

文章编号: 0253-2239(2004)12-1667-5

级联二阶非线性铌酸锂全光开关的研制*

陈云琳 刘晓娟 郭娟 楼慈波 陈绍林 许京军 张光寅

(南开大学物理科学学院, 天津 300071)

摘要: 以基于准位相匹配和频与差频级联二阶非线性 $[\chi^{(2)}; \chi^{(2)}]$ 基础上的全光开关的理论分析作指导,进行了周期极化铌酸锂晶体(PPLN)和退火质子交换光波导(APE)的实验制备,利用所研制的 PPLN-APE 器件,以自行研制的工作波长为 $1.54 \mu\text{m}$ 的被动调 Q 掺钴铝酸镁激光器作为控制光源,以工作波长为 $1.5 \mu\text{m}$ 的连续二极管激光器为信号光源进行了级联二阶非线性全光开关实验。当控制光峰值功率为 3 kW,信号光功率为 1 mW 时,实现 13% 的开关效率,分析了进一步提高全光开关性能的途径。

关键词: 非线性光学; 全光开关; 退火质子交换; 铌酸锂晶体; 准相位匹配

中图分类号: TN256 文献标识码: A

The Study of All-Optical Switching of LiNbO_3 Based on Cascading of Second-Order Nonlinearity

Chen Yunlin Liu Xiaojuan Guo Juan Lou Cibo Chen Shaolin

Xu Jingjun Zhang Guangyin

(*Institute of Physical Science, Nankai University, Tianjin 300071*)

(Received 1 September 2003; revised 1 March 2004)

Abstract: Based on the theoretical analysis of cascading of sum frequency-generation and difference-frequency-generation processes $[\chi^{(2)}; \chi^{(2)}]$ under quasi-phase-matching conditions, periodically poled lithium niobate (PPLN) and annealed-proton-exchanged waveguide (APE) were fabricated. Using the fabricated crystal of PPLN-APE, an all-optical switching experiment is carried out. The control pulse is generated by a Q-switched Co^{2+} -doped MgAl_2O_4 laser with a wavelength of $1.54 \mu\text{m}$. The CW signal beam is generated by a laser diode with wavelength of $1.5 \mu\text{m}$. When the control pulse intensity reached 3 kW and the CW signal intensity reached 1 mW, the all-optical switching realized a switching efficiency of 13%. In the conclusion, the key technologies to improve the switching properties further is discussed.

Key words: nonlinear optics; all-optical switching; annealed proton exchange; lithium niobate; quasi-phase-matched

1 引 言

随着密集波分复用技术的应用以及光联网的提出,光开关技术已经成为未来光联网的关键技术之一。全光开关以光的形式控制光,可以摆脱目前光通信网络中光-电-光的繁琐变换,实现宽带、高速、

大容量的交换,满足全光通信网的要求,将在网络通讯中起到关键作用^[1~4]。宽频带全光开关是制约高速光子信息处理,尤其是高速光计算与光通信的“瓶颈”元件,其任务是将通信网络中所有的信号进行重新定向,或在波分复用技术中选择特定信号。基于准相位匹配和频与差频级联二阶非线性效应的全光开关具有全光透明特性,且速度快、噪声低、无啁啾、所需控制光功率小并保持着互作用光波的强度和相位信号等优点,将在网络发展中起到更为重要的作用^[5~7]。近年来,由于铌酸锂晶体(LiNbO_3)具有大

* 国家自然科学基金(1017404,90101022)、天津市重点自然科学基金(033800111)、天津市国际合作项目资助课题。

E-mail: ylchen@nankai.edu.cn

收稿日期:2003-09-01; 收到修改稿日期:2004-03-01

的二阶非线性系数,且其加工工艺日趋成熟,周期极化方法迅速发展^[8~11],使得用周期极化铌酸锂(PPLN)实现的基于准相位匹配和频与差频级联二阶非线性基础上的全光开关的研制成为热点。国外在这方面的理论研究日益成熟^[12~14],实验研究所取得的结果已逐渐接近实际应用水平。如 Fejer 等^[6]在 2000 年用周期极化铌酸锂退火质子交换波导做的试验中只需控制光达 185 mW 就实现了 96% 的开关比。国内目前在此领域的研究只限于理论分析,尚没有实验方面的报道。

