

基于铌酸锂的高阶可调谐布拉格波导光栅特性分析

王 钊^{1,2}, 张爱玲^{1,2}, 田红苗^{1,2}, 李青青^{1,2}

¹天津理工大学电气电子工程学院, 天津 300384;

²光电器件与通信技术教育部工程研究中心, 天津 300384

摘要 提出了一种可在铌酸锂上利用光刻及钛扩散方法实现高阶可调谐的布拉格波导光栅结构,并对其相关特性进行了分析。分析了占空比、光栅阶数、波导宽度差及外加电压对高阶布拉格波导光栅反射谱特性的影响。结果表明,折射率调制深度、最大反射率与零值带宽均随占空比呈周期性变化,中心波长随占空比的增加向长波方向漂移。在各阶光栅均取最佳占空比时,折射率调制深度最大;随着光栅长度的增大,最大反射率增大而零值带宽减小。随着波导宽度差的增大,最大反射率及零值带宽均增大,中心波长向长波方向漂移。当外加电压增加时,反射谱谱线形状几乎不变化,中心波长会向长波方向漂移,且呈线性增长趋势。

关键词 光栅; 光通信; 高阶可调谐布拉格波导光栅; 光刻; 钛扩散; 铌酸锂

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.060502

Characteristic Analysis of High-Order Tunable Bragg Waveguide Grating Based on Lithium Niobate

Wang Zhao^{1,2}, Zhang Ailing^{1,2}, Tian Hongmiao^{1,2}, Li Qingqing^{1,2}

¹School of Electrical and Electronic Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

²Engineering Research Center of Communication Devices and Technology,
Ministry of Education, Tianjin 300384, China

Abstract A high-order tunable Bragg waveguide grating can be prepared on lithium niobate by using the methods of photolithography and titanium diffusion. Its related characteristics are analyzed. The effects of duty cycle, grating order, waveguide width difference and applied voltage on the reflective spectral properties of higher-order Bragg waveguide gratings are analyzed. The results show that the refractive index modulation depth, the maximum reflectivity and the zero bandwidth of gratings change periodically with the duty cycle, and the central wavelength shifts to the longer wavelength with the increase of duty cycle. When the best duty cycle is chosen for each order grating, the refractive index modulation depth is the largest, and the maximum reflectivity increases and the zero bandwidth decreases with the increase of grating length. With the increase of waveguide width difference, both of the maximum reflectivity and the zero bandwidth increase, and the central wavelength shifts to the longer wavelength. Moreover, with the increase of applied voltage, the reflective spectral shapes almost remain the same and the central wavelength shifts to the longer wavelength and presents a linear growth trend.

Key words gratings; optical communications; high-order tunable Bragg waveguide grating; photolithography; titanium diffusion; lithium niobate

OCIS codes 050.2270; 060.4510; 230.7370

1 引言

随着以波导光栅为代表的集成光器件的大量应用,学者对波导光栅的研究愈发广泛。波导光栅根据周期

收稿日期: 2017-02-01; **收到修改稿日期:** 2017-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(61377075)

作者简介: 王 钊(1989—),男,硕士研究生,主要从事光通信器件方面的研究。E-mail: 13920179147@163.com

导师简介: 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

可以划分为长周期波导光栅和布拉格波导光栅^[1-3]。其中,布拉格波导光栅的工作原理是前向传输模式与反向传输模式在光栅区发生耦合,前向传输模式的能量传递给反向传输模式,形成对前向传输模式的反射^[4]。

布拉格波导光栅可以在铌酸锂晶体、聚合物等多种材料上制备^[5-9],其结构设计多样、易于集成。目前已报道过的高阶布拉格波导光栅的制作方法包括:电子束刻蚀(EBL)法、聚焦离子束(FIB)刻蚀法以及双光束干涉法等。Pierno 等^[10]采用 EBL 和反应离子蚀刻(RIE)结合的方法,在铌酸锂波导上获得周期为 $1.08\ \mu\text{m}$ 的三阶布拉格波导光栅。Ghoumid 等^[11]使用 FIB 刻蚀法在铌酸锂波导上获得周期为 $1.75\ \mu\text{m}$ 的五阶布拉格波导光栅。SON 等^[12]采用双光束干涉法在聚合物波导上获得周期为 $863\ \text{nm}$ 的三阶布拉格波导光栅。采用上述方法虽然获得了高阶布拉格波导光栅,但 EBL 和 FIB 刻蚀法获得的光栅结构成本较高,双光束干涉法光路复杂,且对角度精准度要求很高。

