

文章编号: 1001-3806(2013)05-0656-04

## Gaussian 切趾体光栅在光谱合成中的应用研究

刘 兵, 李 坚

(中国人民解放军驻二〇九所军事代表室, 成都 610041)

**摘要:** 为了研究切趾技术对体光栅旁瓣的抑制效果及切趾体光栅的光谱合成特性, 采用 Gaussian 切趾技术对体光栅旁瓣进行了抑制, 并用传输矩阵法分析了 Gaussian 切趾体光栅的衍射特性, 给出了 Gaussian 切趾体光栅光谱合成效率公式, 分析了切趾光栅对光谱合成效率影响; 切趾后体光栅旁瓣对应的前 4 级峰值衍射效率由 73%, 47%, 31%, 22% 降低到 11%, 20%, 10%, 7%。合成路数和光束光谱宽度一定时, 合成效率随衍射损耗的增大而减小。结果表明, Gaussian 切趾技术能够有效抑制体光栅旁瓣, 进而减小体光栅对相邻合成光束的衍射损耗, 增大合成效率。

**关键词:** 光栅; 谱合成; Gaussian 切趾; 衍射效率; 谱合成效率

**中图分类号:** O433 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.05.020

### Study about spectral beam combining with volume Bragg grating by means of Gaussian apodization technique

LIU Bing, LI Jian

(Military Representative Office of Chinese People's Liberation Army Accredited in The 209 Institute, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to study the suppression effect of side lobes of volume Bragg gratings (VBG) and the characteristics of the spectral beam combining with apodized VBG, the side-lobe of VBG was suppressed by means of Gaussian apodization. The diffraction characteristics of the Gaussian-apodized Bragg grating were analyzed based on the chain matrix method. Then the function of the combining efficiency with apodized grating was given, and the effect of apodized grating on the combining efficiency was analyzed. The results show that the peaks of the first four side-lobe are reduced from 73%, 47%, 31%, 22% to 11%, 20%, 10%, 7%, respectively. The combining efficiency decreases as the diffraction loss increases, when the number and the spectral width of combining beam are limited. Therefore, the diffraction loss between the combined beams is suppressed well after using the Gaussian-apodized grating that suppress the side-lobe of the VBG, and the combining efficiency increases.

**Key words:** grating; spectral beam combining; Gaussian-apodized; diffraction efficiency; combining efficiency

## 引 言

光谱合成技术是提高激光输出功率的一种有效途径<sup>[1-6]</sup>。采用光热折变玻璃制作的体光栅具有良好的热机械稳定性, 激光破坏阈值非常高, 衍射效率高达 95% 以上, 是光谱合成的理想器件, 但其衍射旁瓣的存在, 限制了合成效率和合成功率提高。为了实现高效率光谱合成, 可借助光纤光栅领域的切

趾技术<sup>[7-8]</sup>, 目前有采用 sinc 切趾<sup>[9-10]</sup>方法来抑制体光栅旁瓣的影响, 进而增加光谱合成光束数目的报道。但是光强分布为 sinc 函数型的光束在实验中较难获得, 而光强分布为 Gaussian 型的光束在实验中更容易实现。因此, 本文中主要研究 Gaussian 切趾体光栅的衍射特性, 建立 Gaussian 切趾体光栅的折射率分布模型, 以及 Gaussian 切趾体光栅光谱合成模型, 分析切趾光栅对光谱合成效率的影响。

## 1 理论模型

未经切趾的体光栅的折射率分布可表示为:

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

作者简介: 刘 兵 (1968-), 男, 工程师, 研究方向为激光技术、电视跟踪技术。

E-mail: 229817210@qq.com

收稿日期: 2013-01-23; 收到修改稿日期: 2013-03-18

式中,  $n_0$  为光栅材料的折射率;  $n(z)$  为折射率空间变化包络,  $z$  为表面法线方向,  $\mathbf{K}$  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  $2\pi/\Lambda$ ,  $\Lambda$  为体布喇格光栅的周期,  $\varphi$  为余弦函数的相位。

对于 Gaussian 切趾布喇格光栅,  $n(z)$  可表示为:

$$n(z) = n_m \exp\left[-2\left(\frac{z-t/2}{t}\right)^2\right], (0 \leq z \leq t) \quad (2)$$

