

# 基于相位掩模法的高阶布拉格波导光栅特性

张爱玲, 田红苗\*, 李青青, 王钊

天津理工大学计算机与通信工程学院天津市薄膜电子与通信器件重点实验室  
教育部通信器件与技术工程研究中心, 天津 300384

**摘要** 对基于相位掩模法的高阶布拉格(Bragg)波导光栅的特性进行了研究,不同阶数 Bragg 波导光栅的谐振波长均随饱和系数的增大而增大。综合考虑光栅阶数、相位掩模衍射效率及饱和系数对 Bragg 波导光栅折射率调制幅度的影响,当 Bragg 波导光栅阶数为 2,且饱和系数为 0.67 时折射率调制幅度达到最大,此时 Bragg 波导光栅的最大反射率最大,零值带宽最大。随着光栅长度的增大,最大反射率增大,零值带宽减小。波导光栅的饱和系数随写入光强与刻写时间乘积的增大而增大,当此乘积为  $160 \text{ s} \cdot \text{W}/\text{cm}^2$  时饱和系数为 0.67,因此可以通过控制写入光强与刻写时间使饱和系数达到最优。

**关键词** 光通信; 高阶布拉格波导光栅; 相位掩模法; 饱和系数

**中图分类号** TN256      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.010603

## Characteristics of High-Order Bragg Waveguide Grating Based on Phase-Mask Method

Zhang Ailing, Tian Hongmiao, Li Qingqing, Wang Zhao

*Communication Devices and Technology Engineering Research Center, Ministry of Education, Tianjin Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China*

**Abstract** The characteristics of high-order Bragg waveguide grating based on phase-mask method are investigated, and the resonant wavelengths of Bragg waveguide grating with different orders all increase with the increasing of saturation coefficient. Influences of the order of grating, diffraction efficiency of phase mask and saturation coefficient on the refractive index modulation of Bragg waveguide grating are taken into consideration synthetically. The largest refractive index modulation amplitude can be acquired when the order of Bragg waveguide grating is 2 and the saturation coefficient is 0.67. In this case, the maximum reflection and the zero bandwidth of Bragg waveguide grating can reach the maximum. The maximum reflection increases and the zero bandwidth decreases with the increasing of grating length. The saturation coefficient of waveguide grating increases with the product of the writing beam intensity and the writing time. The saturation coefficient is 0.67 when the product is equal to  $160 \text{ s} \cdot \text{W}/\text{cm}^2$ . The optimal saturation coefficient can be acquired by controlling the writing beam intensity and the writing time.

**Key words** optical communications; high-order Bragg waveguide grating; phase-mask method; saturation coefficient

**OCIS codes** 060.4510; 350.2770; 230.7370

## 1 引言

铌酸锂( $\text{LiNbO}_3$ )材料具有热稳定性好,在可见光波段光折变敏感的特点,近些年被广泛用作光集成器

收稿日期: 2016-09-21; 收到修改稿日期: 2016-09-27; 网络出版日期: 2016-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(61377075)

作者简介: 张爱玲(1973—),女,博士,教授,主要从事光通信器件方面的研究。E-mail: alzhang07@163.com

\* 通信联系人。E-mail: 15032519572@163.com

件的基底材料<sup>[1-4]</sup>,另外在铌酸锂波导基础上制作的铌酸锂波导光栅也备受关注<sup>[5-7]</sup>,尤其是布拉格(Bragg)波导光栅,但由于制备工艺难度较大,发展速度较为缓慢。

Bragg 波导光栅的制作方法主要有全息法、相位掩模法、振幅掩模法等。Kip 等<sup>[8]</sup>采用全息法,在钛(Ti)扩散铌酸锂波导上利用铌酸锂的光折变效应制作出 Bragg 波导光栅,但是对角度的精确度要求很高。Benkelfat 等<sup>[9]</sup>用紫外激光、振幅掩模板及质子交换的方法在 Ti 扩散铌酸锂波导上制作出光栅周期为  $7.9 \mu\text{m}$  和  $8.1 \mu\text{m}$  的 Bragg 波导光栅,采用的 Bragg 衍射阶数高于 20。Grobnic 等<sup>[10]</sup>在质子交换的铌酸锂波导上利用  $800 \text{ nm}$  激光和相位掩模板制备了光栅周期为  $2.14 \mu\text{m}$  的 Bragg 波导光栅,采用的是 6 阶 Bragg 衍射。目前,国内外还没有采用相位掩模板、利用更低阶 Bragg 衍射刻写 Bragg 波导光栅的方法,也没有相关的理论分析。