本文对基于准相位匹配和频与差频级联二阶非

线性 $[\chi^{(2)}; \chi^{(3)}]$ 基础上的全光开关进行了理论分析,并以此为指导,进行了周期极化铌酸锂晶体以及退火质子交换光波导(APE)的实验制备,利用所研制的退火质子交换光波导器件进行了级联二阶非线性全光开关实验,分析了进一步提高全光开关性能的途径和手段。

2 理论分析

周期极化铌酸锂光波导中,基于和频与差频的级联二阶非线性效应可用耦合模方程描述为

$$\frac{dE_{\text{CTRL}}}{dz} = i \frac{2\pi d_{\text{eff}}}{n_{\text{CTRL}} \lambda_{\text{CTRL}}} E_{\text{SFG}} E_{\text{SIG}}^* \exp(-i\Delta K z) - \alpha_{\text{CTRL}} E_{\text{CTRL}}, \quad (1)$$

$$\frac{dE_{\text{SIG}}}{dz} = i \frac{2\pi d_{\text{eff}}}{n_{\text{SIG}} \lambda_{\text{SIG}}} E_{\text{SFG}} E_{\text{CTRL}}^* \exp(-i\Delta K z) - \alpha_{\text{SIG}} E_{\text{SIG}}, \quad (2)$$

$$\frac{dE_{\text{SFG}}}{dz} = i \frac{2\pi d_{\text{eff}}}{n_{\text{SFG}} \lambda_{\text{SFG}}} E_{\text{CTRL}} E_{\text{SIG}}^* \exp(-i\Delta K z) - \alpha_{\text{SFG}} E_{\text{SFG}}, \quad (3)$$

其中 E_i 为光场的振幅 ($i = \text{CTRL}, \text{SIG}, \text{SFG}$), $*$ 表示复共轭, n_i 为各光的模折射率, λ_i 为各个光的波长, d_{eff} 为有效非线性系数, α_i 为传播损耗, ΔK 为相位失配因子。

用级联二阶非线性实现全光开关过程中,强的控制光和相对弱的信号光首先发生和频过程产生和频光,然后和频光再与控制光发生差频过程产生信号光,该过程可以用公式表示为

$$\omega_{\text{CTRL}} + \omega_{\text{SIG}} = \omega_{\text{SFG}}, \quad (4)$$

$$\omega_{\text{SFG}} - \omega_{\text{CTRL}} = \omega_{\text{SIG}}, \quad (5)$$

在准相位匹配级联二阶非线性过程中,相位失配 ΔK 为

$$\Delta K = K_{\text{SFG}} - K_{\text{SIG}} - K_{\text{CTRL}} - \frac{2\pi}{\Lambda_{\text{SFG}}}, \quad (6)$$

其中 Λ_{SFG} 为周期极化铌酸锂晶体光栅结构的周期, $K_{\text{CTRL}} = \frac{2\pi n_{\text{CTRL}}}{\lambda_{\text{CTRL}}}$, $K_{\text{SIG}} = \frac{2\pi n_{\text{SIG}}}{\lambda_{\text{SIG}}}$, $K_{\text{SFG}} = \frac{2\pi n_{\text{SFG}}}{\lambda_{\text{SFG}}}$ 分别为控制光,信号光与和频光的模传播常量。当 $\Delta K = 0$ 时,和频与差频级联二阶非线性过程的转换效率最高。

在小信号近似下,忽略控制光、信号光与和频光的传播损耗 $\alpha_i = 0$,控制光强度远远大于信号光强度 $|E_{\text{CTRL}}| \gg |E_{\text{SIG}}|$ ($z = 0$),并且和频光初始强度为零 $E_{\text{SFG}}(0) = 0$,因此,控制光的损耗可忽略, $|E_{\text{CTRL}}(z)| \approx |E_{\text{CTRL}}(0)|$ 。

