

Sinc 切趾反射体布拉格光栅衍射特性分析

沈本剑¹ 郑光威² 谭吉春¹ 何焰蓝¹

(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 基于 sinc 切趾反射体布拉格光栅的谱合成技术是获得高功率谱合成输出的有效方法。考虑到入射单色平面波光束的偏振状态,采用传输矩阵法,分析了光栅参数对衍射效率、波长选择性和角度选择性的影响。计算结果表明,入射角度对不同偏振状态入射光束的衍射效率影响较大。sinc 切趾反射体布拉格光栅的衍射效率近似由光栅厚度和折射率调制幅值的乘积决定,当折射率调制幅值与光栅厚度的乘积大于 1.7028×10^{-6} 时,不同偏振态在小角度入射时的衍射效率高于 99%。sinc 切趾反射体布拉格光栅的波长选择性带宽和角度选择性带宽随折射率调制幅值的增加而增大,随衍射效率的增加而减小。通过优化光栅参数,利用 sinc 切趾体布拉格光栅可实现光谱间距低于 200 pm 的多光束谱合成。

关键词 光栅;谱合成;sinc 切趾;反射体布拉格光栅;传输矩阵法

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0902003

Diffraction Characteristic Analysis of Sinc-Apodized Reflective Volume Bragg Grating

Shen Benjian¹ Zheng Guangwei² Tan Jichun¹ He Yanlan¹

(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 output by spectral beam combining technology based on the sinc-apodized reflective volume Bragg grating. Considering the polarization of the monochromatic plane wave incident beam, the effects of the grating parameters on the diffraction efficiency, spectral selectivity and angular selectivity of the grating are analyzed by using the chain matrix method. The results show that the incident angle affects the diffraction efficiency greatly when the incident beams have different polarizations. The diffraction efficiency of the sinc-apodized reflective volume Bragg grating increases with the increase of the grating thickness and/or refractive index modulation, and it can be achieved higher than 99% with different polarizations at small incident angle when the product of the grating thickness and refractive index modulation is larger than 1.7028×10^{-6} . The spectral selectivity and angular selectivity of the sinc-apodized reflective volume Bragg grating increase with the increase of the refractive index modulation, but decrease with the increase of the diffraction efficiency. By optimizing the grating parameters of the sinc-apodized reflective volume Bragg grating, the channel spectral separation lower than 200 pm can be achieved.

Key words grating; spectral beam combining; sinc-apodization; reflective volume Bragg grating; chain matrix method

OCIS codes 050.7330; 050.1940; 050.2770; 090.7330; 140.3298

收稿日期: 2011-03-29; 收到修改稿日期: 2011-04-27

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@163.com

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: nudit2004@126.com

1 引 言

谱合成作为非相干合成的一种典型方式,是获得高功率激光输出的有效方法^[1]。利用光折变玻璃(PTR)制成的反射体布拉格光栅具有衍射效率高、损伤阈值高等特点^[2],在谱合成及高功率激光器中具有重要应用^[3~10]。在谱合成中,利用反射体布拉格光栅的衍射特性,将中心波长各不相同的多束光束合成为一束光束,合成光束的光谱为各入射光束光谱的叠加,且合成光束在近场和远场均能保持较好的重叠性^[11]。谱合成的输出功率与参与谱合成的光束数目成正比^[12],而谱合成光束的光谱带宽及参与谱合成的各光束间的光谱间距限制了参与谱合成的光束数目^[3]。因此,在有限的带宽内有效地增加谱合成光束的数目是获得高功率谱合成输出的有效方法。

文献[13]提出采用相移体布拉格光栅增加谱合成中的光束数目,可有效增加在有效带宽内的光束数目,但是其对入射光束的光谱宽度要求较高。为解决这一问题,文献[14]借助于光通信领域的切趾技术^[15,16],提出采用 sinc 切趾体布拉格光栅实现增加谱合成光束数目的方法,分析了 sinc 切趾体布拉格光栅在谱合成技术中的优势。在谱合成中,实际光束存在一定的偏振状态以及光谱宽度和远场发散角。已有的研究表明,对于非切趾体布拉格光栅,光栅对不同偏振状态入射的光束的衍射效率不同^[17],而且,由于体布拉格光栅具有波长选择性带宽和角度选择性带宽,入射光束的光谱带宽和远场发散角会影响体布拉格光栅对入射光束的衍射效率^[18]。因此,在采用 sinc 切趾体布拉格光栅进行谱合成时,需要对 sinc 切趾体布拉格光栅的参数进行优化设计以降低对入射光束的要求和实现较高的谱合成效率。本文在文献[14]的基础上,分析了入射角度对不同偏振状态光束衍射效率的影响,以及当光栅两侧介质为真空时,光栅厚度、折射率调制幅值等光栅参数对 sinc 切趾体布拉格光栅的衍射效率、波长选择性带宽和角度选择性带宽的影响,以期在谱合成中 sinc 切趾体布拉格光栅参数的选择与优化提供指导。