本文提出在铌酸锂晶体上通过光刻^[13-14]及钛扩散实现高阶布拉格波导光栅结构的方法,其制作过程简单,成本较低。在波导光栅两侧添加电极,借助铌酸锂晶体的电光效应,通过改变外加电压大小实现了对波导光栅的电控调谐。利用耦合模理论对光栅性能进行分析,研究了占空比、光栅阶数、波导宽度差以及外加电压等参量变化对光栅反射谱特性的影响,该研究为后续实验制备提供了理论参考。

2 理论分析

设计的高阶布拉格波导光栅结构俯视图如图 1 所示,其中 a 和 b 分别为非栅区和栅区的波导宽度, Λ 为布拉格光栅周期, L 为光栅长度, $(b-a)$ 为波导宽度差。在此结构中,非栅区与栅区截面图分别如图 2 实线与虚线所示, n_1 为上包层(通常为空气)折射率, n_2 为铌酸锂晶体的折射率,非栅区波导与栅区波导的厚度均为 h ,芯层折射率 n_c 沿 x 方向均呈非对称渐变分布,沿 z 方向均呈对称渐变分布。

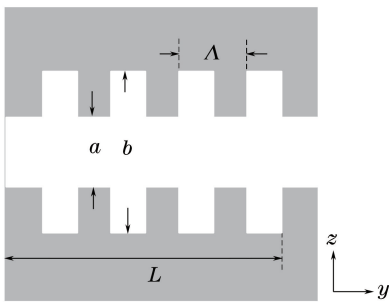


图 1 布拉格波导光栅俯视图

Fig. 1 Vertical view of Bragg waveguide grating

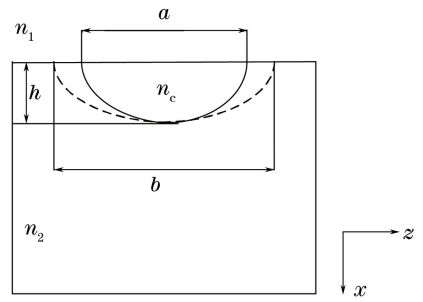


图 2 布拉格波导光栅截面图

Fig. 2 Sectional view of Bragg waveguide grating

图 1 所示波导光栅结构的有效折射率沿 y 方向呈周期性变化,即

$$n_{\text{eff}}(y) = \begin{cases} n_{\text{eff1}}, & N\Lambda \leq y \leq (N+1-p)\Lambda \\ n_{\text{eff2}} = n_{\text{eff1}} + \Delta n_{\text{eff}}, & (N+1-p)\Lambda < y < (N+1)\Lambda \end{cases}, \quad (1)$$

式中 n_{eff1} 为非栅区波导的有效折射率; n_{eff2} 为栅区波导的有效折射率; Δn_{eff} 为非栅区与栅区的有效折射率改变量; N 为正整数,表征光栅的周期个数; p 为占空比。波导光栅结构的有效折射率如图 3 所示。

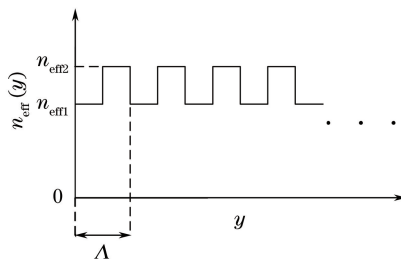


图 3 波导光栅沿 y 方向的有效折射率分布

Fig. 3 Effective refractive index distribution of waveguide grating along y direction

将(1)式进行傅里叶级数展开,得到

$$n_{\text{eff}}(y) = n_{\text{eff}1} + p\Delta n_{\text{eff}} + \Delta n_{\text{eff}} \sum_{m=1}^{\infty} (2p) \text{Sa}(mp\pi) \cos\left(m \frac{2\pi}{\Lambda} y\right), \quad (2)$$

