

电控可调谐的正交偏振双波长滤波器的设计

张爱玲^{1,2} 何培栋^{1,2*} 潘洪刚^{1,2} 闫广拓^{1,2} 孙钦芳^{1,2}

¹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,天津 300384

²教育部通信器件与技术工程研究中心,天津 300384

摘要 设计了一种基于铌酸锂晶体的电控可调谐波导光栅双波长滤波器。在可同时传输横电波(TE)和横磁波(TM)模式的钛扩散波导上刻写布拉格光栅,能够实现正交偏振的双波长滤波。利用铌酸锂的电光效应改变波导的有效折射率,可以实现两个布拉格波长的快速调谐。对波导光栅滤波性能的分析结果表明,蚀刻光栅在蚀刻坡度小于 15° ,蚀刻占空比为 $1/2$ 时,滤波特性最好,且随着蚀刻深度的增加,光栅的反射率与带宽均增加。通过横向电场对波导光栅进行调谐,双波长滤波器的TE模式调谐灵敏度达到 15.6 pm/V ,TM模式的达到 5.5 pm/V 。

关键词 光通信;光学滤波器;动态光栅;电光效应;铌酸锂

中图分类号 O436.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.072301

Design of Electrically Controlled Double Wavelength Orthogonal Polarization Tunable Filter

Zhang Ailing^{1,2} He Peidong^{1,2} Pan Honggang^{1,2} Yan Guangtuo^{1,2} Sun Qinfang^{1,2}

¹Tianjin Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

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

Abstract An electrically controlled double wavelength tunable filter based on lithium niobate (LN) is designed. Double wavelength of orthogonal polarization filter is achieved by etching Bragg grating on the Ti-diffusion LN waveguide, which supports transverse electric (TE) mode and transverse magnetic (TM) mode. The refractive index distribution and therefore the Bragg wavelength can be fast tuned by using electro-optic effect in LN. The performance of waveguide grating filter is analyzed and results show that the grating with $1/2$ etching duty cycle and less than 15° etching angle has the best filter characteristic. The reflectivity and bandwidth increase with the etching depth increasing. Double wavelength filter achieves 15.6 pm/V sensitivity for TE mode, 5.5 pm/V sensitivity for TM mode by adding the transverse electric field on waveguide grating.

Key words optical communications; optical filters; dynamic grating; electro-optic effect; lithium niobate

OCIS codes 230.7408; 190.2055; 130.7408; 130.3730

1 引言

随着光通信系统的迅速发展,更加灵活、高效地利用通信资源变得越来越重要,这就要求光滤波器能够实现波长、带宽以及波长间隔的独立可调^[1],而光栅器件就可以很好地满足这一要求。光栅是一种通过一定方法使得折射率呈周期性分布的光学器件,是一种无源滤波器件,短周期的布拉格光栅具有极窄的滤波带宽^[2],在光通信和光传感等领域得到了越来越广泛的应用^[3]。高速光通信网络的发展对光通信器件的快速可调谐性提出更高的要求,然而传统的光纤光栅滤波器只能实现基于弹光效应(应力)和热光效应(温度)的慢性调谐^[4-5],因而其在高速光通信网络中的应用受到限制。近年来,为实现光栅器件的快速调谐,人们致力于利用各种电光材料来制作有源控制的调谐波导光栅器件^[6-7]。优质的电光材料是实现波导光栅滤波器的制