式中,  $n_m$  为折射率调制幅值,  $t$  是光栅厚度。

因此, Gaussian 切趾布喇格光栅的折射率沿表面法线  $z$  方向的分布为:

$$n = n_0 + n_m \exp\left[-2\left(\frac{z-t/2}{t}\right)^2\right] \cos(\mathbf{K} \cdot \mathbf{z} + \varphi) \quad (3)$$

由于 Gaussian 切趾体布喇格光栅的折射率空间变化包络函数沿法线方向不是常数, 采用耦合波理论<sup>[11]</sup>无法分析其衍射特性。本文中采用传输矩阵方法<sup>[12-13]</sup>, 把切趾体光栅沿表面法线  $z$  方向分为若干薄层, 设总层数为  $N$ 。当入射光以波长  $\lambda$  入射至光栅表面时, 第  $i$  层的入射波和反射波的振幅与第  $i+1$  层的入射波和反射波振幅之间的关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} E_{inc,i} \\ E_{ref,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ B_i^* & A_i^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{inc,i+1} \\ E_{ref,i+1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $E_{inc,i}$ ,  $E_{ref,i}$  分别表示第  $i$  层的入射波和反射波的振幅;  $A_i = (1/t_i) \exp[jkn_{2,i}\delta_i \cos\theta_{2,i}]$ , 其中  $t_i$  表示第  $i$  层振幅透过率,  $k = 2\pi/\lambda$  表示入射光的波数,  $\lambda$  表示入射光在真空中的波长,  $\delta_i$  表示第  $i$  层的厚度,  $n_{2,i}$  表示第  $i$  层的平均功率,  $\theta_{2,i}$  表示入射光在第  $i$  层的折射角;  $B_i = r_i A_i^*$ ,  $r_i$  表示第  $i$  层的振幅反射率。当入射波为 TE 波(振动方向与入射面  $y-z$  平面垂直)时, 振幅反射率和振幅透过率可表示为:  $r_i = (Z_i - Z_{i-1}) / (Z_i + Z_{i-1})$ ,  $t_i = 1 + r_i$ , 其中,  $Z_i$  表示光栅内第  $i$  层的归一化波阻,  $Z_i = \cos\theta_1 / [(n_{2,i}/n_1)^2 - \sin^2\theta_1]^{1/2}$ 。对第 0 层有  $Z_0 = 1$ , 对第  $N+1$  层有:  $Z_{N+1} = \cos\theta_1 / [(n_3/n_1)^2 - \sin^2\theta_1]^{1/2}$ , 其中,  $Z_0, Z_{N+1}$  分别表示光栅两侧介质的归一化波阻。

对于共有  $N$  层的切趾体布喇格光栅, 其衍射波和透射波的振幅可表示为:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ E_r \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^N \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ B_i^* & A_i^* \end{bmatrix} \frac{1}{t_{N+1}} \begin{bmatrix} 1 & r_{N+1} \\ r_{N+1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $E_r$  和  $E_t$  分别表示衍射波和透射波的振幅;  $M_{11}, M_{12}, M_{21}$  和  $M_{22}$  分别表示各传输矩阵乘积所得的矩阵对应的矩阵元。

光栅的衍射效率为:

$$\eta = E_r E_r^* = \left| \frac{M_{11}}{M_{21}} \right|^2 \quad (6)$$

## 2 Gaussian 切趾体光栅的衍射特性

以波长为 976nm 的光束为例, 分析 Gaussian 切趾体光栅的衍射特性。取光栅参量为:  $t = 2.0\text{mm}$ ,  $\lambda_0 = 976\text{nm}$ , 光束的入射布喇格角  $\theta = 10^\circ$ ; 当折射率调制幅值  $n_m = 850 \times 10^{-6}$  时, Gaussian 切趾前后体光栅的光谱衍射特性曲线如图 1 所示。

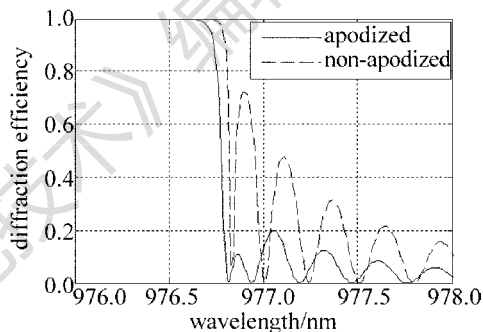


Fig. 1 Spectral diffraction characteristics of Gaussian-apodized volume Bragg grating