2 理论模型

sinc 切趾反射体布拉格光栅衍射示意图如图 1 所示。 θ_i, θ_d 和 θ_t 分别表示以单色平面波入射时,入射光、衍射光和透射光与光栅表面法线 z 方向的夹

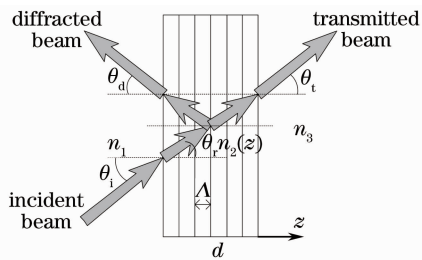


图 1 sinc 切趾体布拉格光栅衍射示意图

Fig. 1 Diffraction scheme of sinc-apodized reflective volume Bragg grating

角, Λ 为光栅周期。光栅的折射率沿表面法线 z 方向的分布表示为

$$n_2(z) = n_0 + n_m \text{sinc}[2(z - d/2)/d] \cos(\mathbf{K}z), \quad (1)$$

式中 n_0 为体布拉格光栅的平均折射率, n_m 为光栅的折射率调制幅值, d 为光栅厚度, \mathbf{K} 为光栅波矢, 其大小为 $|\mathbf{K}| = 2\pi/\Lambda$, 光栅两侧为各向同性的均匀介质, 折射率分别为 n_1 和 n_3 。当以 λ 为中心波长的入射光以入射角 θ_i 入射至光栅表面时, 为获得较高的衍射效率, 入射光应满足布拉格条件

$$2n_0 \Lambda \cos \theta_r = \lambda, \quad (2)$$

式中 θ_r 为入射光束在光栅内的折射角。当光栅的衍射效率未达到 100% 时, 部分光束发生衍射, 衍射角为 θ_d , 其余的光束发生透射, 透射光与 z 方向的夹角为 θ_t , 衍射的能量和透射的能量与光栅的衍射效率有关。

当光栅的 Q 参数^[19]: $Q = 2\pi d\lambda / (n_0 \Lambda^2) \gg 1$ 时, 即厚光栅, 利用 Kogelnik 耦合波理论可方便地分析纯反射体布拉格光栅(即未切趾的非倾斜型反射体布拉格光栅)的衍射特性^[17]。在选取的光栅参数下光栅的 Q 参数典型值为 $Q \approx 10^5 \gg 1$ 。但对于 sinc 切趾体布拉格光栅, 由于折射率调制幅值沿光栅表面法线方向不是常值, 采用耦合波理论无法分析 sinc 切趾体布拉格光栅的衍射特性。文献[20]提出的传输矩阵法可分析任意非倾斜反射体布拉格光栅的衍射特性, 将其非倾斜反射体布拉格光栅沿表面法线 z 方向均匀地分为 N 个薄层, 计算结果的精度随每个光栅周期分层数目的增加而提高^[21]。将每个光栅周期沿表面法线 z 方向分为均匀的 18 层, 对于非倾斜体布拉格光栅, 在选取的典型光栅参数下, 其计算的精度与采用 Kogelnik 耦合波理论计算结果的相对偏差为 0.026%。而对于厚光栅, Kogelnik 耦合波理论与实验符合得很好^[3], 因此可认为将每个光栅周期分为 18 层时的计算结果可靠。当入射