收稿日期:2015-01-23;收到修改稿日期:2015-03-05;网络出版日期:2015-04-21

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: hepeidong319@126.com

作和电控调谐性的关键,其中应用最广泛是聚合物电光材料和铌酸锂晶体(LiNbO₃)。据报道,利用极化的掺杂型聚合物材料设计的可调谐波导光栅,其反射波长的调谐灵敏度为6.1 pm/V,能够达到纳秒量级的调谐速度^[8]。但聚合物电光材料易受外界环境的影响,热稳定性差,极化聚合物存在退极化问题,而铌酸锂晶体具有良好的电光、声光、非线性光学和光折变效应,是迄今人们发现的透射窗较宽(0.37~5 μm)、功能较多、综合指标较好的高折射率人工晶体之一,是目前十分成熟的电光材料^[9]。2005年,Grobnic等^[10]在铌酸锂晶体上制备了反射率为50%的布拉格波导光栅滤波器,证实了制备LiNbO₃短周期波导光栅滤波器的技术可行性。2008年,郑建成等^[11]采用铌酸锂制备了电控可调谐的长周期波导光栅,实现其传输特性随外加电压可调,实验上证实了铌酸锂波导光栅的电控可调谐性。2008年,李可佳等^[12]设计的基于铌酸锂波导的可重构光分插复用器(ROADM),在外加电压-150~150 V时,可获得25 nm的波长调谐范围。

本文提出并设计了一种基于LiNbO₃晶体的电控可调谐的波导光栅双波长滤波器。利用钛扩散在X切LiNbO₃基底制作Y向传播的单模波导,并利用电子束光刻技术在可同时传输横电波(TE)模式和横磁波(TM)模式波导上刻写布拉格光栅,能够实现正交偏振的双波长滤波,通过调节光栅两侧的电压改变波导光栅的折射率,进而实现滤波器布拉格波长的快速调谐以及双波长滤波。这种电控调谐光栅滤波器具有调谐速度快、调谐灵敏度高、稳定性好等优点,可应用于高速光通信和光传感领域。

2 可调谐波导光栅正交偏振双波长滤波器设计

设计的滤波器结构如图1所示,*I*:传输谱,*R*:反射谱,*E*:电场,*T*:透射谱,GND:接地。在X切铌酸锂晶体基底上利用钛扩散法制备Y向单模传输的沟槽式波导,在制备的波导结构上刻写空间调制的布拉格光栅,并在光栅两侧沉积平板共面电极,电极与基底之间增加SiO₂缓冲层。

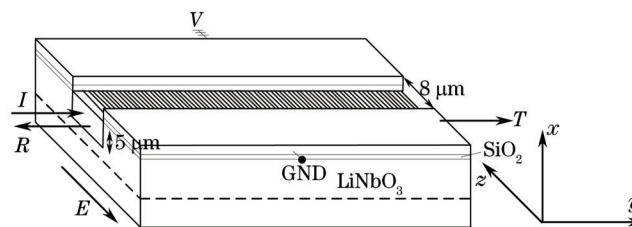


图1 可调谐布拉格波导光栅结构图

Fig.1 Structure schematic of the tunable Bragg waveguide grating

实验室制备的钛扩散波导模场宽度为8 μm,深度约5 μm,波导的TE模式和TM模式的有效折射率分别为2.1397,2.2115,TE模式和TM模式传输损耗分别为0.89807 dB/cm、0.76072 dB/cm。

目前制作布拉格光栅结构的方式通常有相位掩模板法^[13]、飞秒激光逐点刻写法^[14]、等离子体刻蚀^[15]等,在波导上拟采用电子束光刻(EBL)方式刻写布拉格光栅,该技术分辨率可以达到10 nm^[16]。当光栅周期为 $\Lambda = 362.3 \text{ nm}$,光栅长度为 $L = 10.87 \text{ mm}$ 时,根据光栅方程 $m\lambda_{\text{res}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda$,当 $m = 1$ 时得该滤波器的谐振波长分别为 $\lambda_{\text{res}1} = 1550 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{res}2} = 1602.5 \text{ nm}$ 。刻写的皱阶布拉格波导光栅如图2所示。

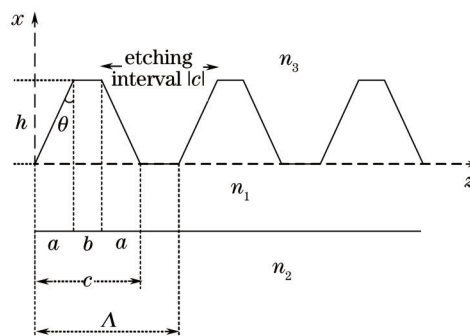


图2 皱阶布拉格波导光栅

Fig.2 Wrinkle-order Bragg waveguide grating

根据波导光栅转移矩阵理论,空间调制的皱阶布拉格光栅时反射率为^[17]:

$$R = \frac{k_c^2 \sinh^2(Ls)}{(\delta/\Lambda)^2 \sinh^2(Ls) + s^2 \cosh^2(Ls)}, \quad (1)$$

