

文章编号: 1001-3806(2012)05-0593-04

## 多路激光体布喇格光栅光谱合成特性研究

王军阵, 汪岳峰\*, 白慧君

(机械工程学院 光学与电子工程系, 石家庄 050003)

**摘要:** 为了研究多路激光体布喇格光栅光谱合成的合成特性, 采用建立多路反射式体布喇格光栅光谱合成系统物理模型的方法, 得到了具有不同谱宽的光束的衍射效率曲线, 以及体布喇格光栅材料的吸收系数和通道间的串扰对总的合成效率的影响曲线。结果表明, 在入射光束中心频率不变的情况下, 随着光束光谱宽度的增大, 衍射效率逐渐减小; 随着光束中心频率与光栅中心频率之间偏移量的增加, 衍射效率逐渐减小; 当光束谱宽与光栅光谱选择宽度大约相等, 并且通道之间的间距较小时, 通道之间由于发生串扰而损失的衍射效率需考虑, 随着合成路数的增加, 总的合成效率受体布喇格光栅材料吸收系数的影响越来越大, 而受串扰的影响则几乎保持不变。

**关键词:** 光谱学; 光谱合成; 体布喇格光栅; 衍射效率; 合成效率

**中图分类号:** O433 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.05.005

## Study on multi-channel spectral beam combined characteristics based on volume Bragg gratings

WANG Jun-zhen, WANG Yue-feng, BAI Hui-jun

(Optics & Electrics Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** In order to study the combined characteristics of multi-channel spectral beam based on volume Bragg gratings (VBG), after building a model for the spectral combining system of multi-channel laser beam by reflective VBG, the diffraction efficiency curve of different beam spectral width was obtained, and the total combination efficiency curves affected by the absorption coefficient of VBG and the cross-talk between channels were also obtained respectively. Numerical results show that diffraction efficiency decreases with the increase of spectral width of beam under condition that the central frequency of the incident beam remains unchanged; diffraction efficiency decreases after increasing the offset between central frequency of incident beam and the central frequency of VBG; the diffraction efficiency of loss due to the cross-talk between neighboring channels should be considered under the condition that the spectral width of incident beam and the spectral selective width of VBG are approximately equal and the condition that the space between neighboring channels is smaller, with the increase of the combination channels, the effect of the absorption coefficient of the material on total combination efficiency gets larger, but the effect of the cross-talk is almost unchanged.

**Key words:** spectroscopy; spectral beam combining; volume Bragg grating; diffraction efficiency; combining efficiency

### 引言

激光器中的非线性效应以及热损伤效应等限制了单个激光器的最大平均输出功率和亮度的提高<sup>[1]</sup>, 成为了单个激光器向高功率发展的瓶颈。为了获得高功率的输出激光, 一种有效的方法是将多个激光器输出的激光束进行光束合成, 光束合成的方法目前主要分为相干合成和非相干合成两种<sup>[2]</sup>。相干合成技术是获得高光束质量、高功率输出激光的有效方法, 但其技术相对比较复杂, 需要精确的针

对各路激光的相位控制技术<sup>[3]</sup>。与相干合成技术相比, 非相干合成技术对各路激光的相位没有要求<sup>[4]</sup>, 而且, 当光束在空间重叠时各光束之间不会发生空间干涉, 非相干合成技术是获得高功率激光的有效途径。光谱合成是非相干合成技术的典型代表, 采用色散元件对各路激光器输出的不同波长的激光束进行远场和近场的光束叠加, 合成光束的光束质量几乎与单个激光器的光束质量相当<sup>[5-6]</sup>, 这使得光谱合成技术在高功率激光领域有重要应用。利用光热折变无机玻璃(又叫光敏玻璃)制成的体布喇格光栅具有损伤阈值高、衍射效率高特点, 是高功率激光光谱合成的理想器件<sup>[7-9]</sup>。本文中使用的反射式体布喇格光栅建立了多路激光的光谱合成系统物理模型, 计算了入射光光谱宽度及光束中心频率与光栅

作者简介: 王军阵(1984-), 男, 博士研究生, 主要从事激光合成方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: wyfmail@sina.com

收稿日期: 2012-01-04; 收到修改稿日期: 2012-02-13

中心频率之间偏移量对衍射效率的影响,在考虑体布喇格光栅衍射旁瓣影响的基础上,分析了多路激光器合成的总的合成效率受体布喇格光栅吸收系数及相邻入射光束之间串扰的影响。

### 1 体布喇格光栅光谱合成的基本原理

反射式体布喇格光栅谱合成的结构示意图如图 1 所示。在图 1 中,光栅的周期为  $\Lambda$   $f$  为光栅的空间频率 ( $f = \frac{1}{\Lambda}$ ) ,光栅的厚度为  $t$ 。光栅的折射率沿表面法线  $z$  方向的分布可表示为<sup>[10]</sup>:

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

式中  $n_0$  为背景折射率;  $\Delta n$  为折射率调制的振幅;  $\mathbf{K}$  为光栅矢量,方向垂直于体布喇格光栅中折射率为常数的平面,其大小为  $\frac{2\pi}{\Lambda}$ ;  $\varphi$  为余弦函数的相位。

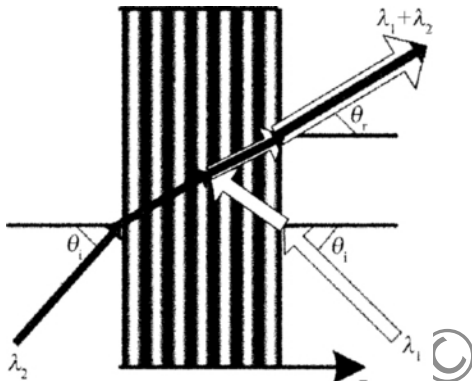


Fig. 1 Scheme of spectral beam combining with reflective volume Bragg grating

在图 1 中,中心波长为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的两束激光从光栅两面对称地分别以相同的角度  $\theta$  入射到体布喇格光栅上  $\theta_r$  为波长为  $\lambda_1$  的入射光在光栅内的折射角,中心波长为  $\lambda_1$  的激光束满足布喇格条件:  $2n_0\Lambda\cos\theta_r = \lambda_1$ , 由于衍射作用而几乎发生全反射,另一束中心波长为  $\lambda_2$  的激光由于不满足布喇格条件,其衍射效率几乎为 0, 从而发生透射,最终两束激光从相同点以相同的角度输出,达到光谱合成目的。

多路激光体布喇格光栅合成的示意图如图 2 所示,其中每个光栅只对满足布喇格条件的光束实现高效率衍射,而对其它波长的光束近似完全透射。

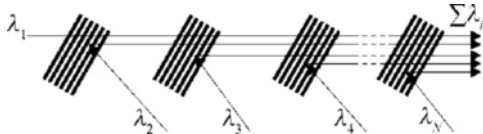


Fig. 2 Scheme of multi-channels spectral beam combining with reflective volume Bragg grating

根据 KOEGLNIK 的耦合波理论<sup>[11]</sup>,考虑反射式体布喇格光栅的栅线平行于体光栅表面的情况,在入

射光满足布喇格条件入射时,设入射光的波长与体布喇格光栅的中心波长  $\lambda_0$  的偏差为  $\Delta\lambda$ , 则体布喇格光栅的衍射效率为<sup>[12]</sup>:

$$\eta(\Delta\lambda) = \left\{ 1 + \frac{1 - \left( \frac{\lambda_0 f^2 \Delta\lambda}{2n_0 \Delta n} \right)^2}{\sinh^2 \left[ \left( \frac{2\pi n_0 t \Delta n}{\lambda_0^2 f} \right)^2 - \left( \frac{\pi f t \Delta\lambda}{\lambda_0} \right)^2 \right]^{1/2}} \right\}^{-1} \quad (2)$$

当  $\Delta\lambda = 0$  时,可得衍射效率的最大值<sup>[12]</sup>:

$$\eta_0 = \tanh^2 \left( \frac{\pi t \Delta n}{\lambda_0 |\cos\theta_r|} \right) \quad (3)$$

### 2 光栅的衍射特性分析

使用波长为 976nm 到 976nm + 50nm 内的多束激光束为例进行研究。以波长为 976nm 为例分析体布喇格光栅的光谱衍射特性,当光栅厚度  $t = 1.5\text{mm}$ 、折射率调制幅值  $\Delta n = 760 \times 10^{-6}$ 、调制周期  $\Lambda = 0.371\mu\text{m}$ 、布喇格角  $\theta_r = 0.48\text{rad}$  时,通过计算得出光栅的光谱衍射特性曲线如图 3 所示。

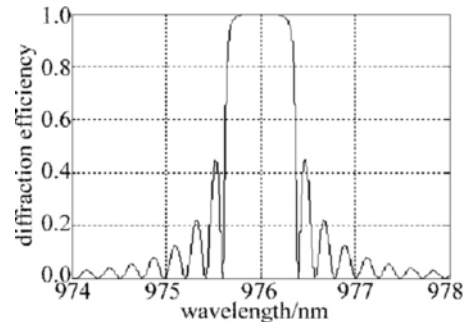


Fig. 3 Spectral diffraction characteristics of volume Bragg grating

从图 3 可以看出,光栅的光谱特性中存在较大的旁瓣,其中在极值衍射效率  $\eta_0 = 99.9\%$  的情况下,前 3 级旁瓣分别为 44.8% 22.1% 和 12.5%,由计算可知,旁瓣的峰值随极值衍射效率的增大而增大。当具有一定谱宽的一束光(例如 976nm)以满足布喇格条件入射时,衍射效率达到最大值,与其相邻的具有一定谱宽的另一束光(例如 977nm)从体布喇格光栅的另一面以相同的角度入射时,会受到光谱特性中旁瓣的影响,存在一定的衍射效率而降低其透射率,因此在合成光束的光谱间距较小时旁瓣对总的衍射效率的影响不可忽略。