本文提出基于相位掩模法制备高阶 Bragg 波导光栅的方法,较全息法而言,其光路稳定性好。鉴于铌酸锂对蓝绿光敏感,采用  $532 \text{ nm}$  激光作为写入光源,相对于  $800 \text{ nm}$  激光,其制作成本更低,并且可以采用更低阶的 Bragg 衍射刻写 Bragg 波导光栅。此方法可以同时传输横电(TE)、横磁(TM)模式,得到 2 个不同的谐振波长。分别从掩模板周期、光折变饱和系数、写入光强、刻写时间、光栅长度 5 个方面分析其对 Bragg 光栅特性的影响,为 Bragg 波导光栅的制备提供了理论依据。

## 2 理论分析

设计的 Bragg 波导光栅结构如图 1 所示。在  $x$  切铌酸锂晶体基底上利用钛扩散法制备  $y$  向单模传输的条形波导,用激光和相位掩模写制 Bragg 波导光栅。铌酸锂对蓝绿光敏感,易发生光折变效应,所以采用  $\lambda_w = 532 \text{ nm}$  的绿光作为写入光源。

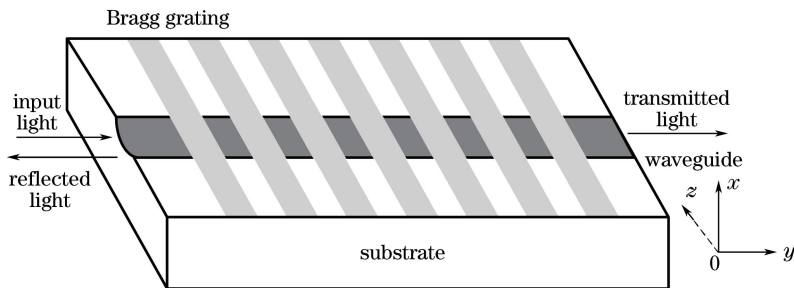


图 1 钛扩散铌酸锂波导 Bragg 光栅结构图

Fig. 1 Structure diagram of Ti-diffusion lithium niobate waveguide Bragg grating

当写入激光垂直照射相位掩模板时,±1 级衍射光发生干涉形成明暗相间的条纹,通过铌酸锂晶体的光折变效应在铌酸锂波导上形成折射率调制的 Bragg 光栅。光栅的 Bragg 衍射条件为

$$m\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中  $m$  为 Bragg 衍射阶数, $\lambda_B$  为谐振波长, $n_{\text{eff}}$  为波导芯层有效折射率, $\Lambda$  为光栅周期, $\Lambda$  与相位掩模板周期  $\Lambda_P$  的关系为

$$\Lambda_P = 2\Lambda. \quad (2)$$

为得到同一谐振波长(如谐振波长取  $1540 \text{ nm}$ ),当  $m=1$  时,光栅周期为  $\Lambda_1=360 \text{ nm}$ ,相位掩模板周期为  $\Lambda_{P1}=720 \text{ nm}$ ;当  $m=2$  时,光栅周期为  $\Lambda_2=720 \text{ nm}$ ,相位掩模板周期为  $\Lambda_{P2}=1440 \text{ nm}$ ;当  $m=3$  时,光栅周期为  $\Lambda_3=1080 \text{ nm}$ ,相位掩模板周期为  $\Lambda_{P3}=2160 \text{ nm}$ 。

当激光正入射时可产生多级衍射光束,由于相位掩模板的高级衍射波强度较弱,通常只考虑 0 级和 ±1 级衍射波,所以 0 级衍射波的存在会影响刻写的 Bragg 光栅性能。由严格的耦合波理论可知,相位掩模板的衍射效率与其周期及写入光波长有关,当  $\lambda_w < \Lambda_P < 1.5\lambda_w$  时,0 级衍射效率大于 ±1 级衍射效率;当  $\Lambda_P \geq 2\lambda_w$  时,0 级衍射效率远小于 ±1 级衍射效率<sup>[11-13]</sup>。当 Bragg 衍射阶数为 1、 $\Lambda_{P1}=720 \text{ nm}$  时,有  $\lambda_w < \Lambda_{P1} < 1.5\lambda_w$ , 0 级衍射效率大于 ±1 级衍射效率,导致干涉条纹对比度大大降低,写制的波导光栅的折射率调制幅度随之大大降低。当 Bragg 衍射阶数高于 1 时,如选择 2 阶或 3 阶光栅, $\Lambda_{P2}=1440 \text{ nm}$ , $\Lambda_{P3}=2160 \text{ nm}$ ,有