式中 $s = \sqrt{k_c^2 - (\delta/\Lambda)^2}$ 为衰减系数, 其中 $\delta = m\pi - \Lambda\beta$ 为失谐量, β 为波导内的传播常数, k_c 为波导光栅的分布反馈系数, 类似于光纤布拉格光栅耦合模理论中的耦合系数。

由(1)式可知, 在 $\delta = 0$ 时, 光栅有最大反射率, 此时的波长为谐振波长, 表示为:

$$\lambda_{\max} = \left(1 + \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}}\right) \lambda_{\text{res}}, \quad (2)$$

有效折射率的变化量 Δn_{eff} 随波导光栅蚀刻深度的变化而变化, 由(2)式知, 布拉格波长与谐振波长之差由 Δn_{eff} 决定。

当刻写的皱阶布拉格波导光栅为矩形, 即图2中的 $\theta = 0$ 时有:

$$k_c = \frac{k^2 h}{\beta^2 \Lambda h_{\text{eff}}} \sin[\beta \Lambda (1 - D)], \quad (3)$$

式中 h 为蚀刻深度, D 为蚀刻占空比 ($D = \frac{c}{\Lambda}$), h_{eff} 为有效波导厚度, k 为波导横向波矢。

图3为不同蚀刻深度下蚀刻占空比对最大反射率的影响, 可知在占空比为 1/2 时有最大反射率, 蚀刻占空比的增加或降低都会降低波导光栅的最大反射率, 而且在蚀刻深度越大时, 占空比因素影响相对越小。

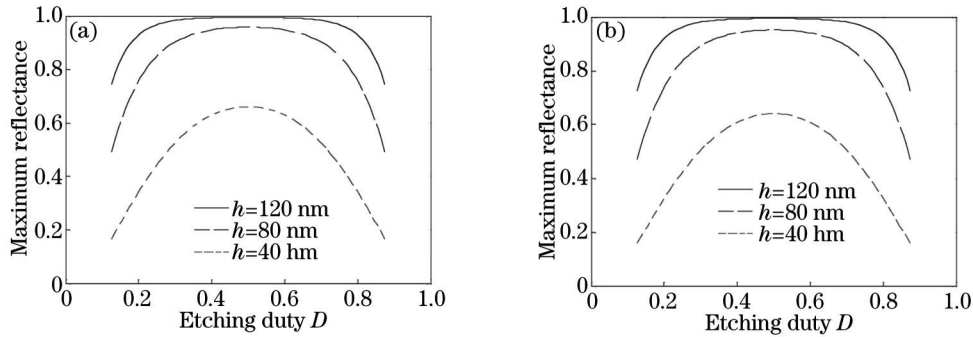


图3 蚀刻占空比对波导光栅最大反射率的影响。(a) TE模式; (b) TM模式

Fig.3 Effect of the etching duty on the maximum reflectance of the waveguide grating. (a) TE mode; (b) TM mode

由于制作工艺误差及侧向蚀刻作用^[18], 波导光栅纵截面是有一定蚀刻坡度 θ 的梯形截面, 设定占空比为 1/2, 对(3)式进行修正:

$$k_c = \frac{k^2}{2\pi\beta^2 h_{\text{eff}} \tan \theta} \sin(2\beta h \tan \theta), \quad (4)$$

式中 θ 为蚀刻坡度 ($\theta = \arctan \frac{a}{h}$)。

根据(4)式可知, 分布反馈系数与蚀刻深度 h , 蚀刻坡度 θ 有关。图4为在 $h_{\text{eff}} = 5 \mu\text{m}$, 蚀刻深度 150 nm, 占空比为 1/2 时蚀刻坡度因素在对光栅最大反射率的影响。由图可知坡度 θ 的增加会一定程度降低光栅最