### 3 多路激光谱合成特性分析

设参与光谱合成的入射光的光谱线宽为高斯线型:

$$G(\lambda, w) = \exp \left[ -2 \left( \frac{\lambda - \lambda_0}{w} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中  $\lambda_0$  为入射光束的中心波长,  $\mu$  为入射光束的半光谱宽度。

光栅对具有一定谱宽的光束的衍射效率为:

$$\eta = \frac{\int \eta(\lambda) G(\lambda, \mu) d\lambda}{\int G(\lambda, \mu) d\lambda} \quad (5)$$

式中  $\eta(\lambda)$  为光栅对单色波  $\lambda$  的衍射效率。

图 4 中给出了入射光束谱宽  $2\mu$  分别为 0.1nm, 0.3nm, 1nm 和 2nm、体布喇格光栅的谱选择性为 0.8nm (如图 3 所示) 的情况下, 入射光束的中心波长偏离布喇格光栅中心波长时的衍射效率。从图 4 中可以看出, 体布喇格光栅中心波长位置的极值衍射效率随着入射光束谱宽的增宽而下降。当光束的谱宽增加到 2nm 时, 最大衍射效率下降到 60%。当光束的中心波长偏离体布喇格光栅中心波长一定距离, 尤其是在 1/2 的布喇格谱宽附近时, 衍射效率将迅速减小。因此, 在进行高功率激光合成时, 稳定入射光束的波长对于提高合成效率显得非常重要。从图 4 中还可以看出, 为了在一定的频带宽度内增加合成路数, 导致参与光束合成的两束激光靠得较近时, 需要考虑旁瓣对相邻的另一束光的衍射效率的影响, 两束光靠得越近, 串扰效率将越大。

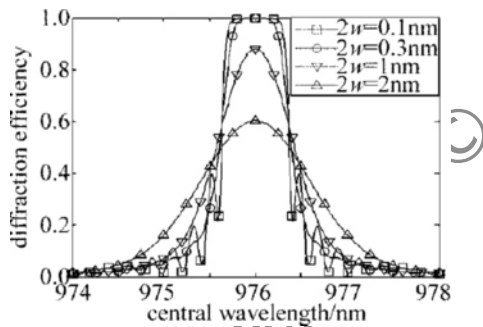


Fig. 4 Diffraction efficiency of different beam spectral width

考虑  $N$  束功率都为  $P$  的激光采用  $(N-1)$  个体布喇格光栅进行光谱合成, 其激光谱宽均为 0.3nm, 它们的中心波长取值从 976nm、以 1nm 的间距递增, 假设体布喇格光栅的吸收系数为  $\alpha$ , 满足体布喇格条件的入射光的衍射效率为  $\eta_d$ , 与其相邻的另一束激光的衍射效率为  $\eta_c$ , 则合成后的总功率为:

$$P_{\text{total}}(N) = P \left\{ (1 - \alpha t)^{(N-1)} (1 - \eta_c) + \eta_d \times \left[ 1 + (1 - \eta_c) \frac{(1 - \alpha t) [1 - (1 - \alpha t)^{(N-2)}]}{1 - (1 - \alpha t)} \right] \right\} \quad (6)$$

式中, 光栅的吸收系数  $\alpha > 0$ , 合成路数  $N \geq 2$ 。

由 (6) 式可知,  $(N-1)$  个反射式体布喇格光栅合成的总的合成效率为:

$$\eta_{\text{total}}(N) = \frac{1}{N} \left\{ (1 - \alpha t)^{(N-1)} (1 - \eta_c) + \eta_d \times \right.$$

$$\left. \left[ 1 + (1 - \eta_c) \frac{(1 - \alpha t) [1 - (1 - \alpha t)^{(N-2)}]}{1 - (1 - \alpha t)} \right] \right\} \quad (7)$$