式中 $\text{Sa}(\cdot)$ 为抽样函数。波导光栅的有效折射率包含常数项及不同周期的余弦项的叠加,第 m 阶余弦项的周期为 Λ/m ,第 m 阶的折射率调制度为

$$A_m = \Delta n_{\text{eff}} \frac{2\sin(mp\pi)}{m\pi}, \quad (3)$$

式中 A_m 的振幅为 $2\Delta n_{\text{eff}}/m\pi$,与占空比 p 无关,与光栅阶数 m 成反比,因此为了获得较大的折射率调制度,光栅的阶数不宜过大。当光栅阶数 m 不同时, A_m 随占空比 p 的变化如图 4 所示,可以看出,光栅阶数固定时,折射率调制度 A_m 随占空比呈周期性变化,折射率调制度最大时,对应着多个占空比取值。

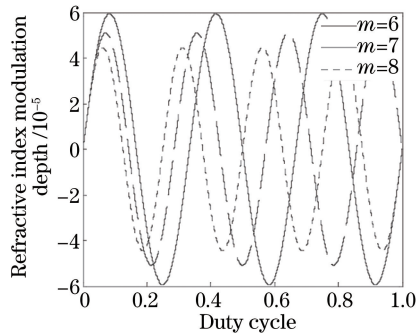


图 4 折射率调制度 A_m 随占空比的变化

Fig. 4 Refractive index modulation depth A_m versus duty cycle

周期为 Λ/m 的布拉格波导光栅的中心波长 λ_B 满足^[15]

$$m\lambda_B = 2(n_{\text{eff}1} + p\Delta n_{\text{eff}}) \Lambda. \quad (4)$$

也就是说,当光栅阶数、周期及有效折射率改变量一定时,随着占空比的增加,中心波长向长波方向漂移。由耦合模理论可知,折射率调制度为 A_m 的布拉格波导光栅的反射率^[16]为

$$R = \frac{\kappa^2 \sinh^2(sL)}{\sigma^2 \sinh^2(sL) + s^2 \cosh^2(sL)}, \quad (5)$$

式中 $\kappa = \pi A_m / \lambda$ 为耦合系数, λ 为入射光波长, $\sigma = \beta - m\pi/\Lambda$ 为失谐量, $\beta = 2\pi(n_{\text{eff}1} + p\Delta n_{\text{eff}}) / \lambda$ 为传播常数, $s = \sqrt{\kappa^2 - \sigma^2}$ 为衰减常数。当失谐量 $\sigma = 0$ 时,布拉格波导光栅反射率达到最大,其表达式为

$$R_{\text{max}} = \tanh^2(\kappa L). \quad (6)$$

当光栅反射率 $R = 0$ 时,反射谱中心波长两侧出现第一个零点,两零点间的波长带宽即为布拉格波导光栅的零值带宽,其表达式为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_B^2}{\pi(n_{\text{eff}1} + p\Delta n_{\text{eff}}) L} \frac{1}{\sqrt{\pi^2 + (\kappa L)^2}}. \quad (7)$$

由于铌酸锂晶体具有电光效应^[17-18],因此在波导光栅两侧添加图 5 所示的平板电极,改变外加电压,栅区及非栅区的波导有效折射率就会发生变化,从而实现波导光栅的电光调谐。为了减小外加电压,提高电光调谐灵敏度,同时避免平板电极覆盖波导造成的不必要的传输损耗,电极间距 d 应与栅区波导宽度 b 一致。

当外加电压为 V 时,非栅区与栅区间有效折射率改变量为

$$\Delta n'_{\text{eff}} = \frac{1}{2} [(1-p)\gamma_{33} n_{\text{eff}1}^3 + p\gamma_{33} n_{\text{eff}2}^3] V/d, \quad (8)$$

式中 γ_{33} 为铌酸锂晶体的电光系数。由(8)式得知,外加电压的改变将引起 $\Delta n'_{\text{eff}}$ 的改变,再结合(3)、(6)和(7)式可知, $\Delta n'_{\text{eff}}$ 的改变导致折射率调制度发生变化,进而引起最大反射率和零值带宽发生改变。