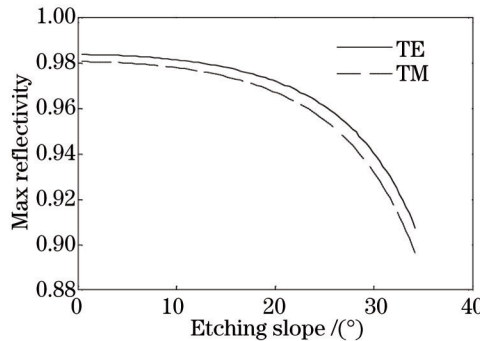


图4 蚀刻坡度对波导光栅最大反射率的影响。(a) TE模式; (b) TM模式

Fig.4 Effect of the etching slope on the maximum reflectance of the waveguide grating. (a) TE mode; (b) TM mode

大反射率, $\theta > 15^\circ$ 时蚀刻坡度作用较为明显, 而 $\theta < 15^\circ$ 时坡度因素对反射率影响较小。电子束光刻(EBL)方式刻写光栅的坡度可以控制在 15° 以内, 不会影响光栅的反射率。

忽略蚀刻坡度的影响, 根据(3)式可知, 分布反馈系数与占空比, 蚀刻深度有关。图5为波导有效厚度 $h_{\text{eff}} = 5 \mu\text{m}$, 占空比 $D = 1/2$ 时, 不同蚀刻深度的光栅反射谱, 可以看出蚀刻深度 h 对波导光栅反射率及反射带宽都有较大影响, 蚀刻深度较小时会极大地降低光栅滤波性能。在蚀刻深度为 150 nm 时, 反射谱的反射率近似为 100% , 其TE模式 3 dB 带宽为 0.18 nm , TM模式的 3 dB 带宽为 0.15 nm 。

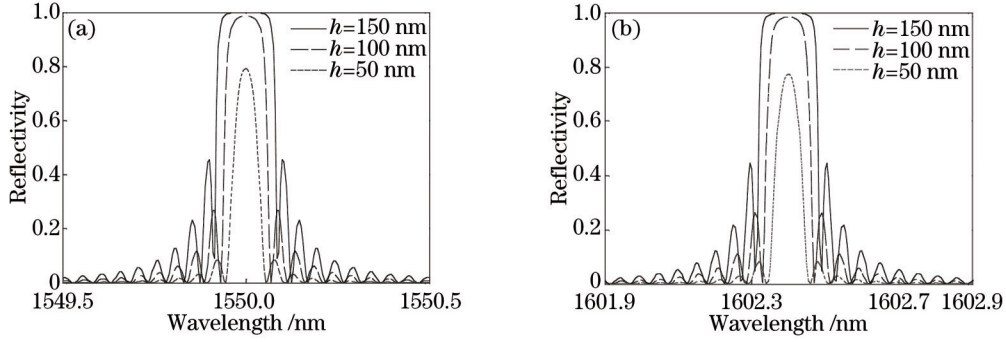


图5 蚀刻深度对波导光栅反射谱的影响。(a) TE模式; (b) TM模式

Fig.5 Effect of the etching depth on the reflection spectrum of the waveguide grating. (a) TE mode; (b) TM mode

该波导光栅滤波器反射布拉格波长的调谐是利用铌酸锂晶体的线性电光效应, 通过外加电压改变波导光栅的有效折射率实现的。在 X 切 Y 传的钛扩散波导两侧加横向电场, 所加电场方向平行铌酸锂(LN)晶体光轴, 根据折射率椭球理论, 折射率椭球的主轴不会发生转动, 但是折射率大小发生改变:

$$\begin{cases} n_o(E) = n_o - \frac{1}{2} r_{13} n_o^3 E \\ n_c(E) = n_c - \frac{1}{2} r_{33} n_c^3 E \end{cases}, \quad (5)$$