$\Lambda_{P2} > 2\lambda_w, \Lambda_{P3} > 2\lambda_w, 0$  级衍射效率远小于  $\pm 1$  级衍射效率, 更容易写出较高折射率调制幅度的波导光栅。因此, 为了刻写性能良好的 Bragg 波导光栅, 应选择高于 1 阶的 Bragg 衍射光栅。

在光致折射率改变量达到饱和后才会出现除 1 阶 Bragg 衍射以外的其他高阶 Bragg 衍射<sup>[14-15]</sup>。通过数值计算, 波导芯层有效折射率  $n_{\text{eff}}$  随波导表面折射率  $n_f$  近似呈线性关系, 如图 2 所示, 其斜率用  $G$  来表示。沿波导传输方向的 Bragg 波导光栅折射率分布可表示为

$$n(y) = n_{\text{eff}} + G\Delta n(y), \quad -L/2 \leq y \leq L/2, \quad (3)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  为未刻光栅时波导芯层的有效折射率,  $\Delta n(y) = \Delta n_s n_d(y)$  为刻写光栅引起的折射率变化,  $\Delta n_s$  为饱和后折射率的变化量,  $n_d(y)$  为折射率变化函数,  $L$  为光栅长度。光致折射率改变量达到饱和后, 折射率变化函数在一个周期的变化为

$$n_d(y) = \begin{cases} \frac{1 + \cos(2\pi y/\Lambda)}{1 + \cos(\pi c)}, & -\frac{\Lambda}{2} \leq y \leq -\frac{c\Lambda}{2}, \frac{c\Lambda}{2} \leq y \leq \frac{\Lambda}{2} \\ 1, & -\frac{c\Lambda}{2} \leq y \leq \frac{c\Lambda}{2} \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $c = d/\Lambda$  为饱和系数,  $d$  为由饱和效应引起的平顶宽度。

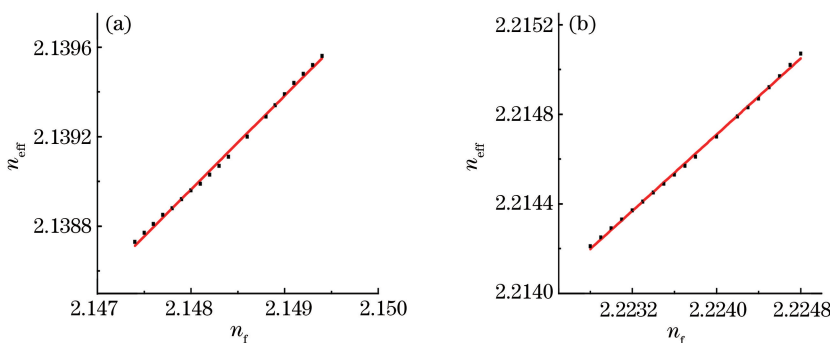


图 2 波导芯层有效折射率随波导表面折射率的变化。(a) TE 模; (b) TM 模

Fig. 2 Effective refractive index of waveguide core versus refractive index of waveguide surface. (a) TE mode; (b) TM mode

当光致折射率改变量达到饱和后, 对饱和后的折射率变化函数进行傅里叶级数展开得

$$n_d(y) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos\left(m \frac{2\pi}{\Lambda} y\right), \quad (5)$$

式中

$$\begin{cases} a_0 = c + \frac{1}{1 + \cos(\pi c)} \left[ 1 - c - \frac{\sin(\pi c)}{\pi} \right] \\ a_1 = \frac{2}{\pi} \sin(\pi c) + \frac{1}{1 + \cos(\pi c)} \left[ 1 - c - \frac{2}{\pi} \sin(\pi c) - \frac{1}{2\pi} \sin(2\pi c) \right] \\ a_m = \frac{2}{m\pi} \sin(m\pi c) - \frac{1}{1 + \cos(\pi c)} \left\{ \frac{1}{(m-1)\pi} \sin[(m-1)\pi c] + \frac{2}{m\pi} \sin(m\pi c) + \frac{1}{(m+1)\pi} \sin[(m+1)\pi c] \right\}, \quad m \neq 0, 1 \end{cases}. \quad (6)$$