图 1 中给出了谱选择性带宽为 0.6nm 的体光栅经 Gaussian 切趾前后的光谱特性曲线, 虚线表示切趾前体光栅的衍射特性曲线, 实线表示高斯切趾后体光栅的衍射特性曲线。从图 1 中看到, 未经切趾的体光栅, 其光谱特性曲线中前 4 级旁瓣对应的峰值衍射效率分别为 73%, 47%, 31%, 22%。采用 Gaussian 切趾后, 体光栅的光谱特性曲线的旁瓣被有效抑制, 切趾体光栅前 4 级旁瓣对应的衍射效率峰值分别为 11%, 20%, 10%, 7%; 切趾后 1 级衍射旁瓣的峰值衍射效率下降幅度最大。同时, 经过 Gaussian 切趾后, 体光栅的光谱选择性范围变窄。

## 3 高斯切趾体光栅的光谱合成特性分析

下面研究高斯切趾体光栅的光谱合成特性。

设入射光束的光谱线宽为  $G(\lambda, w)$ , 则切趾光栅对入射光束的衍射效率为<sup>[14]</sup>:

$$\eta_\lambda(w) = \frac{\int \eta(\lambda) G(\lambda, w) d\lambda}{\int G(\lambda, w) d\lambda} \quad (7)$$

式中,  $w$  为入射光束的光谱宽度,  $\eta(\lambda)$  是光栅对单

色波  $\lambda$  的衍射效率。

图 2 中给出了光束谱宽分别为 0.1nm, 0.5nm 和 1nm 的情况下, 切趾体光栅对入射光束的衍射效率的变化情况, 图中切趾体光栅的谱选择性为 0.6nm。从图 2 中看到, 对中心波长相等的入射光束, Gaussian 切趾体光栅对该光束的衍射效率随着入射光束的谱宽增大而减小, 图中光谱宽度为 0.1nm 和 1nm 的光束对应的最大衍射效率分别为 99.9% 和 72%。对光谱宽度相等的入射光束, 当光束的中心波长偏移布喇格中心波长而远小于光谱选择性宽度时, 衍射效率最大, 波长偏移量在光谱选择性宽度附近时, 衍射效率将迅速减小, 当波长偏移量大于 4 倍的光谱选择性宽度后, 衍射效率小于 5%, 此时对入射光束近乎透射。

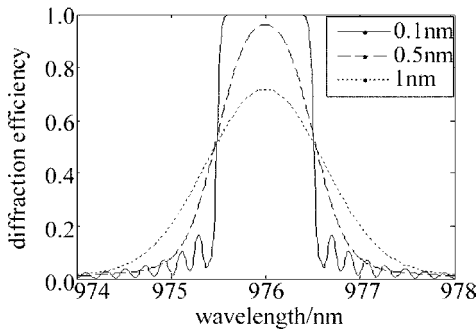


Fig. 2 Effect of wavelength separation on diffraction efficiency

图 3 中给出了 Gaussian 切趾体光栅的波长选择性宽度不同时, 衍射效率随光束谱宽的变化曲线。曲线 1 ~ 曲线 4 对应的光谱选择性宽度分别为 0.1nm, 0.5nm, 1nm 和 3nm。从图 3 看出, 光束谱宽一定的情况下, 光谱选择性宽度越大, 衍射效率越高; 光谱选择性宽度一定的情况下, 入射光束的谱宽小于光栅的谱选择性半宽时, 其衍射效率接近 100%, 当入射光束的谱宽等于光栅的谱选择性半宽时, 其衍射效率下降到 90% 左右; 之后随着光束的谱宽的增大, 衍射效率急剧下降。

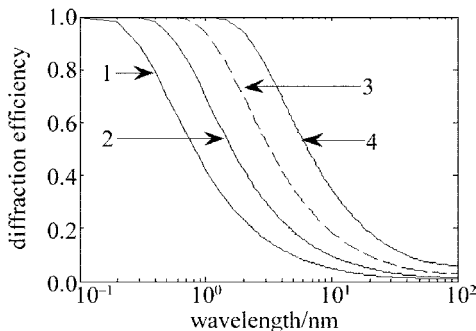


Fig. 3 Dependence of apodized grating diffraction efficiency on the beam spectral width

