

文章编号: 0258-7025(2010)12-3056-04

相移反射体布拉格光栅在谱合成中的应用

沈本剑¹ 郑光威² 谭吉春¹ 何焰蓝¹ 刘 莉²

(¹国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073; ²国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 谱合成是获得高功率激光输出的有效方法。建立相移反射体布拉格光栅谱合成模型, 利用传输矩阵法, 分析相移反射体布拉格光栅的衍射特性, 并对反射体布拉格光栅的衍射特性和相移反射体布拉格光栅的衍射特性进行了比较。以两束光为例, 分析相移反射体布拉格光栅谱合成特性, 分析在高斯单色平面波入射条件下, 光谱宽度对谱合成效率的影响。结果表明, 通过在反射体布拉格光栅中引入 $\pi/2$ 的相位畸变, 可有效抑制衍射效率中的旁瓣的影响并增加参与谱合成的光束数目, 对于两束光谱间距为 30 pm 的窄带光束谱合成, 谱合成效率可达 97%。

关键词 激光技术; 谱合成; 传输矩阵; 相移体布拉格光栅

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103712.3056

Spectral Beam Combining by Phase-Shifted Reflective Volume Bragg Gratings

Shen Benjian¹ Zheng Guangwei² Tan Jichun¹ He Yanlan¹ Liu Li²

¹ College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China
² College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract It is an effective approach to obtain high power laser beam output by spectral beam combining. The model of spectral beam combining using phase-shifted reflective volume Bragg gratings is established, and the diffraction characteristic is analyzed by transfer matrix method. The diffraction characteristics of reflective volume Bragg grating and phase-shifted reflective volume Bragg grating are compared. Taking the spectral beam combining of two beams by phased-shifted reflective volume Bragg gratings as an example, the effects of Gaussian monochromatic beam's spectrum width on combining efficiency are analysed. The results show that the side-lobe of diffraction efficiency can be eliminated and the channel number can be increased by phase-shifted reflective volume Bragg gratings, and the combining efficiency can be more than 97% when the spectral beam combines of two beams with a spectral separation of 30 pm.

Key words laser technique; spectral beam combining; transfer matrix; phase-shifted volume Bragg gratings

1 引 言

由于热效应的影 响, 单个激光器的输出功率有限^[1,2]。为获得高功率的激光输出, 将多个激光器进行合成是一种有效的途径。目前, 合成的方法主要有相干合成和非相干合成^[3~5]。相干合成需要精

确控制各路输出光束的相位^[6~8], 而谱合成技术作为典型的非相干合成技术, 对各路输出光束的相位无要求^[4]。

谱合成技术将不同波长的光束合成为一束光束, 在近场和远场均能保持较好的重叠^[9]。这一特

收稿日期: 2010-03-31; 收到修改稿日期: 2010-05-11

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金[NSAF(10676038)]资助课题。

作者简介: 沈本剑(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率激光非相干合成方面的研究。

E-mail: shenbenjian@nudt.edu.cn

导师简介: 谭吉春(1946—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光信息获取、传输与处理等方面的研究。

E-mail: nudt2004@126.com

性使谱合成在高功率激光领域有重要应用。利用光热折变玻璃制成的体布拉格光栅 (VBG) 具有损伤阈值高、衍射效率高特点, 在谱合成中有重要应用^[10~13]。但由于反射体布拉格光栅衍射效率中的旁瓣的影响, 谱合成各光束间的光谱间距受到限制。同时, 限制了参与谱合成的光束数目及谱合成输出功率。目前, 佛罗里达中央大学利用反射体布拉格光栅实现了光谱间距为 250 pm 的 5 束光谱合成输出^[14]。而对于更小光谱间距的谱合成, 目前尚未有报道。

本文在以反射体布拉格光栅为谱合成器件的谱合成模型基础上, 通过对反射体布拉格光栅引入 $\pi/2$ 相位畸变, 有效压缩了衍射效率带宽, 抑制了衍射效率中的旁瓣的影响, 实现了光谱间距为 30 pm 的窄带光束谱合成。