同理,结合(4)式可知,当外加电压为 V 时,中心波长表达式为

$$\lambda'_B = \lambda_B + [(1-p)\gamma_{33}n_{\text{eff1}}^3 + p\gamma_{33}n_{\text{eff2}}^3] \frac{\Delta V}{md}, \quad (9)$$

即改变外加电压大小可以实现对中心波长位置的调谐。

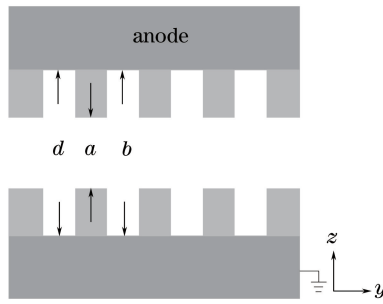


图5 电光可调谐布拉格波导光栅

Fig. 5 Electro-optical tunable Bragg waveguide grating

需要注意的是,外加电压的取值应控制在 $-150 \sim 150$ V之间,从而避免外加电压超过铌酸锂晶体的矫顽场(沿 z 轴方向约为 21 kV/mm),否则晶体将发生极化反转,进而影响电光系数的正负符号。

3 特性研究

为了保证单模传输,非栅区波导宽度范围应在 $6 \sim 8$ μm 之间,本文选取 7 μm ,非栅区波导有效折射率为 2.1388 。利用光刻制备高阶布拉格波导光栅,光栅周期应大于 2 μm ,为使中心波长出现在 1550 nm附近,光栅阶数应大于 6 。由图4可知,当占空比为 $5/12$ (约 0.42)时, 6 阶光栅对应的折射率调制度最大;当占空比为 $5/14$ (约 0.36)时, 7 阶光栅对应的折射率调制度最大;当占空比为 $5/16$ (约 0.31)时, 8 阶光栅对应的折射率调制度最大。

当各阶光栅取最佳占空比且波导宽度差等于 600 nm时,仿真得到光栅最大反射率及零值带宽随光栅长度的变化关系,分别如图6,7所示。由图可知,当光栅长度相同时,阶数越小,最大反射率越大,零值带宽越大;随着光栅长度的增加,最大反射率逐渐增大,零值带宽逐渐减小。

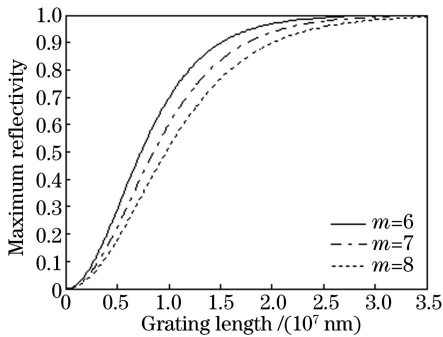


图6 阶数不同时最大反射率随光栅长度的变化

Fig. 6 Maximum reflectivity versus grating length under different orders

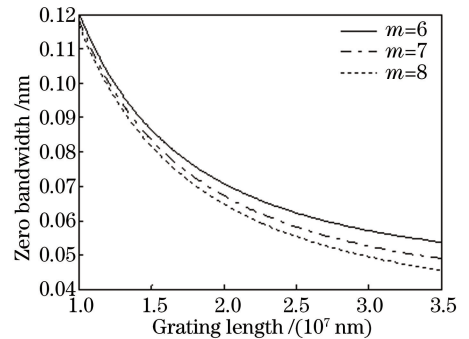


图7 阶数不同时零值带宽随光栅长度的变化

Fig. 7 Zero bandwidth versus grating length under different orders

当各阶光栅取最佳占空比且光栅长度为 3 cm时,仿真得到最大反射率及零值带宽随波导宽度差的变化关系,分别如图8,9所示。由图可知,当波导宽度差相同时,阶数越小,最大反射率越大,零值带宽越大;随着波导宽度差的增大,最大反射率和零值带宽均增大。