光以波长 λ 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^[20]

$$\begin{pmatrix} E_{\text{inc},i} \\ E_{\text{ref},i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_i & B_i \\ B_i^* & A_i^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{\text{inc},i+1} \\ E_{\text{ref},i+1} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中 $E_{\text{inc},i}$, $E_{\text{ref},i}$ 分别为第 i 层的入射波和反射波的复振幅, $A_i = (1/t_i) \exp(jk n_{2,i} \delta_i \cos \theta_{2,i})$, $B_i = r_i A_i^*$, $t_i = 1 + r_i$, $r_i = (Z_i - Z_{i+1}) / (Z_i + Z_{i+1})$, r_i , t_i 分别表示第 i 层的振幅反射率和透射率, $k = 2\pi/\lambda$ 为入射光波矢的模, δ_i 为第 i 层的厚度, $n_{2,i}$ 为第 i 层的平均折射率, $\theta_{2,i}$ 为入射光在第 i 层的折射角. Z_i 为在光栅两侧介质及光栅内第 i 层的归一化波阻, 对于不同偏振状态入射的光束, Z_i 的表达式不同. 当入射光波为 s 偏振(振动方向与入射面垂直)时: $Z_0 = 1$, $Z_i = \cos \theta_1 / [(n_{2,i}/n_1)^2 - \sin^2 \theta_1]^{1/2}$ ($1 \leq i \leq N$), $Z_{N+1} = \cos \theta_1 / [(n_3/n_1)^2 - \sin^2 \theta_1]^{1/2}$. 当入射光波为 p 偏振(振动方向与入射面平行)时: $Z_0 = 1$, $Z_i = (n_1/n_{2,i})^2 [(n_{2,i}/n_1)^2 - \sin^2 \theta_1]^{1/2} / \cos \theta_1$ ($1 \leq i \leq N$), $Z_{N+1} = (n_1/n_3)^2 [(n_3/n_1)^2 - \sin^2 \theta_1]^{1/2} / \cos \theta_1$. Z_0 和 Z_{N+1} 分别为光栅两侧介质的归一化波阻.

设入射光波的振幅为 1, 则反射波(衍射波)和透射波的复振幅与入射波的复振幅关系可表示为

$$\begin{pmatrix} 1 \\ E_r \end{pmatrix} = \prod_{i=1}^N \begin{pmatrix} A_i & B_i \\ B_i^* & A_i^* \end{pmatrix} \times \frac{1}{t_{N+1}} \begin{pmatrix} 1 & r_{N+1} \\ r_{N+1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_t \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_t \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中 E_r , E_t 分别为衍射波和透射波的复振幅, M_{11} , M_{12} , M_{21} , M_{22} 分别为各传输矩阵乘积所得矩阵对应的矩阵元, 则光栅的衍射效率为

$$\eta = E_r E_r^* = |M_{21}/M_{11}|^2. \quad (5)$$

3 衍射特性分析

3.1 偏振衍射

在实际应用中,为降低对入射光束偏振状态的要求,需要弱化光栅的偏振衍射特性,即当入射光波存在与入射平面平行的振动分量(p 偏振)时,为获得较高的衍射效率,sinc 切趾体布拉格光栅在对 s 偏振(振动方向与入射平面垂直)有较高衍射效率的同时,对 p 偏振分量也应有较高的衍射效率. 对于纯反射体布拉格光栅,当入射角度较小时,体布拉格光栅对 s 偏振和 p 偏振状态入射时的光束的衍射效率相差不大,而当入射布拉格角(入射光线与光栅纹面的夹角)为 $\pi/4$ 时,其对 p 偏振分量的衍射效率始终为 0^[17]. 对于 sinc 切趾反射体布拉格光栅,入射角度及光栅折射率调制幅值对 s 偏振和 p 偏振光束入射时的衍射效率的影响如图 2 所示.

图 2 给出了当 $d = 4 \text{ mm}$, $n_1 = n_3 = n_0$, $\lambda = 1064 \text{ nm}$, 在不同的偏振态入射时,通过改变入射角度和光栅周期以满足布拉格条件入射的情况下, sinc 切趾体布拉格光栅衍射效率随入射角度和折射率调制幅值的变化关系. 由图 2(a)可以看出,对于 s 偏振入射的光束,衍射效率随入射角度或折射率调制幅值的增大而增加,当折射率调制幅值 $n_m > 6 \times 10^{-4}$ 时,在任意角度下入射, sinc 切趾体布拉格光栅对 s 偏振的入射光束均有高于 99.9% 的衍射效率[如图 2(a)中的阴影部分所示]. 图 2(b)给出了 sinc 切趾体布拉格光栅对 p 偏振光束的衍射效率与对 s 偏振光束衍射效率的相对偏差,图中阴影部分表示衍射效率相对偏差小于 1%. 衍射效率的相对偏差定义为: $\gamma = (\eta_s - \eta_p) / \eta_s$, η_s 和 η_p 分别表示入射光为 s 偏振和 p 偏振时光栅的衍射效率. 由图 2(b)可以看出,当入射角度较小时, sinc 切趾体