2 谱合成物理模型

反射体布拉格光栅谱合成示意图如图 1(a) 所示, 光栅两边介质为真空, δ 为反射体布拉格光栅的厚度, θ_m 为入射光束在光栅内的折射角。光波 λ_1 在界面 1 以 θ 入射, 当满足布拉格条件时发生衍射。在界面 2 以 θ 入射, 因不满足布拉格条件而透射。在界面 1, λ_1, λ_2 实现同轴输出。然而, 当反射体布拉格光栅衍射效率较高时, 衍射旁瓣在引起能量损失的同时, 限制了谱合成的光束数目。

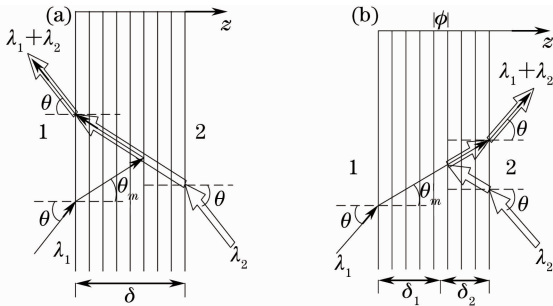


图 1 反射体布拉格光栅(a)与相位畸变体布拉格光栅(b)谱合成示意图

Fig. 1 Spectral beam combining by reflective VBG (a) and phase-shifted reflective VBG (b)

在反射体布拉格光栅谱合成的基础上, 文献^[15]提出一种基于相移布拉格光栅的窄带滤波器设计, 通过控制两个级联反射体布拉格光栅之间的间距, 而在光栅中引入相位畸变, 实现窄带滤波。这里提出采用相移反射体布拉格光栅实现谱合成, 压缩衍射效率带宽, 并抑制衍射旁瓣的影响, 有效增加参与谱合成的光束数目, 实现谱合成。其谱合成示意

图如图 1(b) 所示。

图 1(b) 中, δ_1 和 δ_2 分别为体布拉格光栅的相位畸变位置与光栅前后表面的距离, ϕ 为相位畸变的大小。 λ_1 以 θ 入射至界面 1, 当满足布拉格条件时, 由于在光栅中引入相位畸变, λ_1 将透射至界面 2, 在界面 2 以 θ 透射。在界面 2, λ_2 以 θ 入射, 因不满足布拉格条件, 而发生部分衍射, 在界面 2 以 θ 出射。在界面 2, 两束光实现同轴输出。

3 衍射效率

设 d 表示光栅厚度, λ 表示入射光波长, Λ 表示光栅周期, 当光栅的 Q 参数^[16]: $Q = 2\pi d\lambda / (n_0 \Lambda^2) \gg 1$ 时, 即对于厚光栅, 反射体布拉格光栅的衍射效率可由 Kogelnik 耦合波理论计算得出^[17]。在反射体布拉格光栅中引入相位畸变, 其衍射效率不能直接计算得出, 这里的光栅 Q 参数远大于 1, 可用耦合波理论进行理论分析, 但需要对耦合波理论进行改进。体布拉格光栅的折射率可表示为

$$n(z) = n_0 + n_1 \cos(\mathbf{K} \cdot \mathbf{z}), \quad (1)$$

式中 n_0 表示平均折射率, n_1 表示折射率调制度, \mathbf{K} 表示光栅矢量。

设入射光波为 TE 波, 在光栅内, 光场为

$$E(x, z) = e_r R(z) \exp(-i\mathbf{k}_r \cdot \mathbf{r}) + e_s S(z) \exp(-i\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}), \quad (2)$$

式中 R, S 分别表示入射波和衍射波的复振幅。 $\mathbf{r} = (x, y, z)$, $\mathbf{k}_r, \mathbf{k}_s$ 分别表示入射波和衍射波的波矢。在厚度为 δ 的光栅边界上, R, S 可通过传输矩阵表示^[16]

$$\begin{bmatrix} R(0) \\ S(0) \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} R(\delta) \\ S(\delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(\delta) \\ S(\delta) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $M_{11} = [\cosh(q\delta) + i \frac{\xi}{q} \sinh(q\delta)] \exp(-i\xi\delta)$,

$$M_{12} = -i \frac{\nu}{q} \sqrt{\frac{C_s}{C_r}} \sinh(q\delta) \exp(-i\xi\delta),$$

$$M_{21} = -i \frac{\nu}{q} \sqrt{\frac{C_r}{C_s}} \sinh(q\delta) \exp(-i\xi\delta),$$

$$M_{22} = [\cosh(q\delta) - i \frac{\xi}{q} \sinh(q\delta)] \exp(-i\xi\delta),$$