图 3 为饱和后的折射率变化函数傅里叶级数展开的示意图, 可以看出随阶数  $m$  的逐渐增大, 其对应的傅里叶系数随之减小。

由  $m\lambda_B = 2(n_{\text{eff}} + G\Delta n_s a_0)\Lambda$  可知,  $a_0$  影响波导光栅的谐振波长, 使其谐振波长发生偏移。当  $m \neq 0$  时,  $a_m$  为各阶折射率变化函数的傅里叶展开系数, 影响  $m$  阶 Bragg 谐振分量折射率调制幅度。相位掩模板周期分别为 1440 nm 和 2160 nm 时, 对应的傅里叶系数分别为  $a_2$  和  $a_3$ 。

设写入光(设其光强为  $I_A$ )通过相位掩模板后 0 级衍射效率为 0, 则  $\pm 1$  级衍射光干涉总光强(即写入光强)可表示为<sup>[16-17]</sup>

$$I \approx 2I_A \frac{2 \sin^2(\pi/2)}{\pi^2}. \quad (7)$$

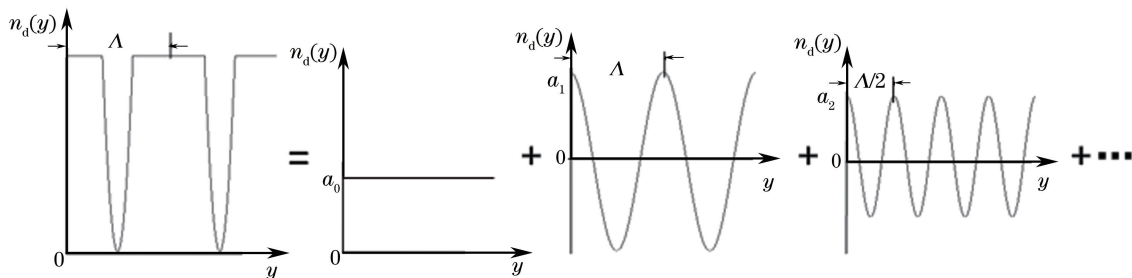


图3 饱和后折射率变化函数的傅里叶系数展开

Fig. 3 Fourier coefficients expansion of the saturated refractive index variation function

写入光栅折射率改变量  $\Delta n$  随  $I$  及刻写时间  $t$  的变化为

$$\Delta n(t) = \Delta n_{\max} [1 - \exp(-t/\tau)], \quad (8)$$

式中  $\Delta n_{\max}$  为折射率改变量的最大值, TE 模式下  $\Delta n_{\max} \approx 1.2 \times 10^{-3}$ , TM 模式下  $\Delta n_{\max} \approx 3 \times 10^{-4}$ ,  $\tau = \epsilon_0 \epsilon_r / \sigma_{\text{ph}}$ ,  $\epsilon_0$  为自由空间介电常数,  $\epsilon_r = 28$  为  $\text{LiNbO}_3$  的相对介电常数,  $\sigma_{\text{ph}} = gI$  为光电导率, 其中  $g = 1.4 \times 10^{-11} \text{ cm}/(\Omega \cdot \text{W})$ 。

当光致折射率改变量达到饱和后(即满足  $\Delta n_s = 99\% \Delta n_{\max}$ ), 折射率改变量几乎不再变化, 所以在整个刻写过程中饱和系数  $c$  由写入光强  $I$  与刻写时间  $t$  共同决定, 即

$$c = \frac{1}{\pi} \arccos\left(\frac{\tau \ln 100}{t} - 1\right). \quad (9)$$

利用耦合模理论<sup>[18]</sup>可得最大反射率为

$$R_{\max} = \tanh^2(\kappa L). \quad (10)$$

零值带宽  $\Delta\lambda$  为谐振波长两侧的反射率第一次为 0 时对应的波长间距, 可表示为

$$\Delta\lambda = 2(\lambda - \lambda_B) = \frac{\lambda_B^2}{\pi n_{\text{eff}} L} \sqrt{\pi^2 + (\kappa L)^2}, \quad (11)$$

