激光器来说,由于非线性效应和模式不稳定性等的影响,获得高功率和保持窄线宽往往作为矛盾的对立面很难同时满足,因此需要根据系统设计实现最优的折中。目前,常用的高功率窄线宽光纤激光器的实现方式主要有窄线宽光纤光栅

技术和单频的相位调制技术等。光纤光栅技术实现的高功率窄线宽光纤激光器结构简单,但边频成分难以较好的抑制,精确控制光谱难度大,一定程度上会影响合束效率;单频的相位调制技术实现的高功率窄线宽光纤激光器光谱精确可控,但系统复杂,成本高。二者都可通过控制种子波长来实现对单元光束的中心波长控制。

3.2 高效率抗损伤的光栅合束元件

光栅合束元件发挥着将多路单元光束高质量合束的关键性作用,承载着最终的总功率水平,因此合束效率和损伤阈值是衡量光栅合束元件的两个核心性能指标。

如前所述,目前广泛采用的光栅合束元件主要有体布拉格光栅和多层介质膜光栅两种。图3是典型的反射式体布拉格光栅的多路合束示意图。满足光栅 G_1 布拉格条件的光束 λ_2 和具有一定波长差的光束 λ_1 经光栅 G_1 合为一束,前者经光栅衍射而后者透射经过光栅。出射后的光束 $\lambda_1 + \lambda_2$ 与光束 λ_3 再经光栅 G_2 合为一束,其中,波长 λ_3 满足光栅 G_2 的布拉格条件。由此,便实现了三路不同波长光束的合束。以此类推,通过增加光栅数量,采用此类结构还可以实现更多路光束的光谱合束。

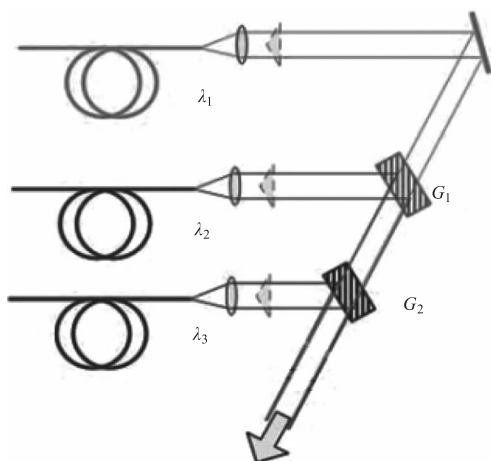


图3 反射式体布拉格光栅3路合束示意图

Fig. 3 Spectral beam combining of three beams using
areflecting volume Bragg grating

图4是典型的多层介质膜光栅的多路合束示意图。在光栅方程式(3)中,衍射级次 m 一般取1,根据其计算结果,不同波长的三路激光以特定的不同

角度入射至多层介质膜光栅 G 上,三路激光的衍射角度相同,即实现了三路不同波长光束的合束。在此基础上,还可以进一步增加合束的路数,只需保证各路光束的波长均处于光栅衍射顶峰的光谱带宽范围内。

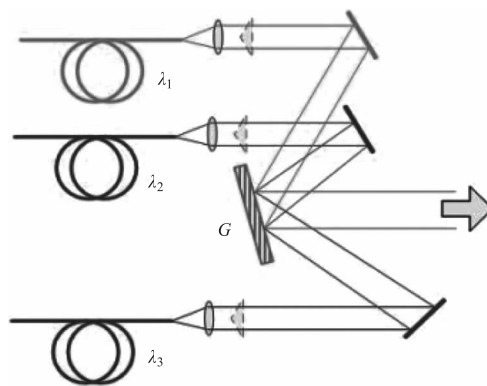


图4 多层介质膜光栅3路合束示意图

Fig. 4 Spectral beam combining of three beams
using amultilayer dielectric grating

4 光纤激光器光谱合束技术发展概况

光谱合束技术类似于光纤通信中的波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)技术,最早来源于多个激光二极管单元激光合束^[4]。美国麻省理工学院林肯实验室(MIT Lincoln Laboratory)和美国空军实验室较早地研究了光纤激光器光谱合束的技术,以获得更高的激光功率和亮度^[5-7]。

从2003年开始,以中佛罗里达大学和 OptiGrate 公司为主报道了一系列采用在 PTR(photo-thermo-refractive)玻璃中制作的体布拉格光栅作为合束元件开展光纤激光器的光谱合束的研究工作。2009年,中佛罗里达大学采用此种光栅将5路光纤激光器进行光谱合束,如图5所示,输出功率达到了773 W,光束质量为 $M^2 = 1.14$ 的近衍射极限^[8]。

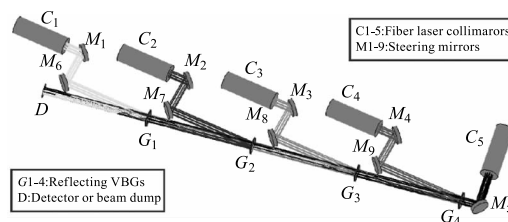


图5 中佛罗里达大学光谱合束实验布局图

Fig. 5 Experimental setup of spectral beam combining
by Univ. of Central Florida

2007年,美国 Aculight 公司报道了将3路光纤

激光器经过多层介质膜光栅进行光谱合束的研究成果^[9],如图6所示,总功率达到了522 W,两个方向的光束质量分别为 $M^2 = 1.18$ 和1.22。以此为基础,Aculight公司持续开展光纤激光器光谱合束技术的研究,其并入Lockheed·Martin公司后于2014年报道了30 kW光谱合束的光纤激光器试验样机,并预计于2016年将功率提升到60 kW。

