

基于级联体光栅的光纤激光阵列谱组束

楚兴春 赵尚弘 占生宝 胥 杰 吴卓亮

(空军工程大学电讯工程学院网络工程系, 陕西 西安 710077)

摘要 提出了一种基于级联体光栅(VBG)的谱组束方案,组束阵元数可随级联体光栅的数目倍增。给出了一个双光栅级联谱组束系统实例,将组束阵元按波长分为两组,利用具有相应波长选择性的体光栅分别对它们进行组束,由于两个级联体光栅的角度选择性互不重叠,所有光束经第二个体光栅后都沿其布拉格(Bragg)角方向出射,实现近场和远场的功率叠加。为保证各光束传播方向的一致性,采用严格耦合波理论推导出了准确计算光束入射角的解析式。数值计算结果表明各光束的平均衍射效率优于 80%,在入射角偏离理论值不超过 $\pm 5'$ ($\approx 2.424 \times 10^{-5}$ rad) 的条件下组束光中所有光束的传播方向偏差小于 4×10^{-7} rad。

关键词 激光技术; 谱组束; 级联体光栅; 严格耦合波理论

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082808.1538

Spectral Beam Combination of Fiber Lasers Based on Cascaded Volume Gratings

Chu Xingchun Zhao Shanghong Zhan Shengbao Xu Jie Wu Zhuoliang

(Department of Network Engineering, Institute of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University, Xian, Shaanxi 710077, China)

Abstract A new spectral beam combination scheme based on cascaded volume Bragg gratings (VBG) was presented. The number of beams can be multiplied with the number of cascaded gratings. A system as example based on two cascaded VBGs was given. All the beams were firstly divided into two groups according to their wavelength. Each group was then combined by a VBG with corresponding central wavelength. Because the angular selectivity of the two VBGs are not overlapped, all the beams can be steered to propagate in the direction of the Bragg angle of the second VBG. The power of all beams can then be added at the near and far fields. In order to assure the consistency of the propagating direction of all beams, a formula to accurately determine the incident angle of all beams was derived using rigorous coupled-wave theory. Numerical results show that the average diffraction efficiencies of all beams are higher than 80%, and the deviation of the propagating direction of all diffracted beams are less than 4×10^{-7} rad when the incident angle of all beams deviates from their theoretical value less than $\pm 5'$.

Key words laser technique; spectral beam combination; cascaded volume gratings; rigorous coupled-wave theory

1 引 言

近年来,随着高功率半导体激光器抽运技术和双包层光纤制作工艺的发展,光纤激光器的输出功率迅速提高,单根光纤激光器的输出功率已达几百瓦甚至超过千瓦^[1,2]。但由于受到非线性效应、光学损伤以及热损伤等物理机制的影响,单根光纤的最终输出功率受到限制,并且随着激光器输出功率的提高光束质

量也会变差^[3,4]。要想在保证光束质量的同时进一步提高输出功率就需要采用激光组束技术,目前国内外已提出的组束技术主要分为相干组束^[5,6]和谱组束^[7,8]两大类。谱组束是一种非相干组束技术,它利用衍射元件的谱选择性将多束频谱互不重叠的中小功率激光沿同一方向衍射,实现激光功率的近场和远场叠加。与相干组束技术相比,谱组束技术更为简

收稿日期: 2007-12-07; 收到修改稿日期: 2008-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(60678018)和中国博士后科学基金(20070420220)资助课题。

作者简介: 楚兴春(1972—),男,博士,主要从事光电精密检测与激光技术等方面的研究。E-mail: kejdxcx@sohu.com

导师简介: 赵尚弘(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信与光电对抗技术等方面的研究。

E-mail: zhaoshangh@yahoo.com.cn

单,组束阵元数目的变化不会引起光斑强度分布的变化,对元器件的精度和稳定性要求较低,无需复杂的相位检测和控制,因此谱组束技术是一种更为简单实用的提升激光输出功率的方法^[9]。