式中  $\kappa = \pi \delta_m / \lambda$  为耦合系数,  $\delta_m = G \Delta n_{\max} a_m$  ( $m \neq 0$ ) 为  $m$  阶 Bragg 波导光栅的折射率调制幅度。

### 3 特性研究

不同阶 Bragg 波导光栅的谐振波长在同一模式下随饱和系数的变化是一致的。图 4 为 TE、TM 模式下 Bragg 波导光栅的谐振波长  $\lambda_B$  随饱和系数  $c$  的变化。由图 4 可知, 在两种模式下谐振波长随饱和系数的增大往长波方向轻微漂移, 但同一饱和系数对应的不同模式的谐振波长偏移量不同, TE 模式下谐振波长偏移量比 TM 模式下更大。

图 5 为 TE、TM 模式下 2 阶、3 阶 Bragg 波导光栅折射率调制幅度  $\delta_m$  随饱和系数  $c$  的变化。在同一饱和系数, 由于更高阶 Bragg 波导光栅对应的傅里叶系数更小, 2 阶总是大于 3 阶 Bragg 波导光栅的折射率调制幅度。由图 5 可知, TE、TM 模式下, 2 阶 Bragg 波导光栅折射率调制幅度在  $c = 0.67$  时达到最大值, 且

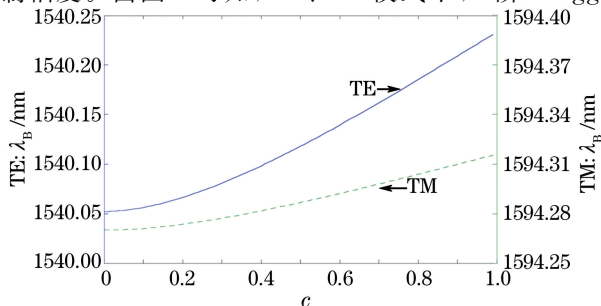


图4 谐振波长随饱和系数的变化

Fig. 4 Variation of resonant wavelength with saturation coefficient

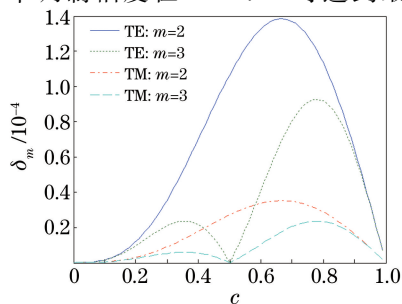


图5 折射率调制幅度随饱和系数的变化

Fig. 5 Variation of refractive index modulation amplitude with saturation coefficient

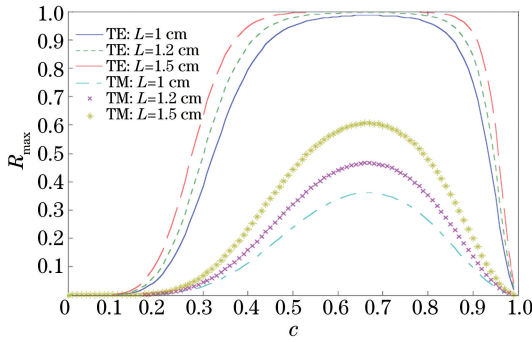


图6 不同光栅长度下最大反射率随饱和系数的变化

Fig. 6 Variation of maximum reflectivity with saturation coefficient for different grating lengths

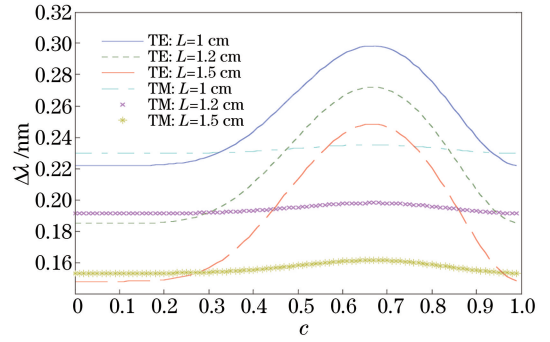


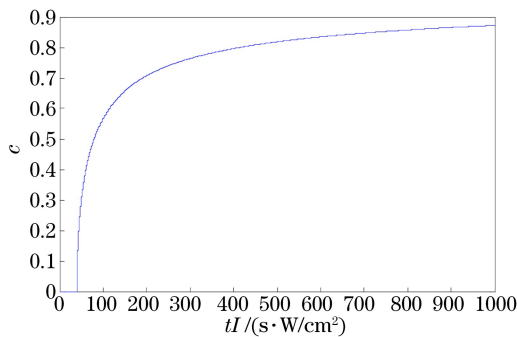
图7 不同光栅长度下零值带宽随饱和系数的变化

Fig. 7 Variation of zero bandwidth with saturation coefficient for different grating lengths