$C_r = \cos\theta, C_s = -\cos\theta$, 分别表示入射光和衍射光的倾斜因子, $q = i(\xi^2 + \nu^2)^{1/2}$, $\nu = \frac{\mathbf{K}}{(C_r C_s)^{1/2}}$, $\xi =$

$\frac{\Delta\lambda \mathbf{K}^2}{8\pi n_0 C_s}$, $\mathbf{K} = \pi n_1 / \lambda$, 表示耦合矢量, $\Delta\lambda$ 表示入射波长与布拉格波长的偏移量。

当光栅中存在相位畸变 ϕ 时,其矩阵表示为^[18]

$$\Psi = \begin{pmatrix} \exp(i\phi) & 0 \\ 0 & \exp(-i\phi) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

则相移反射体布拉格光栅的传输矩阵可表示为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \Psi \mathbf{M}_2. \quad (5)$$

利用边界条件,可得出衍射效率为

$$\eta = \left| \frac{C_s}{C_r} \right| \left| \frac{S(0)}{R(0)} \right|^2 = \left| \frac{C_s}{C_r} \right| \left(\frac{M_{21}}{M_{22}} \right)^2. \quad (6)$$

4 谱合成分析

设入射光波长 $\lambda_1 = 1064$ nm。选取光栅参数为 $n_0 = 1.52$, $n_1 = 300 \times 10^{-6}$, 光栅厚度 $\delta = 4$ mm, 在光栅厚度为 2 mm 处引入相位畸变 $\phi = \pi/2$, 在相位畸变前后,其衍射效率与波长的关系如图 2 所示。

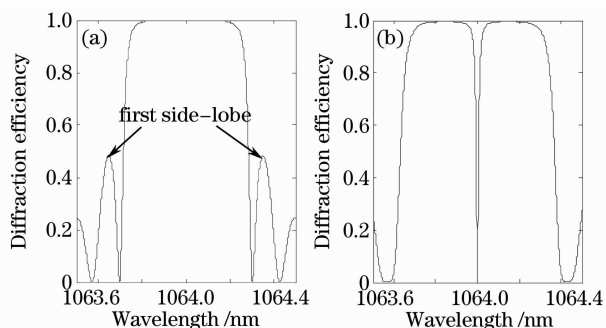


图 2 反射体布拉格光栅(a)和相位畸变反射体布拉格光栅(b)衍射效率与入射波长的关系

Fig. 2 Diffraction efficiency of reflective VBG (a) and phase-shifted reflective VBG (b) versus wavelength

图 2(a)表示无相位畸变时,衍射效率随波长的变化。在无相位畸变时,在 600 pm 的带宽内,均有 100% 的衍射效率,但其一阶旁瓣的衍射效率达 48%。由于旁瓣的影响,其谱合成的光束数目将减小^[19]。图 2(b)表示反射体布拉格光栅引入相位畸变后,其衍射效率随波长的变化。在反射谱中,由于相位畸变的影响,出现一个“通带”,当入射光以布拉格条件入射时,将沿入射方向透射,衍射效率最大值的 $1/e^2$ 宽度为 30 pm。对比图 2(a)和(b)可以看出,当引入相位畸变后,衍射效率的带宽被有效压缩,且消除了旁瓣的影响,在相同的系统响应带宽下,其参与谱合成的光束数目增加,有利于实现窄带高功率激光输出。

设参与谱合成的两束光波为单色平面波,其光强表示为

$$I_j = \exp \left[-2 \left(\frac{\lambda_j - \lambda_{j0}}{\omega_j} \right)^2 \right], \quad (7)$$