在准相位匹配和小信号近似条件下,求解方程(1)~(3)可得到信号光振幅、和频光功率以及差频

所得信号光功率的表达式分别为

$$E_{\text{SIG}}(z) = E_{\text{SIG}}(0) \cos(\Gamma z), \quad (7)$$

$$P_{\text{SFG}}(L) = \frac{\lambda_{\text{SIG}}}{\lambda_{\text{SFG}}} P_{\text{SIG}}(0) \sin^2 \left(\frac{\lambda_{\text{SFG}}}{\lambda_{\text{SIG}}} \eta_{\text{SFG}} P_{\text{CTRL}} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

$$P_{\text{SIG}}(L) = P_{\text{SIG}}(0) \cos^2 \left(\frac{\lambda_{\text{SFG}}}{\lambda_{\text{SIG}}} \eta_{\text{SFG}} P_{\text{CTRL}} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

其中

$$\Gamma^2 = \frac{(2\pi d_{\text{eff}})^2}{n_{\text{SIG}} n_{\text{SFG}} \lambda_{\text{SIG}} \lambda_{\text{SFG}}} |E_{\text{CTRL}}|^2, \quad (10)$$

$$\eta_{\text{SFG}} = \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 L^2}{c \epsilon_0 n_{\text{CTRL}} n_{\text{SIG}} n_{\text{SFG}} \lambda_{\text{SFG}}^2 A_{\text{eff}}}, \quad (11)$$

P_i 为各光波的功率, L 为周期极化铌酸锂晶体光栅的长度, A_{eff} 为有效光束面积, η_{SFG} 是和频与差频过程中的转换效率。由(8)式和(9)式可以看出,在级联二阶非线性光开关过程中,当作用长度 L 一定时,控制光功率直接影响信号光与和频光间的能量转

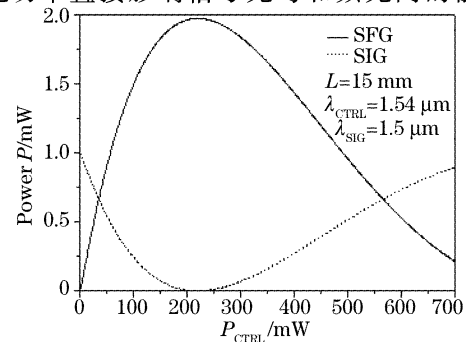


Fig. 1 Power oscillates between the signal and SFG waves as a function of control power

换,如图 1 所示。由(8)式~(11)式可知,控制光功率和转换效率决定着开关的特性,为得到低的开关功率必须努力提高转换效率,而 d_{eff} 、 L 和 A_{eff} 是决定着转换效率大小的三个重要参量。所制备的器件要具有大的非线性系数、足够长的光栅结构和尽量小的有效光束面积,这些要求成为指导全光开关实验设计的重要依据。由于 LiNbO_3 晶体具有大的有效非线性系数,且周期极化工艺技术较成熟,所以我们选用了 LiNbO_3 晶体来研制级联非线性全光开关。

3 实验研究

3.1 周期极化铌酸锂晶体光栅的研制

周期极化 LiNbO_3 周期结构设计制作的核心问

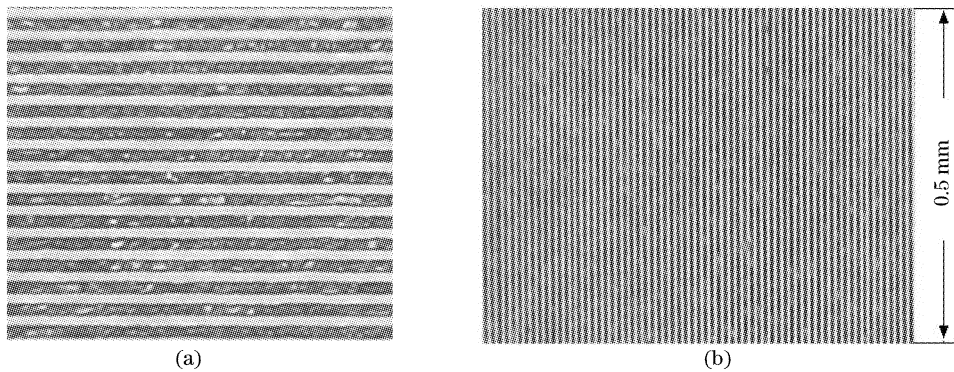


Fig. 2 (a) $+z$ top view of the PPLN with a period of $14.8 \mu\text{m}$, (b) cross-sectional structure of PPLN along x