本文提出了一种采用级联体光栅的谱组束方案,在无需减小各阵元频谱间隔的情况下,组束阵元数可随级联光栅的数目倍增。给出了一个双光栅级联组束系统实例,描述了其基本原理;采用严格耦合波理论推导出了准确计算各光束入射角的理论公式;给出了两个光栅的设计参量,并对所有光束的最终衍射效率和衍射方向进行了数值分析。

2 双体光栅级联组束器原理

由于体光栅具有极窄的波长和角度选择性,只有那些同时满足体光栅这两个特性的光束才能被高效地衍射,而不满足任何一个特性的光束都会被直接透射,且衍射损耗很小^[10]。因此,可以利用多个波长选择性互不重叠的体光栅把各个阵元按照其波长进行分段组束,并使组束光沿体光栅布拉格(Bragg)角确定的方向传播。由于体光栅的 Bragg 角与光栅矢量的方向有关,可以在保证各个体光栅 Bragg 角相同的条件下,通过改变光栅矢量的方向来改变体光栅的角度选择性,这样就可使前一级光栅的衍射光由于不满足后一级光栅的角度选择性而被透射,并与后一级光栅的衍射光沿同一方向传播,实现两段频谱的功率叠加。若所有体光栅的中心波长和角度选择性互不重叠,则这些体光栅级联起来就可实现较宽频谱范围内的激光组束。

基于双体光栅级联的谱组束器如图 1 所示,各个阵元输出已知波长的窄谱线激光,体光栅 VBG₁ 和 VBG₂ 具有不同的波长和角度选择性,它们级联构成组束器。首先,将所有组束阵元按照输出波长分为两

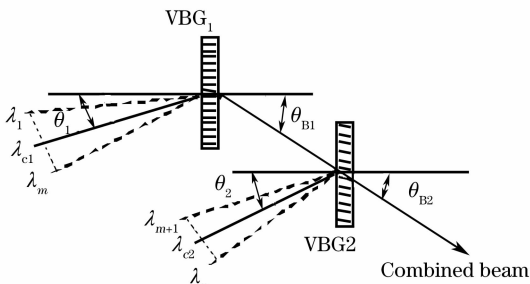


图 1 双体光栅级联谱组束系统原理图

Fig. 1 Schematic geometry of spectral beam combination system based on two cascaded VBGs

组($\lambda_1, \dots, \lambda_{c1}, \dots, \lambda_m$)和($\lambda_{m+1}, \dots, \lambda_{c2}, \dots, \lambda_n$)。两个体光栅的 Bragg 波长分别设计为 λ_{c1} 和 λ_{c2} 。若第一谱带($\lambda_1, \dots, \lambda_{c1}, \dots, \lambda_m$)完全或近似满足体光栅 VBG₁ 的 Bragg 条件,该谱带中的各光束将被 VBG₁ 高效地衍射。通过调整各光束的入射角,可使第一谱带的所有衍射光都沿 VBG₁ 的 Bragg 角方向传播并入射体光栅 VBG₂。同理,第二谱带($\lambda_{m+1}, \dots, \lambda_{c2}, \dots, \lambda_n$)也可被 VBG₂ 高效地衍射。由于被 VBG₁ 衍射的第一谱带中各光束均不满足 VBG₂ 的角度选择性,它们将被 VBG₂ 直接透射。只要 VBG₁ 和 VBG₂ 的 Bragg 角相同,那么两个谱带中的所有光束都将沿同一方向传播。

3 各阵元入射角的确定

为使所有阵元输出光束在近场和远场都实现功率叠加,要求所有光束经体布拉格光栅(VBG)衍射后都要沿同一方向传播。因此准确确定各光束入射 VBG 的角度对于提高组束光的质量非常必要。

图 2 为用于确定第一谱带中各光束入射 VBG₁ 的波矢图。设入射平面为 $x-z$ 平面,VBG₁ 的光栅矢量为 \mathbf{K}_1 ,它相对 z 轴正方向的夹角为 ϕ_1 。各入射光的波矢和入射角分别为 $k_1, \dots, k_{c1}, \dots, k_m$ 和 $\theta_1, \dots, \theta_{c1}, \dots, \theta_m$ 。VBG₁ 的 Bragg 波长和角度分别为 λ_{c1} 和 θ_{B1} 。 $k_{1d}, \dots, k_{c1d}, \dots, k_{md}$ 分别是第一谱带中所有光束的 -1 级衍射光波矢。