在外加电场的作用下, 铌酸锂 TE 模式和 TM 模式的折射率变化量分别为 $\Delta n_1 = \frac{1}{2} r_{33} n_c^3 E$ 和 $\Delta n_2 = \frac{1}{2} r_{13} n_o^3 E$ 。模拟结果表明模式的有效折射率的变化与材料折射率的变化一致, 即 $\Delta n \approx \Delta n_{\text{eff}}$ 。则 TE 模式和 TM 模式波导光栅的布拉格波长为

$$\begin{cases} \lambda_{\text{res1}} = 2 \left(n_{\text{eff1}} - \frac{1}{2} r_{13} n_{\text{eff1}}^3 V/d \right) \Lambda \\ \lambda_{\text{res2}} = 2 \left(n_{\text{eff2}} - \frac{1}{2} r_{33} n_{\text{eff2}}^3 V/d \right) \Lambda \end{cases}, \quad (6)$$

式中 n_{eff1} 和 n_{eff2} 分别为 TM 模和 TE 模的有效折射率。相应布拉格波长的改变量分别为 $\Delta \lambda_{\text{res1}} = r_{13} n_{\text{eff1}}^3 V \Lambda / d$, $\Delta \lambda_{\text{res2}} = r_{33} n_{\text{eff2}}^3 V \Lambda / d$ 。TE 模式和 TM 模式波导光栅的布拉格波长之差为:

$$\Delta \lambda = 2 \left[n_{\text{eff1}} - n_{\text{eff2}} - \left(\frac{1}{2} r_{13} n_{\text{eff1}}^3 - \frac{1}{2} r_{33} n_{\text{eff2}}^3 \right) V/d \right] \Lambda, \quad (7)$$

由(6)式得, 波导光栅的布拉格波长及反射谱随外加电压的变化关系如图6和图7所示, 由(7)式得, 双波长滤波器波长差随外加电压的变化如图8所示。

图6可以看出波导光栅布拉格波长的变化与外加电压呈线性关系。随着电压的增大, 布拉格波长向短波方向漂移。电极间距(波导宽度) $d = 8 \mu\text{m}$ 的情况下, TE 模和 TM 模布拉格波长的调谐灵敏度分别为 15.6 pm/V 和 5.5 pm/V 。图7表示该波导光栅在外加电压分别为 -100 V , 0 V 和 $+100 \text{ V}$ 时的反射窗, 随着电压增大, TE 模和 TM 模的峰值波长及反射率均增大, 在外加电压改变 200 V 时, TE 模和 TM 模峰值波长漂移量分别为 3.1 nm 和 1.1 nm 。从图8中可以看出 TE 模与 TM 模之间的布拉格波长差随着电压的增大不断增大, 电压改变 200 V 时其调谐范围大约为 1.8 nm 。因此, 可以增大电压来增加反射率以及波长差的调谐范围。考虑到过高电压可能对基底产生损伤, 可以在电极与基底之间增加 SiO_2 缓冲层保护基底。增加 SiO_2 缓冲层不仅可以保护基底不受外加电压损伤, 还可以减缓微波调制信号和光波速度不匹配问题, 实现滤波器更快的调谐。

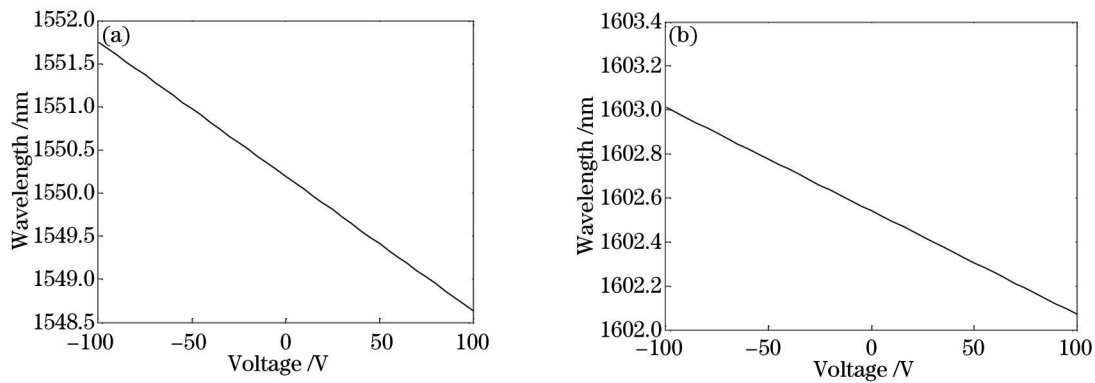


图6 布拉格波长与外加电压变化关系。(a) TE模式;(b) TM模式

Fig.6 Effect of the applied voltage on Bragg wavelength. (a) TE mode; (b) TM mode