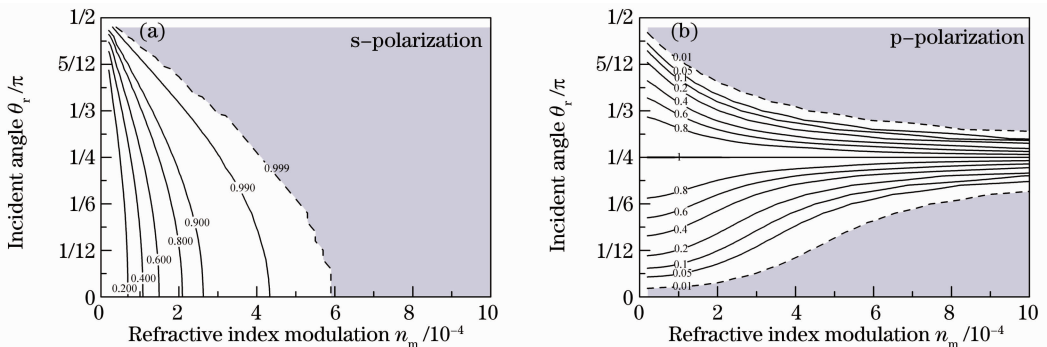


图 2 入射角度和折射率调制幅值对不同偏振状态入射光束衍射效率的影响

Fig. 2 Effects of incident angle and refractive index modulation on diffraction efficiency with different polarizations

布拉格光栅对 s 偏振和 p 偏振的衍射效率相差较小。在相同的入射角度下, sinc 切趾体布拉格光栅对 p 偏振光入射时的衍射效率与对 s 偏振光入射时的衍射效率的相对偏差随着折射率调制幅值的增加而减小。而当入射角为 $\pi/4$ (由于 $n_1 = n_3 = n_0$, 则入射光束与光栅纹面的夹角也为 $\pi/4$) 时, sinc 切趾体布拉格光栅对 p 偏振状态入射光束的衍射效率为 0。这一特性与纯反射体布拉格光栅的角度衍射特性相同, 即采用 sinc 切趾技术并未改变反射体布拉格光栅对不同偏振状态入射光束的衍射特性。因此, 为弱化光栅的偏振衍射特性, 即对 s 偏振和 p 偏振入射时均有较高的衍射效率, 入射光束应接近于正入射或掠入射, 且光栅的折射率调制幅值应较大。而当入射角度较大时, 若光栅两侧介质与光栅的平均折射不等, 介质与光栅界面的反射而损失的能量不可忽略。对于非倾斜型 sinc 切趾体布拉格光栅, 其衍射光束与反射光束的方向相同, 但对于倾斜型光栅, 衍射光束与反射光束的方向不同, 会造成衍射效率和谱合成效率的降低。因此, 为使 sinc 切趾反射体布拉格光栅对 s 偏振和 p 偏振入射时的衍射效率相差较小, 入射光束在光栅内的折射角应控制在小角度内。

3.2 衍射效率

为便于分析入射角度对光栅衍射效率的影响, 假设光栅两侧介质的折射率与光栅的平均折射率相同, 即 $n_1 = n_3 = n_0$ 。考虑实际情形, 即光栅两侧介质为真空的情形。纯反射体布拉格光栅的衍射效率由光栅厚度和折射率调制幅值决定, 通过改变光栅的