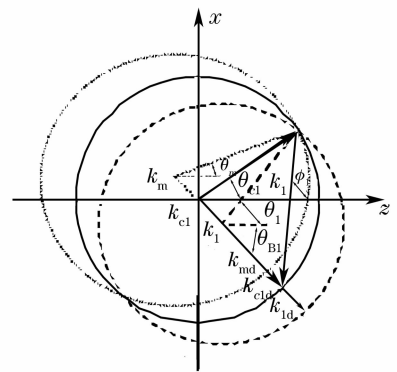


图 2 确定第一谱带各光束入射角的波矢图

Fig. 2 Wave vector diagram to determine the incident angles of the first spectral band

根据严格耦合波理论^[11],VBG₁ 的 Bragg 条件为

$$\cos(\phi_1 - \theta_{B1}) = \frac{\lambda_{c1}}{2\Delta_1 n_0}, \tag{1}$$

式中 Δ_1 和 n_0 分别为 VBG₁ 的折射率调制周期和平均折射率。

-1 级衍射光的 x 分量可由边界相位匹配条件

和费洛盖(Floquet)定律确定^[12]

$$k_{x,-1} = k_0 [n_0 \sin \theta + (\lambda/\Delta_1) \sin \phi_1], \quad (2)$$

令 $B = (\lambda/\Delta_1) \sin \phi_1$ 。式中 θ 为自由空间波长为 λ 的光束在光栅基底内的折射角, λ 可为第一谱带内任意光束的波长, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间波数。

折射角与入射角的关系满足折射定律

$$n_1 \sin \theta_m = n_0 \sin \theta. \quad (3)$$

在透射区, -1 级衍射光的 z 分量为

$$k_{z1} = k_0 [n_{\parallel}^2 - (k_{x1}/k_0)^2]^{1/2}, \quad (4)$$

式中 n_{\perp} 和 n_{\parallel} 分别为入射区和透射区的折射率。

由上述三式可得到波长为 λ 的光束入射角为

$$\theta_{in} = \arcsin \frac{n_{\parallel} \tan \theta_d - B(\tan^2 \theta_d + 1)^{1/2}}{n_1(\tan^2 \theta_d + 1)^{1/2}}, \quad (5)$$

式中 θ_d 是 -1 级光的衍射角。

要使第一谱带内所有光束的 -1 级光都沿同一方向传播, 必须保证 $\theta_d = \theta_{B1}$ 。由(1)式和(5)式可得

$$\theta_{in} = \arcsin \frac{n_{\parallel} \tan \theta_{B1} - B(\tan^2 \theta_{B1} + 1)^{1/2}}{n_1(\tan^2 \theta_{B1} + 1)^{1/2}}, \quad (6)$$

根据(6)式, 就可准确确定第一谱带内各光束的入射角。同理, 也可准确确定第二谱带内各光束入射 VBG_2 的角度。

4 级联体光栅的设计与数值分析

设计图 1 所示的双光栅级联系统时需要遵循三点: 1) 两个谱带分别能被 VBG_1 和 VBG_2 高效衍射; 2) VBG_1 的 Bragg 角与 VBG_2 的 Bragg 角相等; 3) 经 VBG_1 衍射的第一谱带要能以较小的衍射损耗透射过 VBG_2 。

不失一般性, 可设各阵元的波长由小到大依次为 (1538 nm, ..., 1550 nm, ..., 1562.5 nm), 每个阵元的频谱间隔为 0.5 nm, 全部共 50 个阵元。首先将它们分为两个谱带, 每个谱带包含 25 个阵元(考虑到实际排列光纤的空间有限, 每个谱带包含的阵元数最好相同), 中心波长分别取为 1544 nm 和 1556.5 nm。设计光栅时, 为简单起见, 仅考虑无损耗正弦介电常数光栅和入射光束为 TE 偏振的情况。