式中 ω_j 表示第 j 束光光强最大值的 $1/e^2$ 半宽度,

λ_{j0} 表示其中心波长。在上述光栅参数下,两束光的衍射效率随光谱宽度的变化如图 3 所示。

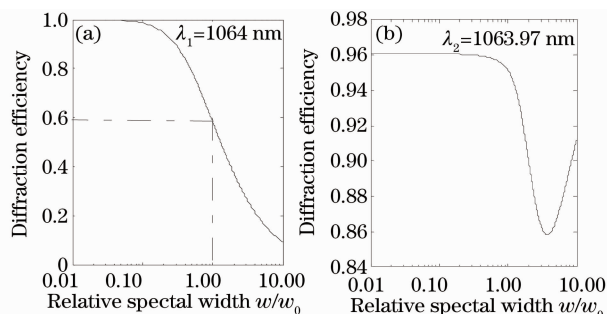


图 3 入射光 λ_1 (a)和入射光 λ_2 (b)衍射效率随相对光谱宽度的变化

Fig. 3 Diffraction efficiency of λ_1 (a) and λ_2 (b) versus relative spectral width

图 3(a)表示入射光中心波长为 1064 nm,在布拉格条件下入射至相位畸变体布拉格光栅,其衍射效率随相对光谱宽度的变化。 ω_0 表示光栅衍射效率最大值的 $1/e^2$ 半宽度。衍射效率随着相对光谱宽度 (ω_j/ω_0) 的增加而减小,当入射光谱宽度为 15 pm(利用体布拉格光栅实现单纵模激光输出可实现^[20])时,其衍射效率为 58%。

图 3(b)表示入射光中心波长为 1063.97 nm,以同样的角度入射至相位畸变体布拉格光栅时,其衍射效率随相对光谱宽度的变化。当入射光谱宽度较大时,由于入射光谱中的部分光谱成分透射,其衍射效率较低。随着光谱宽度的进一步增加,其透过的光谱分量光强减小,衍射效率增加。当光谱宽度较大时,由于透射引起的能量损失限制了谱合成效率^[21],故相对光谱宽度应满足: $\omega_j/\omega_0 < 1$ 。

谱合成效率表示为

$$\eta_{ce} = \frac{(I_1 \eta_1 + I_2 \eta_2)}{(I_1 + I_2)}, \quad (8)$$

式中 I_1, I_2 分别为入射光束的功率, η_1 和 η_2 分别为对应的衍射效率。设两束光具有相同的功率。在不同的相对光谱宽度下,谱合成效率如图 4 所示。可

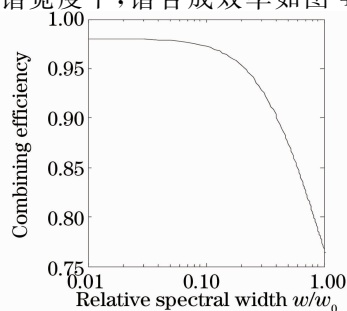


图 4 谱合成效率随相对光谱宽度的变化

Fig. 4 Combining efficiency versus relative spectral width

见谱合成效率随着入射光束的相对光谱宽度的增加而降低,当相对光谱宽度小于 0.1 时,光谱合成效率达 97%,当相对光谱宽度等于 1 时,谱合成效率为 76.78%。

5 结 论

在反射体布拉格光栅谱合成模型的基础上,建立相移反射体布拉格光栅谱合成模型,利用传输矩阵法,分析了相移反射体布拉格光栅的衍射特性。以相移反射体布拉格光栅为谱合成器件,并以两束光为例,分析相移反射体布拉格光栅谱合成特性,计算相对光谱宽度对谱合成效率的影响。结果表明,通过在光栅中引入相移,能有效抑制衍射效率中的旁瓣的影响并增加谱合成光束的数量。并能够实现光谱间距为 30 pm 的窄带光束谱合成,当相对光谱宽度小于 0.1 时,光谱合成效率达 97%,当相对光谱宽度等于 1 时,谱合成效率为 76.78%。