厚度或折射率调制幅值可获得较高的衍射效率。当波长为 λ 的单色平面波以 s 偏振状态入射至光栅表面, 并同时满足布拉格条件和 $n_1 = n_3 = n_0$ 时, 纯反射体布拉格光栅的衍射效率为^[17]

$$\eta = \tanh^2(2\pi n_0 \Delta n_m d / \lambda^2). \quad (6)$$

而对于 sinc 切趾非倾斜体布拉格光栅, 在上述入射条件下, 其衍射效率为

$$\eta = \tanh^2(0.5895 \times 2\pi n_0 \Delta n_m d / \lambda^2), \quad (7)$$

式中 0.5895 表示 sinc 切趾反射体布拉格光栅的切趾参量, 其定义表示为^[22]

$$a_{\text{eff}} = \frac{\int_0^d n(z) z dz}{\int_0^d z dz}, \quad (8)$$

式中 $n(z)$ 表示切趾体布拉格光栅的切趾函数, $n(z) = \text{sinc}[2(z - d/2)/d]$ 。由(6)式和(7)式可以看出, 对于 sinc 切趾非倾斜体布拉格光栅, 也可通过改变折射率调制幅值或光栅厚度以实现较高的衍射效率。但是由于切趾参量的存在, 在相同的入射条件下, 为获得与纯反射体布拉格光栅相同的衍射效率, 其光栅厚度和折射率调制幅值的乘积比纯反射体布拉格光栅的光栅厚度和折射率调制幅值的乘积大。考虑谱合成实际情况, 即光栅两侧介质为真空或空气, $n_1 = n_3 = 1.0$, sinc 切趾反射体布拉格光栅对 s 偏振和 p 偏振入射光束的衍射效率随光栅厚度和折射率调制幅值的变化关系如图 3 所示。

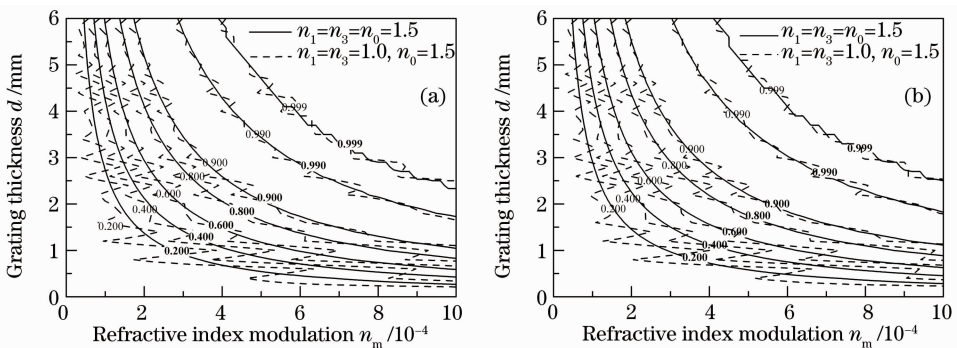


图 3 光栅厚度和折射率调制幅值对 s 偏振(a)和 p 偏振(b)入射时光栅衍射效率的影响

Fig. 3 Effects of grating thickness and refractive index modulation on the diffraction efficiency of the grating with s-polarization (a) and p-polarization (b) beams incident

图 3 给出了当光栅两侧介质为真空时, 光栅对 s 偏振[图 3(a)]和 p 偏振[图 3(b)]入射光束的衍射效率, 图中所对应的参数为 $\Lambda = 0.36 \mu\text{m}$, $\lambda = 1064 \text{ nm}$, $\theta_r \approx 0.17 \text{ rad}$ 。为便于比较, 图中给出了当光栅两侧介质的折射率满足 $n_1 = n_3 = n_0 = 1.5$

时, sinc 切趾体布拉格光栅的衍射效率。由图 3(a)可以看出, sinc 切趾体布拉格光栅的衍射效率随折射率调制幅值或光栅厚度的增加而增大。由(7)式和图 3 可以看出, 当光栅两侧介质满足 $n_1 = n_3 = n_0$ 时, 光栅的衍射效率由光栅厚度和折射率调制幅值

的乘积 $n_m d$ 决定。而当光栅两侧介质的折射率为 $n_1 = n_3 = 1.0 \neq n_0$ 时,为获得相同的衍射效率,光栅厚度和折射率调制幅值的乘积不是常数,且该乘积与 $n_1 = n_3 = n_0$ 时的乘积有一定的偏差,衍射效率越高,偏差越小。而 sinc 切趾体布拉格光栅对 p 偏振入射时[图 3(b)],光栅厚度和折射率调制幅值对光栅的衍射效率的影响与 s 偏振入射时的情形相同。当衍射效率高于 90% 时,由图 3 可以看出,光栅厚度和折射率调制幅值的乘积可近似为一个常数,且这个常数与 $n_1 = n_3 = n_0$ 时相同。