首先考虑 VBG_1 的参量选取, 设 $n_{\perp} = n_{\parallel} = n_0 = 1.46$, 折射率调制振幅 $\Delta n = 0.02$, $\phi_1 = 90^\circ$ 和 $\theta_{B1} = 10^\circ$ 。由于已知 $\lambda_{c1} = 1544$ nm, 根据(1)式可求出光栅周期 Δ_1 为 $3.045 \mu\text{m}$ 。为了使第一谱带的衍射效率达到最大, 同时考虑到 VBG_1 的 3 dB 波长选择性要略大于第一谱带的带宽 12.5 nm, 由严格耦合波理论进行数值计算选取 VBG_1 的厚度为 8.107 mm

(为便于选取全息材料, 也可减小光栅厚度, VBG_1 的波长选择性会相应加宽)。在确定了上述参量后, 由严格耦合波理论可得到第一谱带经 VBG_1 后的衍射效率如图 3 所示。其中实线表示各光束入射角与(6)式确定的角度完全一致时的衍射效率, 它在 Bragg 波长处达到最大值并对于 Bragg 波长对称。当各光束入射角相对式(6)确定的角度偏移 $+5'$ 时, 衍射效率如图 3 中点线所示, 其最大值点向左偏移; 当各光束入射角相对(6)式确定的角度偏移 $-5'$ 时, 衍射效率如图 3 中长虚线所示, 其最大值点向右偏移。这两种情况下, 谱带中心部分各光束的衍射效率变化很小, 而谱带边缘处各光束的衍射效率变化量小于 2%。

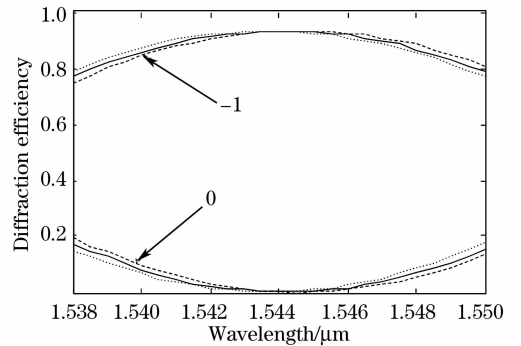


图 3 第一谱带各光束经 VBG_1 后的衍射效率

Fig. 3 Diffraction efficiency of all beams of the first wave band via the VBG_1

图 4 给出了第一谱带中各光束 -1 级衍射光的传播方向与 Bragg 波长光束 -1 级衍射光传播方向的偏差。其中实线表示各光束入射角与(6)式确定的角度完全一致时衍射光传播方向的偏差, 计算结

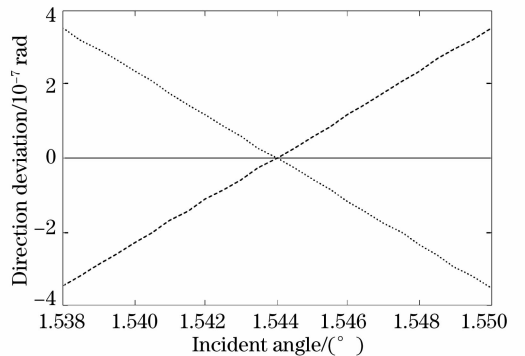


图 4 第一谱带中各光束衍射方向与 Bragg 波长光束衍射方向的偏差

Fig. 4 Direction deviation of the diffracted beams within the first wave band from direction of the beam with Bragg wavelength

果表明该偏差的大小不超过 10^{-15} rad; 当各光束入射角相对(6)式确定的角度偏移 $\pm 5'$ 时, 各衍射光束传播方向的偏差分别如图中点线和长虚线所示, 其大小不超过 4×10^{-7} rad。