参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3): 567~577
- 2 Wang Jingquan, Fang Liang, Zhang Zhiyou *et al.*. Implementation of coherent array beam combination using two-dimensional sine phase grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 39~43
王景全, 方亮, 张志友等. 用二维正弦相位光栅实现阵列激光相干并束[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 39~43
- 3 S. J. Augst, A. K. Goyal, R. L. Aggarwal *et al.*. Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(5): 331~333
- 4 Cao Jianqiu, Lu Qisheng, Hou Jing *et al.*. Influence of combining errors in the system for coherent combining of fiber lasers on the far field of output[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 351~358
曹涧秋, 陆启生, 侯静等. 光纤激光器相干合成系统中组束误差对远场光场的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 351~358
- 5 Dong Hongcheng, Liu Yang, Yi Kui *et al.*. Theory analysis of polarized beam coherent combination[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2346~2351
董洪成, 刘阳, 易葵等. 偏振光束相干合成的理论分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2346~2351
- 6 P. Sprangle, J. Peñaño, A. Ting *et al.*. Incoherent combining of high-power fiber lasers for long-range directed energy applications [C]. *SSDLTR Proceedings*. 2006
- 7 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun. Influence of atmospheric turbulence on far-field beam quality of coherent and incoherent combined laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1042~1046
周朴, 刘泽金, 许晓军. 湍流对相干合成与非相干合成远场光束质量的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1042~1046
- 8 Lu Changyong, Liu Xu, Liu Yang *et al.*. Coherent combining of two beams based on polarization phase locking[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1437~1441
卢常勇, 刘旭, 刘洋等. 基于偏振锁相的双光束相干合成[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1437~1441
- 9 T. Y. Fan, A. Sanchez. Coherent (phased array) and wavelength (spectral) beam combining compared [C]. *SPIE*, 2005, **5709**: 157~164
- 10 I. V. Ciapurin, L. B. Glebov, L. N. Glebova *et al.*. Incoherent combining of 100-W Yb-fiber laser beams by PTR Bragg grating [C]. *SPIE*, 2000, **4974**: 209~219
- 11 O. Andrusyak, V. Smirnov, G. Venus *et al.*. Beam combining of lasers with high spectral density using volume Bragg gratings [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(13): 2560~2563
- 12 I. V. Ciapurin, L. B. Glebov, V. I. Smirnov. Spectral combining of high-power fiber laser beams using Bragg grating in PTR glass[C]. *SPIE*, 2004, **5335**: 116~124
- 13 S. B. Zhan, S. H. Zhao, X. C. Chu *et al.*. Spectral beam combining of fiber lasers based on a transmitting volume Bragg grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, **42**(2): 308~312
- 14 O. Andrusyak, V. Smirnov, G. Venus *et al.*. Spectral combining and coherent coupling of lasers by volume Bragg gratings[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 2009, **15**(2): 344~353
- 15 J. Lumeau, V. Smirnov, L. B. Glebov. Phase-shifted volume Bragg gratings in photo-thermo-refractive glass[C]. *SPIE*, 2008, **6890**: 68900A
- 16 A. Yan, L. Liu, L. Wang *et al.*. Pulse shaping and diffraction properties of multi-layers reflection volume holographic gratings [J]. *Appl. Phys. B.*, 2009, **96**(1): 71~77
- 17 H. Kongelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. *Bell Syst. Tech. J.*, 1969, **48**(9): 2909~2947
- 18 G. P. Agrawal, S. Radic. Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(8): 995~997
- 19 A. Seviau, O. Andrusyak, I. Ciapurin *et al.*. Ultimate efficiency of multi-channel spectral beam combiners by means of volume Bragg gratings[C]. *SPIE*, 2007, **6453**: 64530R
- 20 W. W. Chen, Y. L. Chen, W. K. Chang *et al.*. Narrow-line, continuous-wave orange 593.5-nm generation in diode-pumped Nd:YVO₄ laser using volume Bragg gratings[C]. *CLEO/IQEC*, 2009, CTuP3
- 21 A. Seviau, O. Andrusyak, I. Ciapurin *et al.*. Spectral beam combining with volume Bragg gratings: cross-talk analysis and optimization schemes[C]. *SPIE*, 2006, **6216**: 62160V