3.2 退火质子交换光波导的制备

因为波导限制相比于体介质可使单程的混频效率提高 1000 倍,所以,在周期极化铌酸锂晶体上制作波导是十分关键的技术。质子交换光波导可增大输入周期极化铌酸锂晶体晶体的光功率密度,提高光的混频效率,但其折射率分布不稳定,波导损耗大,须对

题是精确确定极化反转光栅的周期。根据控制光、信号光级联二阶非线性准相位匹配条件的(6)式可得到所需周期极化铌酸锂晶体光栅的周期。其制备工艺过程是在 z 切本征 LiNbO_3 晶体($22 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$)的 $+z$ 面上涂甩一层厚约 $5 \mu\text{m}$ 的高阻挡光刻胶,用半导体光刻工艺刻蚀出所需周期的栅格结构,然后再在光刻胶外溅射一层厚 100 nm 的金属 Al 掩膜, $\pm z$ 面用 NaCl 液体电极与高压电源相接,文献[10,11]给出了周期极化铌酸锂晶体制备的详细工艺过程,图 2(a)所示为所制备的周期是 $14.8 \mu\text{m}$ 的 LiNbO_3 晶体 $+z$ 面周期极化铌酸锂晶体结构,图 2(b)所示为 x 向横截面结构,从图 2 可以看出所制备的周期极化铌酸锂晶体的占空比约为 50%。

质子交换光波导作进一步改善。退火处理可以灵活地调节波导的折射率轮廓及折射率增量、可改善波导的耦合效率、有效地降低光波导的插入损耗^[14~17]。因此,我们在周期极化铌酸锂晶体上制作了退火质子交换光波导。具体的制作流程如图 3 所示,退火质子交换光波导制作参量如表 1 所示。

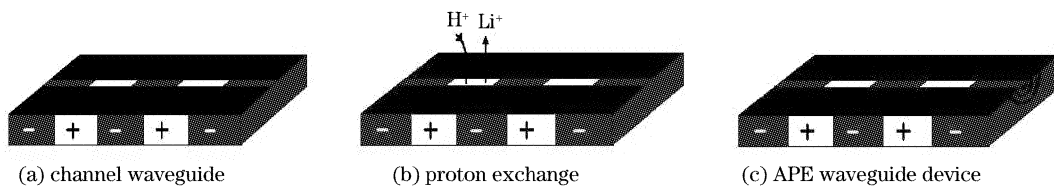


Fig. 3 The process of fabrication of APE

Table 1 The parameters of fabrication of APE

Parameter	Value
Proton-exchange acid	Pyrophosphoric acid
Waveguide width / μm	7
Exchange temperature / $^{\circ}\text{C}$	230
Exchange time / min	30
Anneal time / h	2.5
Anneal temperature / $^{\circ}\text{C}$	300

3.3 全光开关实验

利用制备的退火质子交换波导器件,我们构建了如图 4 所示的实验装置,利用偏振干涉仪来实现全光开关。

用和频与差频级联二阶非线性效应实现全光开关的过程中,信号光与控制光先发生和频,信号光在该过程中衰减,接着控制光与和频光发生差频,信号光得以重生。如此,没有控制光时,信号光不能通过

分析偏振器,开关处于“关”状态,而当控制光功率足够大时,信号光在差频过程中强度恢复初始值,获得 π 的相位变化,可以完全通过分析偏振器,开关处于

“开”状态,开关效率为100%。图中二向色镜的作用是将控制光从光路中除去,波片则补偿信号光两分量通过退火质子交换波导时获得的相位差 $\Delta\Phi_B$ 。