由于被 VBG_1 衍射的第一谱带中各光束都以角度 θ_{B1} 入射 VBG_2 , 为了实现两个谱带沿同一方向传播, 应保证 VBG_2 的 Bragg 角 $\theta_{B2} = \theta_{B1}$ 。另外, 为使第一谱带能够以很小的衍射损耗透射过 VBG_2 , 必须保证 VBG_2 角度选择性的零点在 θ_{B1} 附近, 这可通过改变 VBG_2 光栅矢量的方式来实现。已知第二谱带的中心波长为 1556.5 nm 和 VBG_2 的 Bragg 角 $\theta_{B2} = 10^\circ$, 此外仍设 $n_1 = n_{II} = n_0 = 1.46$, $\Delta n = 0.02$ 。若取 $\phi_2 = 80^\circ$, 根据(2)式可求出 VBG_2 的周期 Δ_2 为 1.5585 μm , 然后可计算出 VBG_2 的优化厚度为 8.091 mm。在上述参量下, VBG_2 的角度选择性如图 5 所示。

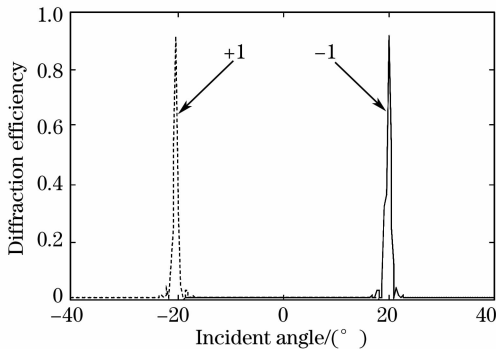


图 5 VBG_2 的角度选择性

Fig. 5 Angular selectivity of the VBG_2

可以看出, 光束只有以接近 $\pm 20^\circ$ 的角度入射时才能被 VBG_2 高效衍射, 否则将表现为直接透射。图 6 给出了两个谱带中各光束经 VBG_2 后的衍射效率。第一谱带由于不满足 VBG_2 的角度选择性而表

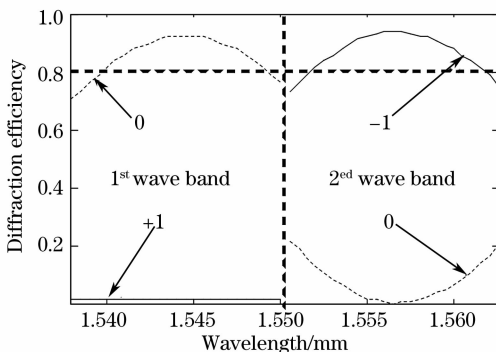


图 6 两个谱带经 VBG_2 后的衍射效率

Fig. 6 Diffractive efficiency of the two wave bands via VBG_2

现为透射, 只有很少一部分能量衍射为 +1 级光。此外, 由于第一谱带中各光束入射 VBG_2 的角度相同, 且波长相差不大, 因此第一谱带中各光束的衍射损耗基本相同, 透射光的效率相比图 3 中的 -1 级光的效率只有微小的下降, 形状完全相同。第二谱带中各光束被 VBG_2 高效地衍射为 -1 级光, 并且所有 -1 级光的传播方向都与 θ_{B2} 一致。在上述参量下, 两个谱带中的所有光束经 VBG_1 和 VBG_2 级联的光栅系统衍射后, 平均衍射效率优于 80%。

数值分析结果表明, 基于两个体光栅级联的系统可实现多个阵元的有效组束。如果在保持每个光栅组束阵元数不变的情况下, 采用三个或多个光栅, 可实现组束阵元数目的倍增。相反, 若组束阵元总的数目不变, 那么当两个以上的光栅级联构成组束器时, 由于组束阵元被分成多组, 每一组中阵元的数目减少, 不仅可有效降低在有限空间内排列阵元的难度, 提高组束效率, 同时可让各阵元的频谱间隔处于合理的范围, 降低对振荡源的要求。