下面分析多路激光 Gaussian 切趾体光栅光谱合

成特性, 多路激光 Gaussian 切趾体光栅光谱合成如图 4 所示。设  $N$  路激光的功率均为  $P_0$ , 采用  $N-1$  个 Gaussian 切趾体光栅作为合成器件。

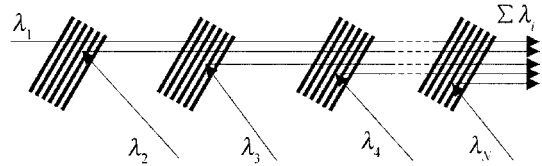


Fig. 4 Scheme of multi-channel spectral beam combining with apodized volume Bragg grating

$N$  个参与合成的光束的波长满足如下条件:

$$\lambda_0 \leq \lambda_i \leq \lambda_0 + \Delta\lambda, (i = 1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

式中,  $\Delta\lambda$  为合成光束的谱宽。

从切趾体光栅光谱合成特性分析中看到, 体光栅经过切趾后, 其旁瓣得到极大地抑制, 但是多路激光体光栅光谱合成时, 依然存在一定的衍射损耗, 将切趾体光栅材料的吸收损耗忽略不计, 分析切趾体光栅衍射损耗对总的合成效率的影响。

对光束  $\lambda_1$ , 经过  $N-1$  个体光栅透射后, 其功率为:

$$P_1 = P_0 \eta_t^{N-1} \eta_{1,c} \eta_{2,c} \dots \eta_{(N-1),c} \quad (9)$$

式中,  $\eta_{i,c}$  为第  $i$  个 Gaussian 切趾体光栅对入射光束的衍射损耗,  $i = 1, 2, \dots, N-1$ , 每个光栅只对满足布喇格条件的光束实现高效率衍射, 设  $\eta_d$  为切趾体光栅对满足布喇格条件的光束的衍射效率。而对其它波长的衍射效率极低, 但在多路合成时需考虑到该衍射损耗的影响;  $\eta_t$  为切趾体光栅对入射光束的透射效率。

对其它参与合成的光束有:

$$P_i = P_0 \eta_t^{N-i+1} \eta_d \eta_{1,c} \eta_{2,c} \dots \eta_{(N-i),c} \quad (10)$$

$$P_N = P_0 \eta_t \eta_d \quad (11)$$

$$P(N) = P_0 \eta_d \left( \eta_t^{N-1} \prod_{i=1}^{N-2} \eta_{i,c} + \eta_t^{N-2} \prod_{i=1}^{N-3} \eta_{i,c} + \dots + \eta_t \right) + P_0 \eta_t^{N-1} \prod_{i=1}^{N-1} \eta_{i,c} \quad (12)$$

因此总的合成效率为:

$$\eta(N) = \frac{1}{N} \times$$

$$\left[ \eta_d \left( \sum_{j=1}^{N-2} \eta_t^{N-j} \prod_{i=1}^{N-j-1} \eta_{i,c}' + \eta_t \right) \eta_t^{N-1} \prod_{i=1}^{N-1} \eta_{i,c}' \right] \quad (13)$$

通过光谱宽度与衍射效率的关系的分析可得,

切趾体光栅的衍射损耗在波长偏移量大于4倍的光谱选择性宽度时变化极小,此时的光束谱宽对衍射效率的影响可以忽略,因此要得到较高的合成效率,相邻两束光的波长间距应大于4倍的光谱选择性宽度。但是在合成光束谱宽一定的情况下,相邻两束光的波长间距越大,参与合成的光束的路数越小,总的合成功率也越小,虽然提高了合成效率,但合成功率并不一定提高。所以光谱合成时,需要综合考虑有限谱宽内的合成数目和波长间距的关系,减小串扰损耗,提高合成效率。

