

角度不敏感 Solc 型电光滤波器设计

郑国梁^{1,2} 徐世祥^{1,2} 欧阳征标^{1,2} 贺 威^{1,2}

(¹ 深圳大学电子科学与技术学院, 深圳 518060
² 深圳市微纳光子信息技术重点实验室, 深圳 518060)

摘要 利用二维环形周期极化铌酸锂, 提出一种角度不敏感的 Solc 型电光滤波器。发现二维环形周期极化铌酸锂能够克服角度依赖问题, 它能为不同方向入射的光提供不变的倒格矢以维持准相位匹配。计算表明, 利用二维环形周期极化铌酸锂制作而成的 Solc 型电光滤波器, 其中心透过波长在偏离正入射情况下仍然保持不变。这种新型的角度不敏感 Solc 型滤波器可在多角度、多光束同时滤波。

关键词 非线性光学; Solc 型滤波器; 电光效应; 二维环形周期极化

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s119002

Design of Angular-Independent Solc-Type Electro-Optical Filter

Zheng Guoliang^{1,2} Xu Shixiang^{1,2} Ouyang Zhengbiao^{1,2} He Wei^{1,2}

(¹ College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China
² Shenzhen Key Laboratory of Micro-Nano Photonic Information Technology,
Shenzhen 518060, China)

Abstract An angular-independent Solc-type electro-optical filter based on two-dimensional (2D) angularly periodically poled LiNbO₃ is presented. We find that the 2D angularly poled LiNbO₃ can provide invariable radial reciprocal vectors which can be used in designing angular-independent Solc-type electro-optical filter. The study demonstrates that the Solc-type filter based on 2D angularly poled LiNbO₃ can keep its central passing wavelength unchanged even though the incident light deviate from the normal incidence. The angular-independent Solc-type electro-optical filter can find its application in multi-angle, multi-beam filtering.

Key words nonlinear optics; Solc-type filter; electro-optic effect; two-dimensional angularly periodically poled

OCIS codes 190.4360; 230.2090; 070.6110

1 引 言

光滤波器是一种重要的光学器件, 它可以从众多波长的光波中选择所需波长的光波, 而拒绝其他波长的光通过, 在光放大器的噪声滤除、增益均衡、光复用/解复用有重要应用^[1-3]。另一方面, 周期性极化 LiNbO₃ (PPLN) 由于拥有出色的非线性光学性质而引起人们的广泛关注^[4-6]。特别是在电光应用上, PPLN 更是得到研究者的厚爱^[5-10]。2000

年, Lu 等^[5]研究了 PPLN 电光耦合与入射波长的关系, 理论上预知了 PPLN 作为窄带滤波器的可能。此后, Shi 等^[7-10]在实验上实现了 PPLN 的 Solc 型滤波器, 并通过温控和紫外光照射等方法对滤波器中心透过波长进行调节。在以前工作中, 选择了适当的极化结构, 实现电场控制中心透过波长, 实现高速调谐^[11]。相比传统的 Solc 型滤波器^[12], 这种 PPLN 的电光 Solc 型滤波器可以在一块晶片上实

收稿日期: 2013-12-01; **收到修改稿日期**: 2014-02-15

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20114408120004)、广东高校优秀青年创新人才培养计划(LYM11114)、深圳市技术研究开发计划(JCYJ20120614085204873)、深圳市微纳光子信息技术重点实验室开放基金(MN201115)

作者简介: 郑国梁(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学超晶格电光效应及其应用方面的研究。

E-mail: zhgl@szu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

现,而且滤波器的输出光强可以通过外加电场来调节,这样就把滤波器和调制器集成在一块晶片上^[9]。然而,有关 Solc 型滤波器的角度效应目前尚未有报道。由于在不同入射角度下,有效极化周期与 e 光的折射率都发生变化,其准相位匹配条件将发生改变,从而引起滤波器中心波长的漂移。本文研究了基于 PPLN 的 Solc 型电光滤波器中心透过波长对入射角度的依赖关系,得到中心透过波长与入射角度的关系,提出了一种可角度调谐的 Solc 型电光滤波器。