5 结 论

提出了一种基于体光栅级联实现谱组束的方案, 组束阵元数目可随级联光栅数目倍增。采用严格耦合波理论, 推导出了准确确定各光束入射角的理论公式, 设计了两个体光栅级联的组束系统。数值计算结果表明该系统可对多个阵元进行有效组束, 50 个阵元最终的平均衍射效率优于 80%, 在入射角偏离理论值不超过 $\pm 5'$ ($\approx 2.424 \times 10^{-5}$ rad) 的条件下组束光中所有光束的传播方向偏差小于 4×10^{-7} rad。

参 考 文 献

- 1 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1153~1158
何 兵, 楼祺洪, 周 军等. 两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出[J]. 中国激光, 2006, **33**(9): 1153~1158
- 2 V. Reichel, K. Mörl, S. Unger *et al.*. Fiber-laser power scaling beyond the 1-kilowatt level by Nd:Yb co-doping[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5777**: 404~407
- 3 Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu. Experimental investigation of phase detection and compensation in coherent combining of fiber laser array[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(1): 184~187
肖 瑞, 侯 静, 姜宗福. 光纤激光器阵列相干合成中的位相探测与校正方法研究[J]. 物理学报, 2006, **55**(1): 184~187
- 4 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent output power of 60 W from two large-core double-cladding fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1279~1280
何 兵, 楼祺洪, 周 军等. 两根大芯径双包层光纤激光器获得 60 W 相干输出[J]. 光学学报, 2006, **26**(8): 1279~1280
- 5 T. M. Shay, V. Benham, L. J. Spring *et al.*. Self-referenced

locking of optical coherence by single-detector electronic-frequency tagging[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6102**: 61020V-1

6 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. 113-W in-phase mode output from two ytterbium-doped large-core double-cladding fiber lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 412~414

7 H. L. Thomas, A. Liu, P. R. Hoffman *et al.*. 522 W average power, spectrally beam-combined fiber laser with near-diffraction-limited beam quality[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(4): 349~351

8 S. Klingebiel, F. Röser, B. Ortaç *et al.*. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers with high efficiency[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1716~1720

9 T. Y. Fan, A. Sanchez. Coherent (phased array) and

wavelength (spectral) beam combining compared [C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5709**: 157~164

10 O. Andrusyak, I. Ciapurin, V. Smirnov *et al.*. Spectral beam combining of fiber lasers with increased channel density [C]. *Proc. SPIE*, 2007, **6453**: 64531L-1

11 M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(7): 811~818

12 M. G. Moharam, D. A. Pommet, E. B. Grann *et al.*. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings; enhanced transmittance matrix approach [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1077~1086

《激光与光电子学进展》“光学设计”专题征稿启事

《激光与光电子学进展》是中科院上海光机所主办的的科技进展类期刊,中文核心期刊,创刊于1964年,是国内第一本激光领域的专业期刊。本刊以及时报道国内外激光与光电子学领域科技的最新研究成果与技术应用为宗旨,促进国内外学术交流,沟通科研与产业的联系。

光学设计是光学产业的高级技术之一,在光电、半导体、汽车等行业中起着重要的作用。为了深入研讨光学设计技术,探索光学设计最新理念、成功案例,《激光与光电子学进展》将于2008年12期推出“光学设计”专刊,现向光学设计研发、应用人员公开征稿,具体要求如下:

1. 来稿可以为综述、研究论文和实例分析,综述要求内容全面,能反映最新研究进展;研究论文要求具有创新性;实例分析要求应用性强,分析深入,有一定的代表性;

2. 综述要求第一作者有丰富的光学设计经验,在某一方面有较深入的研究或者能够纵观全局,字数不限;

3. 研究论文和实例分析字数在5000~10000,优秀文章更可获得光学设计专家的点评和指导;

4. 本次专题征稿截止时间为2008年10月15日,可在本刊主页投稿或通过信箱投稿 lop@siom.ac.cn,如有问题欢迎垂询(021-69918166);

5. 本次专题征稿审稿通过,在本刊发表不收取版面费;本期光学设计专刊,同期报道上海光机所第5届光学设计高级讲习班、光学设计大赛,欢迎投稿,敬请关注。

《激光与光电子学进展》编辑部

2008-06-23