3.3 波长选择性和角度选择性

在获得较高衍射效率的前提下,光栅的波长选择性带宽和角度选择性带宽(半峰全宽,FWHM)是实现谱合成所需要考虑的两个重要因素。光栅的波长选择性带宽决定了参与谱合成光束间的光谱间距和入射光束的光谱宽度,而角度选择性带宽决定了参与谱合成光束的光束直径。在高斯光束入射的条件下,光束直径越大,其光束的远场发散角越小^[18]。纯反射体布拉格光栅的波长选择性带宽和角度选择性带宽由光栅的厚度和折射率调制幅值决定,改变光栅厚度或折射率调制幅值均会引起光栅的波长选择性和角度选择性带宽的变化。对于 sinc 切趾反射体布拉格光栅,在不同的衍射效率下,其波长选择性带宽和角度选择性带宽随光栅折射率调制幅值的变化如图 4,5 所示。

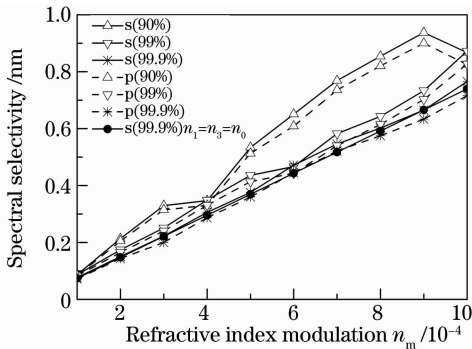


图 4 波长选择性与折射率调制幅值的关系

Fig. 4 Spectral selectivity of the sinc-apodized volume Bragg grating versus refractive index modulation

图 4,5 分别给出了当光栅两侧介质为真空,且 s 偏振光束的衍射效率达到 90%,99% 和 99.9% 时,sinc 切趾体布拉格光栅对 s 偏振和 p 偏振光束入射时光栅的波长选择性带宽和角度选择性带宽。图中的光栅参数为 $\Lambda = 0.36 \mu\text{m}$, $\lambda = 1064 \text{ nm}$, $n_1 = n_3 = 1.0$, $n_0 = 1.5$ 。由图 3 和(7)式可以得出,对应的光栅厚度和折射率调制幅值的乘积分别近似为

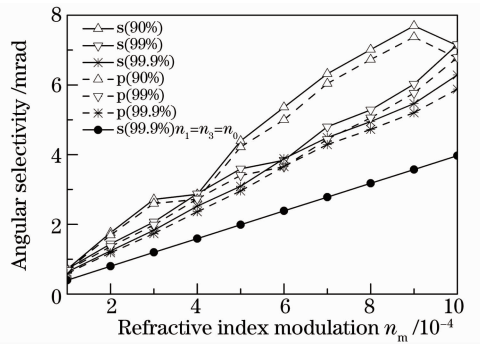


图 5 角度选择性与折射率调制幅值的关系

Fig. 5 Angular selectivity of the sinc-apodized volume Bragg grating versus grating refractive index modulation 1.0344×10^{-6} , 1.7028×10^{-6} 和 2.3592×10^{-6} 。

由图 4 可以看出,sinc 切趾体布拉格光栅的波长选择性带宽随折射率调制幅值的增加而增大。在相同的折射率调制幅值下,波长选择性带宽随衍射效率的增大而减小。这是由于在相同的折射率调制幅值下,越高的衍射效率对应的光栅厚度越厚,而光栅的波长选择性带宽随光栅厚度的增加而减小。在相同的光栅参数下,s 偏振入射时的波长选择性带宽比 p 偏振入射时的波长选择性带宽略大。当光栅的衍射效率达到 99.9% 时,sinc 切趾体布拉格光栅的波长选择性带宽与 $n_1 = n_3 = n_0$ 时几乎相同。由图 5 可以看出,sinc 切趾体布拉格光栅的角度选择性带宽随折射率调制幅值的变化关系表现出与图 4 相同的趋势,但是当光栅的衍射效率达到 99.9% 时,sinc 切趾体布拉格光栅的角度选择性带宽比 $n_1 = n_3 = n_0$ 时大,这是由于光栅两侧介质的折射率与光栅的平均折射率不同而引起的。