当各阶光栅取最佳占空比且光栅长度为 3 cm时,仿真得到中心波长随波导宽度差的变化关系,如图10所示。由图可知,随着波导宽度差的增大,中心波长向长波方向偏移,这是因为波导宽度差的增大导致光栅的有效折射率增大,从而中心波长增大。

在光栅阶数为 6 ,光栅长度等于 3 cm,波导宽度差等于 600 nm,外加电压分别为 $-150, 0, 150$ V的条件下,仿真得到最大反射率随占空比的变化关系,如图11(a)所示,可以看出,随着占空比的增加,最大反射率

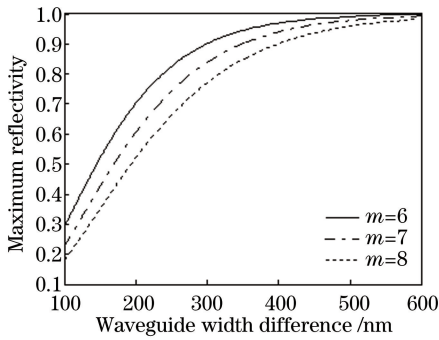


图 8 阶数不同时最大反射率随波导宽度差的变化

Fig. 8 Maximum reflectivity versus waveguide width difference under different orders

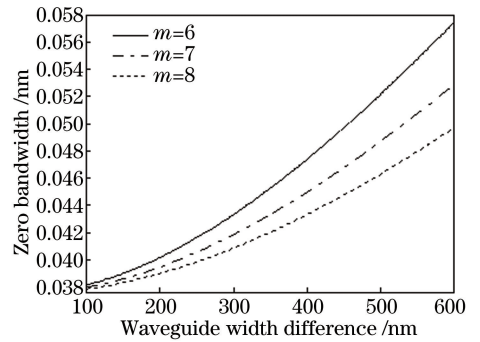


图 9 阶数不同时零值带宽随波导宽度差的变化

Fig. 9 Zero bandwidth versus waveguide width difference under different orders

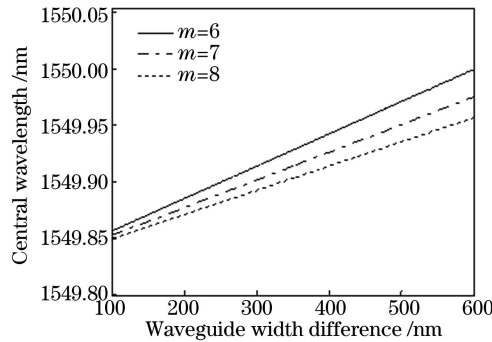


图 10 阶数不同时中心波长随波导宽度差的变化

Fig. 10 Central wavelength versus waveguide width difference under different orders

呈周期性变化。对图 11(a)中占空比为 0.35~0.39 的仿真结果放大,如图 11(b)所示,可以看出,电压取不同值时,最大反射率变化很小,反射谱的谱线高度几乎不变。选取其他占空比范围进行放大,所得结论相同,光栅阶数等于其他值时所得结论也相同。

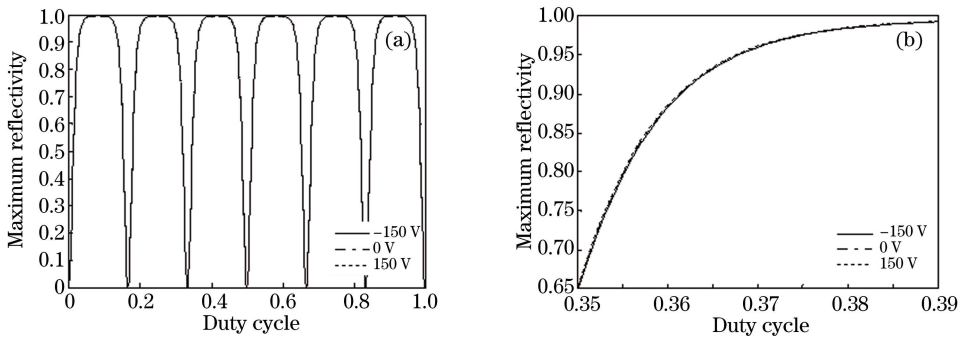


图 11 (a)外加电压不同时最大反射率随占空比的变化;(b)局部放大图

Fig. 11 (a) Maximum reflectivity versus duty cycle under different applied voltages; (b) enlarged partial view