TE模式的折射率调制幅度大于TM模式的。

图6和图7分别为TE、TM模式下光栅长度 $L$ 分别取1、1.2、1.5 cm时,2阶Bragg波导光栅 $R_{\max}$ 和 $\Delta\lambda$ 随 $c$ 的变化。可以看出,随着饱和系数 $c$ 的增大, $R_{\max}$ 和 $\Delta\lambda$ 先增大后减小,且在饱和系数为0.67时达到最大;在同一饱和系数下,随着 $L$ 的增大, $R_{\max}$ 增大,而 $\Delta\lambda$ 减小。因此,可以通过控制饱和系数的大小来提高最大反射率和带宽。

图8为 $c$ 随 $tI$ 的变化( $t$ 为刻写时间, $I$ 为写入光强),对TE、TM两种模式而言,此变化相同。可以看出,当 $tI$ 小于 $39.5 \text{ s} \cdot \text{W}/\text{cm}^2$ 时,光致折射率未达到饱和,饱和系数为0;当 $tI$ 大于 $39.5 \text{ s} \cdot \text{W}/\text{cm}^2$ 时,光致折射率达到饱和,饱和系数随 $tI$ 的增大而增大;当 $tI$ 为 $160 \text{ s} \cdot \text{W}/\text{cm}^2$ 时,饱和系数 $c=0.67$ 。因此,可以通过控制写入光强和刻写时间使饱和系数达到最优。

图8 饱和系数随 $tI$ 的变化Fig. 8 Variation of saturation coefficient with  $tI$ 

选择合适的光刻参数可以提高波导光栅的性能,通过控制光强和刻写时间使饱和系数达到0.67,并尽可能增大光栅长度,从而得到最优的波导光栅性能。取光栅长度为2 cm,在光强为 $5 \text{ W}/\text{cm}^2$ 、刻写时间为32 s的刻写条件下,2阶Bragg波导光栅在TE、TM模式下的反射谱如图9所示。可以看出,TE模式下波导光栅

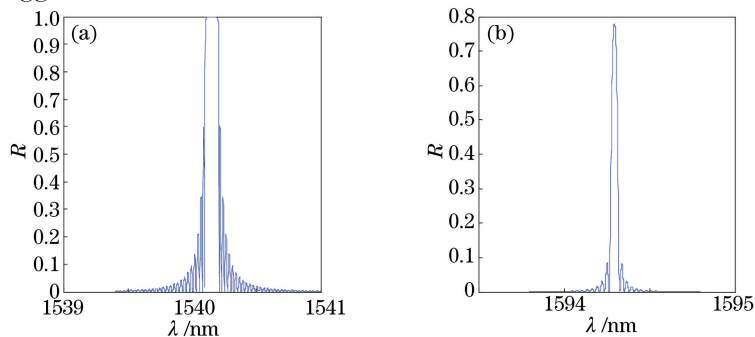


图9 波导光栅的反射谱。(a) TE模;(b) TM模

Fig. 9 Reflection spectra of waveguide grating. (a) TE mode; (b) TM mode

的最大反射率为 1,零值带宽为 0.11 nm;TM 模式下,波导光栅的最大反射率为 0.78,零值带宽为 0.07 nm。

## 4 结 论

对基于相位掩模法的高阶 Bragg 波导光栅的特性进行了研究。此方法光路稳定性好,制作成本低,可以采用更低阶的 Bragg 衍射刻写 Bragg 波导光栅。通过分析相位掩模板的周期、饱和系数、光栅长度、写入光强、刻写时间对高阶 Bragg 波导光栅特性的影响,得到 Bragg 波导光栅阶数为 2、饱和系数为 0.67 时可获得最大的折射率调制度,此时 Bragg 波导光栅的最大反射率达到最大,且零值带宽最大。控制写入光强与刻写时间的乘积为  $160 \text{ s} \cdot \text{W}/\text{cm}^2$ ,可使饱和系数达到 0.67,从而使 2 阶 Bragg 光栅的最大反射率达到最大。此外,还可以通过增加光栅长度来获得较大的最大反射率。