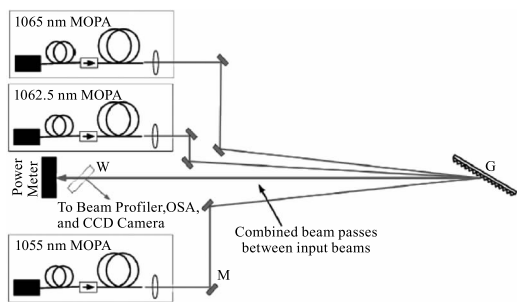


图6 Aculight公司光谱合束实验布局图

Fig. 6 Experimental setup of spectral beam combining by Aculight

德国以Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering和Friedrich Schiller University为主联合开展了光纤激光器光谱合束技术的研究,于2006~2007年报道了总功率超过100 W的光纤激光器光谱合束的研究成果^[10-11]。2011年,该研究团队报道了将4路2.1 kW的光纤激光器利用介质膜光栅进行光谱合束^[12],如图7所示,最大功率达到了8.2 kW,光束质量在2.3 kW时 $M^2 < 1.5$ 、在7.3 kW时 M^2 约为4.3,这是当时报道的光纤激光器光谱合束的最高功率水平。

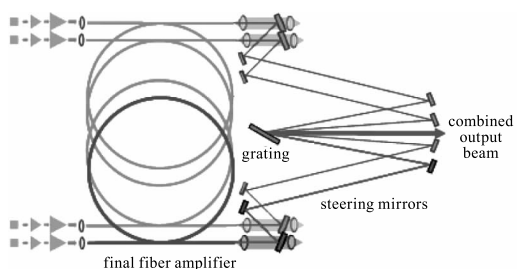


图7 弗朗和费研究所光谱合束实验布局图

Fig. 7 Experimental setup of spectral beam combining by Fraunhofer Institute

国内开展光纤激光器光谱合束相关技术研究的主要有中物院、国防科大、上海光机所和中国电科11所等单位,有关的进展信息报道较少。公开报道的信息中,中物院于2014年采用5路千瓦级的光纤激光器通过多层介质膜光栅光谱合束,实验装置如

图8所示,获得了5.07 kW的合束功率,光束质量 M^2 小于3,合束效率达到91.2%,这也是目前国内的最高水平^[13]。

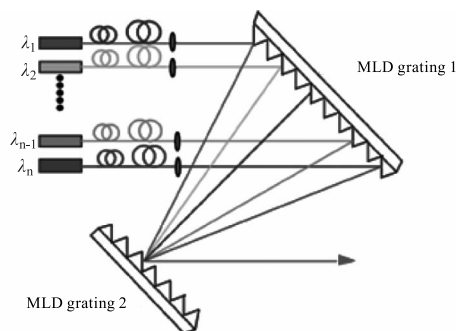


图8 中物院基于双光栅色散补偿的光谱合束实验布局图

Fig. 8 Experimental setup of spectral beam combining by Institute of Applied Electronics

5 结论

光谱合束技术属于一种非相干合束技术,通过降低谱亮度换取总功率的有效提升。光纤激光器的光谱合束可以充分利用光纤激光器较宽增益带宽,弥补单纤输出功率受限的问题,获得高功率高光束质量的激光输出,是未来高功率光纤激光器重要的技术路径,极具发展前景。

参考文献:

- [1] J W Dawson, M J Messerly, R J Beach, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. Opt. Express, 2008, 16:13240.
- [2] Igor V Ciapurin, Leonid B Glebov, Larissa N Glebova, et al. Incoherent combining of 100 W Yb-fiber laser beams by PTR Bragg grating, Advances in Fiber Devices [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4974:209-219.
- [3] Oleksiy Andrusyak, Vadim Smirnov, George Venus, et al. Beam combining of lasers with high spectral density using volume Bragg gratings [J]. Optics Communications, 2009, 282:2560-2563.
- [4] I H White. A multichannel grating cavity laser for wavelength division multiplexing applications [J]. J. Lightwave Technol. 1991, 9:893-899.
- [5] C C Cook, T Y Fan. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity [J]. OAS/ASSL, 1999, 26:163-166.
- [6] Erik J Bochove. Theory of spectral beam combining of fi-

- ber lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(5): 432–445.
- [7] S J Augst, A K Goyal, R L Aggarwal, et al. Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers [J]. OPTICS LETTERS, 2003, 28(5): 331–333.
- [8] Oleksiy Andrusyak, Vadim Smirnov, George Venus, et al. Applications of volume Bragg gratings for spectral control and beam combining of high power fiber lasers [J]. Proc. of SPIE, 2009, 7195: 71951Q–1.
- [9] Thomas H Loftus, Anping Liu, Paul R Hoffman, et al. 522 W average power, spectrally beam-combined fiber laser with near-diffraction-limited beam quality [J]. OPTICS LETTERS, 2007, 32(4): 349–351.
- [10] F Röser, S Klingebiel, A Liem, et al. Spectral beam combining of fiber lasers [J]. Proc. of SPIE, 2006, 6102: 61020T.
- [11] Sandro Klingebiel, Fabian Röser, Bülend Ortaç, et al. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers with high efficiency [J]. Opt. Soc. Am. B, 2007, 24(8): 1716–1720.
- [12] Christian Wirth, Oliver Schmidt, Igor Tsybin, et al. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW [J]. Opt. Lett., 2011, 36(16): 3118–3120.
- [13] MA Yi, YAN Hong, TIAN Fei, et al. High efficiency and quality of 5 kW output by spectral beam combining fiber laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(4): 27040101. (in Chinese)
- 马毅, 颜宏, 田飞, 等. 光纤激光共孔径光谱合成实现 5 kW 高效优质输出 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(4): 27040101.