不同的合成光束数目对应不同的光谱间距,切趾体光栅对不同光谱宽度的光束的衍射损耗不同,根据(13)式分别计算合成10路、15路、20路光束的合成效率,如图5所示。从图5中看到,合成路数和光束光谱宽度一定时,合成效率随衍射损耗的增大而减小,这是由于相邻光束光谱间距越小,切趾体光栅对光束的衍射效率越大,对合成光束的衍射损耗增大,造成合成效率的减小。光束光谱宽度和光谱间距一定时,合成效率随合成路数的增大而减小,这主要是由于合成路数的增大,体光栅对合成光束的损耗叠加,造成合成效率下降。

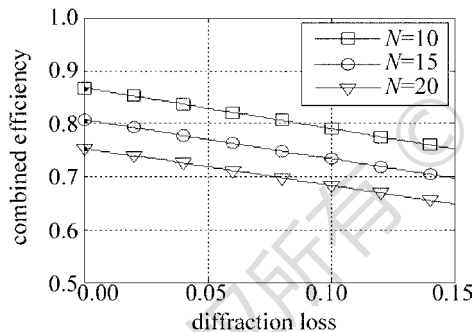


Fig. 5 Dependence of the combined efficiency on diffraction loss

#### 4 结论

体光栅作为光谱合成的主要元件,由于其衍射旁瓣的存在,限制了合成光束的光谱间距及参与光谱合成光束的数目。本文中采用了 Gaussian 切趾技术对体光栅旁瓣进行抑制,建立了 Gaussian 切趾体光栅的折射率分布模型,分析了 Gaussian 切趾体光栅的衍射特性,给出了 Gaussian 切趾体光栅光谱合成效率公式,分析了切趾光栅对光谱合成效率影响。计算结果表明:体光栅经过 Gaussian 切趾后,有效减小了体光栅对相邻合成光束的衍射损耗,切趾后体

光栅旁瓣对应的前4级峰值衍射效率分别由73%,47%,31%,22%降低到11%,20%,10%,7%;合成路数和光束光谱宽度一定时,合成效率随衍射损耗的增大而减小;光束光谱宽度和光谱间距一定时,合成效率随合成路数的增大而减小。

#### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] LIU Z J, ZHOU P, WANG X L. The history, development and tend of coherent combining of laser beams[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2221-2234 (in Chinese).
- [3] ZHAN Sh B, ZHAO Sh H, CHU X Ch, *et al.* Spectral beam combining of fiber lasers based on a transmitting volume Bragg grating [J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(2): 308-312.
- [4] XIN G F, PI H Y, SHEN L. Beam incoherence combination of high power laser diode [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010(10): 101404 (in Chinese).
- [5] HUANG R K, CHANN B, MISSAGGIA L J, *et al.* High-brightness wavelength beam combined semiconductor laser diode arrays [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(4): 209-211.
- [6] PHUA P B, LIM Y L. Coherent polarization locking with near-perfect, combining efficiency [J]. Optics Letters, 2006, 31(14): 2148-2150.
- [7] ANDRUSYAK O, SMIRNOV V I, VENUS G B, *et al.* Spectral combining and coherent coupling of lasers by volume Bragg gratings [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 344-353.
- [8] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [9] LANDE D, ORLOV S S, HESSELINK L. Two-photon apodization in lithium niobate [J]. Optics Letters, 1998, 23(17): 1399-1401.
- [10] SHEN B J, ZHENG G W, TAN J Ch, *et al.* Diffraction characteristic analysis of sinc-apodized reflective volume Bragg grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(9): 18-24 (in Chinese).
- [11] KOEHLNIK H. Coupled wave theory for thick holographic gratings [J]. The Bell System Technology Journal, 1969, 48(9): 2909-2947.
- [12] SHEN B K, TAN J Ch, ZHENG G W, *et al.* Channel spectral separation narrowing for spectral beam combining by apodisation of the reflecting volume bragg grating [J]. Defence Science Journal, 2011, 61(3): 201-205.
- [13] SHEN B J, TAN J Ch, ZHENG G W, *et al.* Characteristics of spectral beam combining with sinc apodized Bragg grating [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3): 593-598 (in Chinese).
- [14] WANG J Zh, WANG Y F, BAI H J. Study on multi-channel spectral beam combined characteristics based on volume Bragg gratings [J]. Laser Technology, 2012, 36(5): 593-596 (in Chinese).