## 参 考 文 献

- [1] Jin S L, Xu L T, Li Y F. Spatially modulated gain erbium-doped Ti:LiNbO<sub>3</sub> waveguide laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(15): 1515-1517.
- [2] Arizmendi L. Photonic applications of lithium niobate crystals[J]. Physica Status Solidi, 2004, 201(2): 253-283.
- [3] Korkishko N Y, Fedorov A V, Feoktistova O Y. LiNbO<sub>3</sub> optical waveguide fabrication by high-temperature proton exchange[J]. Journal of Lightwave Technology Photonics, 2000, 18(4): 562-568.
- [4] Busacca A C, Sones C L, Eason R W, *et al.* First-order quasi-phase-matched blue light generation in surface-poled Ti:indiffused lithium niobate waveguides[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(22): 4430-4432.
- [5] Zhang Ming, Ren Jianwen, Chen Wen, *et al.* Design and analysis of photorefractive long-period waveguide grating coupler[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0313002.  
张 明, 任建文, 陈 文, 等. 光折变长周期波导光栅耦合器的设计和分析[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0313002.
- [6] Zhang Ailing, He Peidong, Pan Honggang, *et al.* Design of electrically controlled double wavelength orthogonal polarization tunable filter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 072301.  
张爱玲, 何培栋, 潘洪刚, 等. 电控可调谐的正交偏振双波长滤波的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 072301.
- [7] Zhang Ailing, Sun Qinfang, Yan Guangtuo. Characteristics of the double-side modulation waveguide Bragg grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 060603.  
张爱玲, 孙钦芳, 闫广拓. 双边调制 Bragg 波导光栅的特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 060603.
- [8] Kip D, Hukriede J, Runde D. Holographic reflection filters in photorefractive LiNbO<sub>3</sub> channel waveguides[C]. Lumrs International Conference on Electronic Materials, 2002, 39(1): 191-234.
- [9] Benkelfat B E, Ferrière R, Wacogne B, *et al.* Technological implementation of Bragg grating reflectors in Ti:LiNbO<sub>3</sub> waveguides by proton exchange[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(10): 1430-1432.
- [10] Grobnc D, Mihailov S J, Smelser C W, *et al.* Bragg gratings made in reverse proton exchange lithium niobate waveguides with a femtosecond IR laser and a phase mask[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(7): 1453-1455.
- [11] Fu Kexiang, Wang Zhiheng, Wen Jun, *et al.* Diffractive grade of phase gratings[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(7): 870-876.  
傅克祥, 王植恒, 文 军, 等. 位相光栅的衍射级次[J]. 光学学报, 1998, 18(7): 870-876.
- [12] Zhang Guoping, Ye Jiaxiong, Li Zaiguang. The coupled-wave analysis of binary optical elements[J]. Opto-Electronic Engineering, 1997, 24(2): 18-22.  
张国平, 叶嘉雄, 李再光. 二元光学元件的耦合波分析[J]. 光电工程, 1997, 24(2): 18-22.
- [13] Liu Quan, Wu Jianhong. Analysis and comparison of the scalar diffraction theory and coupled-wave theory about grating[J]. Laser Journal, 2004, 25(2): 31-34.  
刘 全, 吴建宏. 光栅的衍射理论与耦合波理论的分析比较[J]. 激光杂志, 2004, 25(2): 31-34.
- [14] Xie W X, Douay M, Bernage P, *et al.* Second order diffraction efficiency of Bragg gratings written within germanosilicate fibres[J]. Optics Communications, 1993, 101(1-2): 85-91.
- [15] Hongzhi J, Yulin L. First- and second-order diffraction characteristics of fiber Bragg gratings [J]. Optics

Communications, 2000, 178(4): 339-343.

- [16] Chen F S, Denton R T, Nassau K, *et al.* Optical memory planes using LiNbO<sub>3</sub> and LiTaO<sub>3</sub> [J]. Proceedings of the IEEE, 1968, 56(4): 782-783.
- [17] Liu Simin, Guo Ru, Xu Jingjun. Photorefractive effect nonlinear optics and application[M]. Beijing: Science Press, 2004: 35.  
刘思敏, 郭 儒, 许京军. 光折变非线性光学及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 35.
- [18] Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1277-1294.