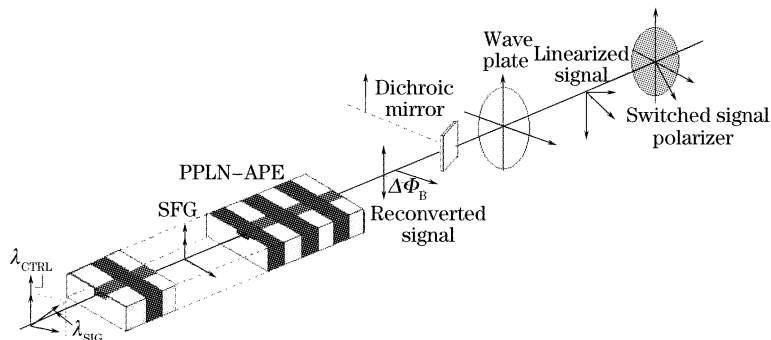


Fig. 4 Schematic of all-optical switching

在第一阶段的实验中,我们用自行研制的工作于通信波段的波长为 $1.54\ \mu\text{m}$ 的被动调Q掺钕铝酸镁激光器作为控制光源,脉宽 $7.8\ \text{ns}$,重复频率 $800\ \text{Hz}$,沿竖直方向偏振,用工作于通信波段的波长为 $1.5\ \mu\text{m}$ 的连续二极管激光器作为信号光源,偏振方向与竖直方向成 45° 角,通过光纤耦合器将控制光和信号光耦合射入光栅周期为 $15.2\ \mu\text{m}$ 的退火质子交换波导,在退火质子交换波导输出端测量控制光和信号光的输出功率。当控制光峰值功率大于 $2.5\ \text{kW}$ 时,开始观察到信号光的开关现象,当控制光峰值功率为 $3\ \text{kW}$,信号光强度为 $1\ \text{mW}$ 时,实现13%的开关效率。

实验得到的开关效率比较低,我们认为原因在于实验中光的损耗比较大。光的损耗一方面是级联非线性过程引起的,体现在和频与差频过程中的转换效率不够高,为此,我们应该进一步完善周期极化铌酸锂晶体的制作工艺,提高微结构的均匀程度,使光栅的周期宽度一致,反转畴与晶体的正负畴面垂直且贯穿整个晶体厚度;采用高折射率的波导覆盖层和制作掩埋波导,改善波导中的模式交叠;另外,由于转换效率与光栅长度的平方成正比,因此制备并采用光栅结构长的周期极化铌酸锂晶体,将提高光开关的开关效率。光的损耗另一方面是光的耦合损耗以及在传播过程中的损耗,这些都降低开关效率,也是我们接下去要提高与改进的重点。

结论 本文对准相位匹配和频与差频级联二阶非线性铌酸锂全光开关过程进行了理论分析,在此分析的指导下开展了退火质子交换器件的实验研制,并用此器件进行了全光开关实验,当控制光峰值功率为 $3\ \text{kW}$ 、信号光功率为 $1\ \text{mW}$ 时实现了13%的开关

效率。分析了提高开关效率的途径。

参 考 文 献

- 1 Stegeman G I, Wright E M, Einlayson N *et al.*. Third order nonlinear integrated optics. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(6): 953~968
- 2 Jin Guoliang, Cao Junfeng, Cao Zhuangqi *et al.*. Optimizing design of all-optical switches. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(9): 1332~1336 (in Chinese)
- 3 Zhang Zebin, Ni Liumei, Shen Qishun. Experimental study on nonlinear organic polymer all-optical switches. *J. Shanghai Jiaotong University* (上海交通大学学报), 1997, **31**(10): 33~35 (in Chinese)
- 4 Ma Shaojie, Zheng Jie, Wang Shumei. All-optical switching rating coupling to semiconductor doped glass waveguides. *Chin. J. Luminescence* (发光学报), 1997, **18**(1): 75~77 (in Chinese)
- 5 Kanbara H, Itoh H, Sobe M *et al.*. All-optical switching based on cascading of second-order nonlinearities in a periodically poled Titanium-diffused lithium Niobate waveguide. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(3): 328~330
- 6 Parameswaran K R, Fujimura M, Chou M H *et al.*. Low-power all-optical gate based on sum frequency mixing in APE waveguides in PPLN. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(6): 654~656
- 7 Chandra P S, Sukhdev R. All-optical switching in bacteriorhodopsin based on M state dynamics and its application to photonic logic gates. *Opt. Commun.*, 2003, **218**(1): 55~66
- 8 Yamada M, Nada N, Saiton M *et al.*. First-order quasi-phase matched LiNbO₃ waveguide periodically poled by applying an external field for efficient blue second-harmonic generation. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(5): 435~436
- 9 Chen Yunlin, Xu Jingjun, Song Feng *et al.*. Study on technology of periodic poling bulk LiNbO₃ by applying external field. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001,