在光栅阶数为 6,光栅长度为 3 cm,波导宽度差为 600 nm,外加电压分别为-150, 0, 150 V 的条件下,仿真得到零值带宽随占空比的变化关系,如图 12(a)所示,可以看出,随着占空比的增加,零值带宽呈周期性变化。对图 12(a)中占空比为 0.35~0.39 的仿真结果放大,如图 12(b)所示,可以看出,电压取不同值时,零值带宽变化很小,反射谱的谱线间距几乎不变。选取其他占空比范围进行放大,所得结论相同,光栅阶数等于其他值时,结论也相同。

在 6 阶光栅占空比最佳,光栅长度为 3 cm,波导宽度差为 600 nm,外加电压为-30, 0, 30 V 的条件下,仿真得到布拉格波导光栅反射谱随外加电压的变化关系,如图 13(a)所示,可以看出,随着外加电压的增加,中心波长向长波方向漂移,反射谱形状几乎不变。中心波长随外加电压的变化如图 13(b)所示,可以看出,

中心波长随电压呈线性增长。因此,可以通过改变外加电压的方式,在保证反射谱形状不变的前提下,实现对中心波长位置的调谐。光栅阶数等于其他值时,结论相同。

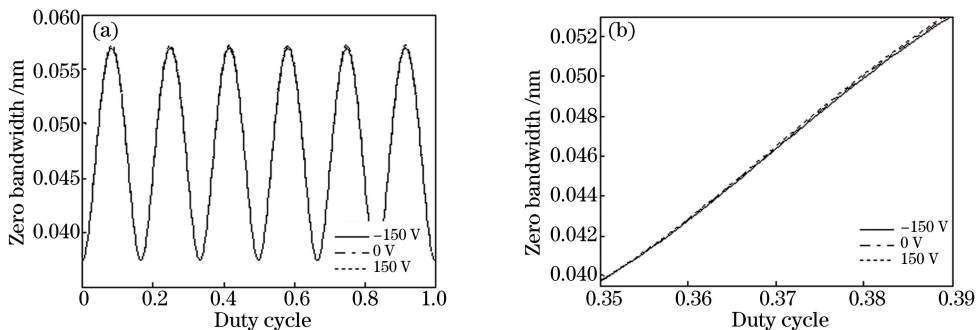


图 12 (a)外加电压不同时零值带宽随占空比的变化;(b)局部放大图

Fig. 12 (a) Zero bandwidth versus duty cycle under different applied voltages; (b) enlarged partial view

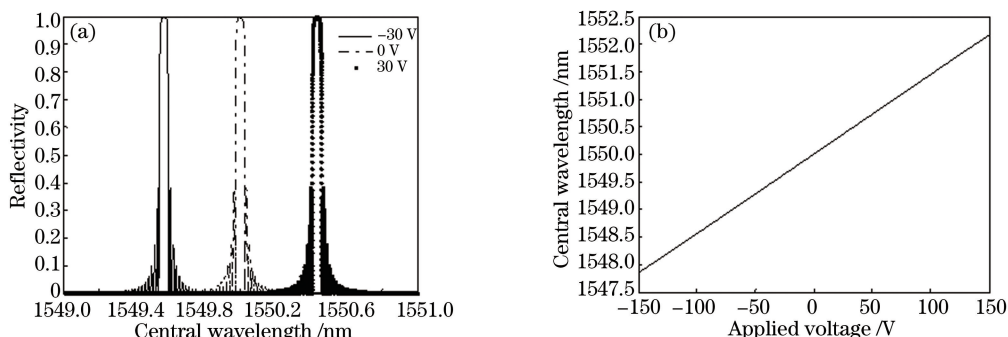


图 13 (a)反射谱和(b)中心波长随外加电压的变化

Fig. 13 (a) Reflection spectrum and (b) central wavelength versus applied voltage