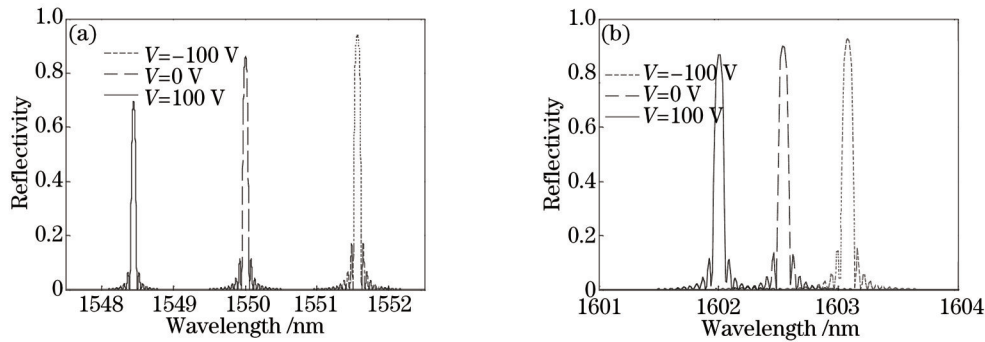


图7 不同外加电压下的滤波器反射窗。(a) TE模式;(b) TM模式

Fig.7 Reflection windows of filter on different applied voltage. (a) TE mode; (b) TM mode

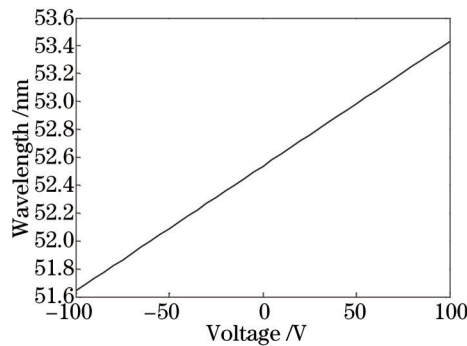


图8 电压对波长差的影响

Fig.8 Effect of the voltage on wavelength difference

3 结 论

提出并设计了一种电控可调谐正交偏振双波长滤波器。在可同时传输TE和TM模式的钛扩散波导上刻写布拉格光栅,能够实现正交偏振的双波长滤波。在满足单模传输尺寸下,滤波器的滤波特性与蚀刻占空比、蚀刻坡度、蚀刻深度等因素密切相关。经分析得到蚀刻占空比为1/2,蚀刻坡度 $\theta < 15^\circ$ 时具有最优的滤波特性。且随着蚀刻深度的增加,光栅的反射率与带宽均增加。利用LiNbO₃快速响应的线性电光效应,可实现双波长滤波器纳秒量级的调谐。双波长滤波器的波长及波长差均与外加电压呈线性关系,两个波长的调谐灵敏度分别可达到15.6 pm/V和5.5 pm/V。

参 考 文 献

- 1 Zhang Hailiang, Tang Ming, Xie Yiwei, *et al.*. Programmable bandwidth-tunable and wavelength-variable fiber grating filter[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706011.
- 张海亮, 唐明, 谢意维, 等. 可编程带宽波长独立可调光纤光栅滤波器[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706011.
- 2 Zhao Guhao, Zhao Shanghong, Yao Zhoushi, *et al.*. Quantum key distribution analysis for filtering scheme based on