- 21(5): 618~620 (in Chinese)
- 10 Chen Yunlin, Ni Wenjun, Zhao Yuqiang *et al.*. Ferroelectric-domain-inverted grating in LiNbO₃ fabricated by electric-field poling. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(10): 889~892 (in Chinese)
- 11 Chen Yunlin, Xu Jingjun, Chen Xiaojun *et al.*. Domain reversion process in near-stoichiometric LiNbO₃ crystals. *Opt. Commun.*, 2001, **188**(3): 359~364
- 12 Schie K R, Baek Y, Krijnen G *et al.*. All-optical switching in lithium niobate directional couplers with cascaded nonlinearity. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(13): 940~942
- 13 Podoshvedov S A. Energy conversion and all-optical switching in crystal with periodical modulation of susceptibility. *Opt. Commun.*, 2002, **189**(3): 365~375
- 14 Yokohama I, Asobe M, Yokoo A *et al.*. All-optical swithing by use of cascading of phase matched sun-frequency generation and difference-frequency generation processes. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1997, **14**(12): 3368~3377
- 15 Suchoski P G, Findakly T K, Leonberger F J. Stable low-loss proton exchanged LiNbO₃ waveguide devices with no electro-optic degradation. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(11): 1050~1052
- 16 Cao X F, Ramaswamy R V, Ramakant R *et al.*. Characterization of annealed proton exchanged LiNbO₃ waveguides for nonlinear frequency conversion. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(9): 1302~1315
- 17 Chen Yunlin, Zhang Huimin, Li Shichen. Proton-exchanged optical waveguides in π cut LiNbO₃ using different acid. *Optoelectronics Laser* (光电子·激光), 1997, **8**(5): 337~339 (in Chinese)
- 18 Chen Yunlin, Ni Wenjun, Zhao Yuqiang *et al.*. Growth mechanism of proton-exchanged waveguides. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(9): 1261~1264 (in Chinese)



第20届国际光学委员会大会

20th Congress of the International Commission for Optics

2005年8月21日~26日, 中国·长春

名誉主席: 王大珩

大会主席: 母国光

国际顾问委员会主席: Arthur H. Guenther

国际程序委员会主席: 金国藩

国际组织委员会主席: 曹健林

继意大利佛罗伦萨成功召开第19届国际光学委员会大会之后,第20届大会将在中国著名的光学中心长春召开。此届大会将涉及光学领域中最新的科技发展,包括21世纪光学发展的各个领域。届时将有来自40多个国家和地区的物理学家的科学家、工程师和光学企业家共聚长春。大会的目标在于给光学界的专家学者们提供一个特别的论坛,还包括一些相关的公司展览。您将有机会在这里见到光学界最前沿的专家和工程师。

论文要求

会议语言及论文请用英文。作者需通过电子邮件提交150字论文摘要和2页论文文稿(电子版)。

会议接受所有相关领域论文。论文应包括摘要、引言、正文、结论、参考文献等。须提供作者姓名、单位和地址。文章格式请网站查阅。

录用文章将被刊登在SPIE论文集中,程序册将于2005年4月中旬发布在会议网页上,请注意浏览。

摘要及论文截稿日期: 2005年1月15日

录用通知: 2005年4月中旬

提前注册截止日期: 2005年7月1日

会议注册费: 代表1600元,学生800元,中国光学学会会员1400元(以中国光学学会会员证为准)。2005年7月1日之前优惠200元

会议网址: <http://www.ico20.org/>