4 结 论

提出一种在铌酸锂晶体上通过光刻及钛扩散实现高阶布拉格波导光栅结构的方法。制备出的光栅折射率调制度、最大反射率与零值带宽均随占空比呈周期性变化,在光栅阶数确定的情况下,通过选取最佳占空比可以获得较大的折射率调制度。光栅两侧添加电极后,改变外加电压,最大反射率及零值带宽几乎不变,但中心波长产生了漂移,因此,可以通过合理调节电压,在保持反射谱形状不变的情况下,实现在一定波长范围内对输入光的选择性滤波。快速的电光效应使铌酸锂波导光栅可作为快速可调谐光学滤波器,在光通信及光传感系统中有潜在的应用。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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器的设计[J].*激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 072301.
- [3] Zhang Ailing, Tian Hongmiao, Li Qingqing, *et al.* Characteristics of high-order Bragg waveguide grating based on phase-mask method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 010603.
张爱玲,田红苗,李青青,等.基于相位掩模法的高阶布拉格波导光栅特性[J].*激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 010603.

- [4] Kocabas A, Aydinli A. Polymeric waveguide Bragg grating filter using soft lithography[J]. *Optics Express*, 2006, 14(22): 10228-10232.
- [5] Kobayashi S, Sawada M, Suda T, *et al.* Narrow tunable polysilane optical waveguide Bragg grating filters[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(6): 363-365.
- [6] Wang Yiping, Chen Jianping, Li Xinwan, *et al.* Fast tunable electro-optic polymer waveguide gratings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(10): 4782-4788.
王义平, 陈建平, 李新碗, 等. 快速可调谐电光聚合物波导光栅[J]. *物理学报*, 2005, 54(10): 4782-4788.
- [7] Chang A S P, Morton K J, Tan H, *et al.* Tunable liquid crystal-resonant grating filter fabricated by nanoimprint lithography[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(19): 1457-1459.
- [8] Wong W H, Pun E Y B, Chan K S. Electron beam direct-write tunable polymeric waveguide grating filter[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(12): 1731-1733.
- [9] Zhang Ming, Meng Huiyun, Chen Liuwei, *et al.* Tunable filtering scheme and characteristics analysis based on photorefractive gratings[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(4): 96-101.
张明, 孟惠云, 陈刘伟, 等. 基于光折变光栅的可调谐滤波方案及特性分析[J]. *光电工程*, 2012, 39(4): 96-101.
- [10] Pierno L, Dispenza M, Secchi A, *et al.* A lithium niobate electro-optic tunable Bragg filter fabricated by electron beam lithography[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2008, 10(6): 401-405.
- [11] Ghoumid K, Benkelfat B E, Ferriere R, *et al.* Wavelength-selective Ti:LiNbO₃ multiple Y-branch coupler based on focused ion beam milled Bragg reflectors[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(23): 3536-3541.
- [12] Son N, Kim K, Kim J, *et al.* Near-infrared tunable lasers with polymer waveguide Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 827-934.
- [13] Pang Mengyao, Cheng Xinli, Qin Changfa, *et al.* A study on lithography process for the Ruihong RZJ-304 photoresist[J]. *Journal of Suzhou University of Science and Technology*, 2015, 32(3): 20-24.
庞梦瑶, 程新利, 秦长发, 等. 瑞红 RZJ-304 光刻胶光刻工艺研究[J]. *苏州科技学院学报*, 2015, 32(3): 20-24.
- [14] Quirk M, Serda J. *Semiconductor manufacturing technology*[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [15] 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.
- [16] Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [17] Zhou Huijuan, Meng Zhou, Liao Yi. Frequency shift characteristics analysis of LiNbO₃ waveguide electro-optic intensity modulator[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(4): 901-905.
周会娟, 孟洲, 廖毅. 铌酸锂波导电光强度调制器的移频特性[J]. *中国激光*, 2009, 36(4): 901-905.
- [18] Macario J, Schuetz C A, Yao P, *et al.* Development and characterization of LiNbO₃ electro-optic phase modulator at 220 GHz for millimeter-wave imaging system[C]. *SPIE*, 2011, 8188: 81880E.