- double fiber bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0918001.
- 赵顾颢, 赵尚弘, 么周石, 等. 基于双光纤布拉格光栅滤波的量子密钥分发误码率分析[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0918001.
- 3 Qu Li, Meng Yu, Zhuo Zhongchang, *et al.*. Study on delay and dispersion characteristics of the fiber bragg grating fabry-perot cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0806001.
- 屈 丽, 孟 瑜, 卓仲畅, 等. 光纤布拉格光栅法布里珀罗腔时延和色散特性的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0806001.
- 4 D Runde, S Brunken, C E Ruter, *et al.*. Integrated optical electric field sensor based on a bragg grating in lithium niobate[J]. Appl Phys B, 2007, 86(1): 91-95.
- 5 X S Qian, H Wu, Q Wang, *et al.*. Electro-optic tunable optical isolator in periodically poled LiNbO₃[J]. J Appl Phys, 2011, 109(5): 053111.
- 6 Allan S P Chang, Keith J Morton, Hua T, *et al.*. Tunable liquid crystal-resonant grating filter fabricated by nanoimprint lithography[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(19): 1457-1459.
- 7 H Herrmann, K D Buchter, R Ricken, *et al.*. Tunable integrated electro-optic wavelength filter with programmable spectral response[J]. Lightwave Technol, 2010, 28(7): 1051-1056.
- 8 Wang Yiping, Chen Jianping, Li Xinwan, *et al.*. Fast tunable electro-optic polymer waveguide gratings[J]. Acta Phys Sin, 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.
- 9 Li Jinyang, Yao Yanqing, Wu Jianjie, *et al.*. Theoretical analysis and preliminary fabrication of Ti-diffused LiNbO₃ ridge waveguides[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0223001.
- 李金洋, 要彦清, 吴建杰, 等. 钛扩散铌酸锂脊型形波导理论分析与初步制备[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0223001.
- 10 D Grobncic, S J Mihailov, C W Smelser, *et al.*. Bragg gratings made in reverse proton exchange lithium niobate waveguides with a femtosecond IR laser and a phase mask[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2005, 17(7): 1453-1455.
- 11 Jin W, Chiang K S, Liu Q. Electro-optic long-period waveguide gratings in lithium niobate[J]. Optics Express, 2008, 16(25): 20409-20417.
- 12 Li Kejia. Design on Electro-optical Tunable ROADM Based on Lithium Niobate Waveguide[D]. Tianjin: Tian Jin university, 2008: 41-43.
- 13 Yu Hua, He Wei, Guo Huiyong, *et al.*. Study of fiber Bragg grating fabrication online on draw tower via phase mask method and equipment manufacturing[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0505001.
- 余 华, 何 伟, 郭会勇, 等. 基于相位掩模板的拉丝塔在线制作光纤布拉格光栅方法及装置研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0505001.
- 14 Hu Liaolin, Bu Lina, Hua Dengxin. Improvement of beam-spot size in fiber Bragg grating inscribed point-by-point with infrared femtosecond laser[J]. Laser&Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 041404.
- 胡辽林, 步丽娜, 华灯鑫. 红外飞秒激光逐点刻写光纤布拉格光栅的束斑优化[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 041404.
- 15 S Z Yin. Lithium niobate fibers and waveguides: fabrication and application[J]. Proceeding of IEEE, 1999, 87(11): 1962-1974.
- 16 Zhang Chao, Fang Liang, Sui Bingcai, *et al.*. Nano-sacle lithography and in-situ electrical measurements based on the micro-chips in a transmission electron microscope[J]. Acta Phys Sin, 2014, 63(24): 248105.
- 张 超, 方 粮, 隋兵才, 等. 基于微芯片的透射电子显微镜的低温纳米精度电子束刻蚀与原位电学输运性质测量[J]. 物理学报, 2014, 63(24): 248105.
- 17 Z Q Cao. The Transfer Matrix Method in Guided-Wave Optics[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000: 111-120.
- 18 V Foglietti, E Cianci, D Pezzetta, *et al.*. Fabrication of band-gap structures in planar nonlinear waveguides for second harmonic generation[J]. Microelectron Eng, 2003, 67(1): 742-748.

栏目编辑: 刘丰瑞