图 5 与图 6 中分别给出了总的合成效率随吸收系数及串扰效率的变化曲线。在图 5 中, 取光栅厚度  $t = 1.5\text{mm}$ , 串扰效率  $\eta_c = 5\%$ ; 图 6 中, 光栅厚度  $t = 1.5\text{mm}$ , 光栅的吸收系数  $\alpha = 0.02\text{mm}^{-1}$ 。从图 5 可以看出, 总的合成效率随着吸收系数的增加而减小, 特别是当合成路数较多时, 吸收系数对总的合成效率影响非常大; 从图 6 可以看出, 总的合成效率随串扰效率的增加而减小, 增加合成路数时, 串扰效率对总的合成效率的影响较小。在实际的光谱合成中, 采用吸收系数较小的材料制作体布喇格光栅, 减小串扰效率可提高光谱合成的总合成效率。另外, 在吸收系数已定的情况下, 减小光栅的厚度也可提高总的合成效率。

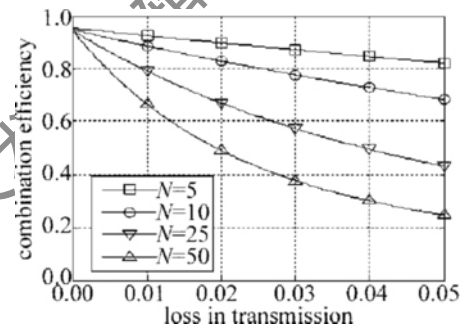


Fig. 5 Effect of absorption coefficient on total combination efficiency

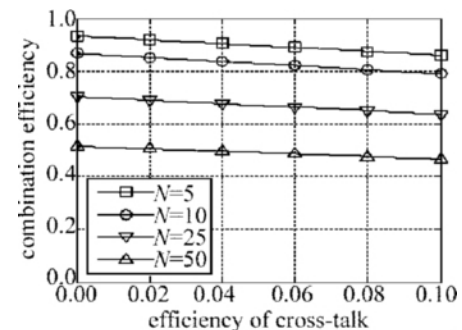


Fig. 6 Effect of cross-talk between channels on total combination efficiency

## 4 结 论

在分析反射式体布喇格光栅衍射特性的基础上, 建立了多路激光反射式体布喇格光栅光谱合成的物理模型。数值分析结果表明, 当激光束的中心波长偏离体布喇格光栅中心波长时, 衍射效率将减小; 在一定的带宽内, 当需要通过提高合成路数来增加总的输出功率时, 串扰对总的合成效率的影响将逐渐增大; 另外, 在串扰一定的情况下, 随着合成路数的增加, 光栅的吸收系数对总的合成效率的影响越来越明显, 在合成路数较多时, 总的合成效率会随着吸收系数的增加而迅速减小。因此, 在实际光谱合成时, 为了实现高效率的

光谱合成,不仅需要减小入射激光的谱宽,稳定入射激光的中心波长使其不发生漂移,还应有效地寻找减小串扰的新方法,并尽量减小体布喇格光栅的吸收系数。

#### 参 考 文 献

- [1] FAN T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 567-577.
- [2] AUGST S J, GOYAL A K, AGGARWAL R L, *et al.* Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers[J]. Optics Letters, 2003, 28(5): 331-333.
- [3] ZHOU P, HOU J, CHEN Z L, *et al.* Comparison for coherent combining and spectrum combining of fiber lasers[J]. Laser Technology, 2008, 32(4): 413-416 (in Chinese).
- [4] CAO J Q, LU Q S, HOU J, *et al.* Influence of combining errors in the system for coherent combining of fiber lasers on the far field of output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(3): 351-358 (in Chinese).
- [5] ANDRUSYAK O, CIAPURIN I, SMIRNOV V, *et al.* Spectral beam combining of fiber lasers with increased channel density[J]. SPIE, 2007, 6453: 1-7.
- [6] KANEDA Y S, FAN, HSU T C, *et al.* High brightness spectral beam combination of high-power vertical-external-cavity surface-emitting lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(17): 1795-1797.
- [7] CIAPURIN I V, GLEBOV L B, SMIRNOV V. Spectral combining of high-power fiber laser beams using Bragg grating in PTR glass[J]. SPIE, 2004, 5335: 116-124.
- [8] ANDRUSYAK O, SMIRNOV V, VENUS G, *et al.* Beam combining of lasers with high spectral density using volume Bragg gratings[J]. Optics Communications, 2009, 282(13): 2560-2563.
- [9] ZHAN S B, ZHAO S H, CHU X C, *et al.* Spectral beam combining of fiber lasers based on a transmitting volume Bragg gratings[J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(2): 308-312.
- [10] MOHARAM M G, GAYLORD T K. Coupled-wave analysis of reflection gratings[J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 240-244.
- [11] KOGELNIK H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. The Bell System Technical Journal, 1969, 48(9): 2909-2945.
- [12] CIAPURIN I V, GLEBOV L B, SMIRNOV V I. Modeling of Gaussian beam diffraction on volume Bragg gratings in PTR glass[J]. SPIE, 2005, 5742: 183-193.

版权所有 © 《激光技术》编辑部