对于纯反射体布拉格光栅,当光栅两侧介质满足 $n_1 = n_3 = n_0$ 时,光栅的波长选择性带宽和角度选择性带宽的关系可近似表示为^[23]

$$\Delta\theta = \Delta\lambda / (\lambda \tan \theta_r). \quad (9)$$

当光栅参数取为 $\Lambda = 0.36 \mu\text{m}$, $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 时,纯反射体布拉格光栅的波长选择性带宽和角度选择性带宽的关系为 $\Delta\theta \approx 5.34 \times 10^6 \Delta\lambda$ 。对于 sinc 切趾反射体布拉格光栅,当光栅两侧介质为真空时,对图 4 中在不同衍射效率和不同折射率调制幅值下的波长选择性带宽与图 5 中相对应的角度选择性带宽的关系进行线性拟合。拟合结果表明,sinc 切趾反射体布拉格光栅的角度选择性带宽和波长选择性带宽可很好地由线性关系表示。在选取的光栅参数下,sinc 切趾反射体布拉格光栅的波长选择性带宽和角度选择性带宽的关系近似表示为

$$\Delta\theta \approx 8.2 \times 10^6 \Delta\lambda. \quad (10)$$

由于当光栅两侧介质为真空时,光栅的角度选择性带宽比 $n_1 = n_2 = n_0$ 时的角度选择性带宽大,因此,其角度选择性带宽与波长选择性带宽的比例系数较大,但未改变角度选择性带宽与波长选择性带宽的线性关系。

谱合成的光谱间距与光栅的波长选择性带宽和入射光束的光谱宽度有关。L. B. Glebov^[2] 提出采用优化设计可以使基于纯反射体布拉格光栅的多光束谱合成光束间距为 200~500 pm,并已实现了各光束输出功率为 150 W,光谱间距为 0.5 nm,谱合成效率达 90% 的 5 光束谱合成^[24]。在谱合成中,为减小各通道之间的串扰,谱合成光束的光谱间距等于或大于光栅的波长选择性带宽。在光谱间距等于光栅波长选择性带宽的条件下,由图 4 可以看出,通过优化光栅的折射率调制幅值和光栅厚度,采用 sinc 切趾反射体布拉格光栅可实现光谱间距低于 200 pm 的多光束谱合成。当 sinc 切趾反射体布拉格光栅的波长选择性带宽为 200 pm,衍射效率为 99% 和 99.9% 时,sinc 切趾反射体布拉格光栅的折射率调制幅值分别为 2.36×10^{-4} 和 2.70×10^{-4} ,对应的光栅厚度为 7.2 mm 和 8.7 mm。

4 结 论

采用 sinc 切趾反射体布拉格光栅是一种有效减小谱合成光束光谱间距的谱合成方式。数值计算结果表明:1)入射角度对不同偏振状态入射时的衍射效率的影响较大,对于 p 偏振,当入射角为 $\pi/4$ 时,衍射效率为 0。为减小入射角度对不同偏振状态下入射光束的衍射效率的影响,入射角度应控制在小角度范围内。2)当光栅两侧介质为真空时,sinc 切趾反射体布拉格光栅的衍射效率近似由光栅厚度和折射率调制幅值的乘积决定,当光栅厚度和折射率的乘积大于 1.7028×10^{-6} 时,光栅的衍射效率可达 99% 以上。3) sinc 切趾反射体布拉格光栅的波长选择性带宽和角度选择性带宽随光栅折射率调制幅值的增加而增大,随衍射效率的增加而减小。在相同的光栅参数下,s 偏振入射时的波长选择性带宽和角度选择性带宽比 p 偏振入射时的波长选择性带宽和角度选择性带宽略大。光栅两侧介质的折射率会影响 sinc 切趾体布拉格光栅的角度选择性带宽。4)采用 sinc 切趾技术并未改变反射体布拉格光栅角度选择性带宽与波长选择性带宽的线性关系,通过优化 sinc 切趾反射体布拉格光栅参数,可

实现高衍射效率和光谱间距低于 200 pm 的多光束谱合成。

参 考 文 献

- O. Andrusyak, I. Ciapurin, A. Sevia *et al.*. Power scaling of laser systems using spectral beam combining with volume Bragg gratings in PTR glass [C]. CLEO/QELSC/PAST, 2007, JTuA85
- L. B. Glebov. Fabrication and applications of volume Bragg gratings[C]. BGPP, 2010, BMB1
- 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
- Pu Shibing, Jiang Zongfu, Xu Xiaojun *et al.*. Numerical analysis of spectral beam combining by volume Bragg grating[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(5): 721~724
蒲世兵, 姜宗福, 许晓军等. 基于体布拉格光栅的光谱合成的数值分析[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(5): 721~724
- S. Yin, B. Zhang, Y. Dan. Propagation characteristics of the Yb-doped fiber lasers after spectral beam combining by the VBGs [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(1): 306~311
- O. Andrusyak, I. Ciapurin, V. Smirnov *et al.*. Spectral beam combining of fiber lasers with increased channel density [C]. *SPIE*, 2007, **6453**: 64531L
- 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
- Zheng Guangwei, Liu Li, He Yanlan *et al.*. Diffraction properties of ultra-short pulsed Gaussian laser beam by transmission volume gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 126~131
郑光威, 刘莉, 何焰蓝等. 透射型体光栅对超短脉冲高斯光束衍射特性研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 126~131
- Zheng Guangwei, Tan Jichun, He Yanlan *et al.*. Diffraction characteristics analysis of ultra-short pulsed Gaussian laser beam by reflecting volume grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3260~3266
郑光威, 谭吉春, 何焰蓝等. 反射型体光栅对超短脉冲高斯光束衍射特性分析 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3260~3266
- Hui Yongling, Li Qiang, Zhang Xiang *et al.*. Single frequency mode laser controlled by volume Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2805~2807
惠勇凌, 李强, 张翔等. 基于体布拉格光栅选模的单纵模激光 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2805~2807
- T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3): 567~577
- B. Chann, R. K. Huang, L. J. Missaggia *et al.*. Near-diffraction-limited diode laser arrays by wavelength beam combining [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(16): 2104~2106
- Shen Benjian, Zheng Guangwei, Tan Jichun *et al.*. Spectral beam combining by phase-shifted reflective volume Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3056~3059
沈本剑, 郑光威, 谭吉春等. 相移反射体布拉格光栅在谱合成中的应用 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3056~3059
- Shen Benjian, Tan Jichun, Zheng Guangwei *et al.*. Characteristics of spectral beam combining with sinc-apodized Bragg grating [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(3): 593~598
沈本剑, 谭吉春, 郑光威等. Sinc 切趾布拉格光栅谱合成特性 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(3): 593~598
- Wang Lin, Yan Fengping, Li Yifan *et al.*. Optimization of

- chirped fiber Bragg gratings by asymmetrically apodization method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 587~592
- 王琳, 延凤平, 李一凡等. 非对称切趾对啁啾光纤光栅特性优化的分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 587~592
- 16 Liu Yan, Zheng Kai, Tan Zhongwei *et al.*. Good performance of chirped fiber Bragg gratings obtained by asymmetrically one-side exposure apodization[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(11): 5859~5865
- 刘艳, 郑凯, 谭中伟等. 非对称单侧曝光切趾使啁啾光纤光栅获得优化性能[J]. *物理学报*, 2006, **55**(11): 5859~5865
- 17 H. Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. *Bell Syst. Tech. J.*, 1969, **48**(9): 2909~2947
- 18 I. V. Ciapurin, L. B. Glebov, V. I. Smirnov. Modeling of Gaussian beam diffraction on volume Bragg gratings in PTR glass [C]. *SPIE*, 2005, **5742**: 183~194
- 19 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
- 20 M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Chain-matrix analysis of arbitrary-thickness dielectric reflection gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(2): 187~190
- 21 P. Sharlandjiev, T. Mateeva. Normal incidence holographic mirrors by the characteristic matrix method. Numerical examples [J]. *J. Opt.*, 1985, **16**(4): 185~189
- 22 P. S. Cross, H. Kogelnik. Sidelobe suppression in corrugated-waveguide filters[J]. *Opt. Lett.*, 1977, **1**(1): 43~45
- 23 A. Sevan, 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
- 24 L. B. Glebov. Volume Bragg gratings for spectral beam combining[C]. CLEO, 2010, CThX1