2 基于环形周期极化的角度不敏感 Solc 型电光滤波器

图 1 所示是基于 PPLN 的 Solc 型电光滤波器。它由一个长 2.5 cm 的 z 切 PPLN 和两个正交偏振器组成,其中外电场沿着 PPLN 的 y 轴方向,光沿着 PPLN 的 x 轴传播,前面一个偏振器的透光方向平行于 z 轴以保证入射光是 e 光,第二个偏振器的透光方向平行于 y 轴,也就是说调制器的输出光是 o 光。

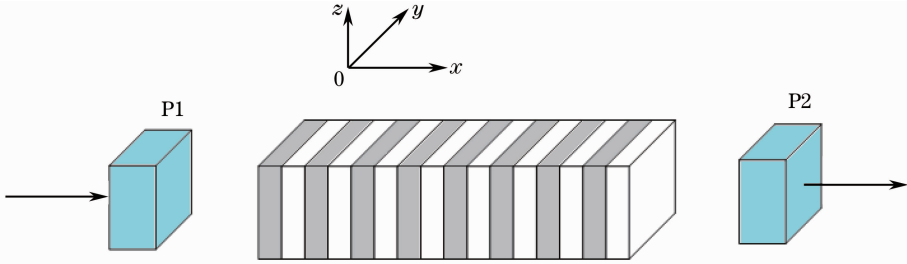


图 1 基于 PPLN 的 Solc 型电光滤波器

Fig. 1 Scheme of Solc-type electro-optical filter based on PPLN

为方便研究 Solc 型滤波器的透射谱特性,采用准相位匹配电光效应的耦合方程研究滤波器中 o 光与 e 光的耦合关系^[13]:

$$\frac{dA_1(r)}{dr} \approx -i\kappa_q A_2(r) \exp(i\Delta kr) - iv_{1q} A_1(r), \quad (1)$$

$$\frac{dA_2(r)}{dr} \approx -i\kappa_q^* A_1(r) \exp(-i\Delta kr) - iv_{2q} A_2(r), \quad (2)$$

式中

$$\begin{cases} \Delta k = k_2 - k_1 + \alpha_m, & \alpha_m = \frac{2m\pi}{\Lambda}, \\ \kappa_q = \frac{k_0}{2\sqrt{n_1 n_2}} r_{\text{eff}1} E_0 G_m, & \kappa_q^* = \frac{k_0}{2\sqrt{n_1 n_2}} r_{\text{eff}1} E_0 G_{-m}, \\ v_{1q} = \frac{k_0}{2n_1} r_{\text{eff}2} E_0 G_0, & v_{2q} = \frac{k_0}{2n_2} r_{\text{eff}3} E_0 G_0, \\ G_m = \frac{1}{i\pi m} [1 - \cos(2\pi m D) + i \sin(2\pi m D)], & (m \neq 0), \\ G_0 = 2D - 1, \end{cases} \quad (3)$$

式中 $A_1(r)$ 和 $A_2(r)$ 是两个光场分量的约化振幅, n_1, n_2 和 k_1, k_2 是相应的折射率和波数, k_0 光在真空中的波数, α_m 是第 m 阶倒格矢, Λ 是极化周期, D 是占空比, 定义为 $D = l/\Lambda$, 而 l 是每个极化周期中的正畴长度, E_0 是外加电场的强度, $r_{\text{eff}i}$ ($i = 1, 2, 3$) 是有效电光系数^[14]。常用的滤波器的铌酸锂极化周期占空比为 $D = 0.5$, 又 $G_0 = 0.5$, 从而 $v_{1q} = v_{2q} = 0$ 。假设一束 e 光沿着 PPLN 的 x 轴传播, 且初始值是

$A_1(0) = 0, A_2(0) = 1$, 如果出射光是 o 光, 那出射光光强可以表示为

$$I_o = \frac{|\kappa_q|^2}{\mu^2} \sin^2(\mu L), \quad (4)$$

式中 $\mu = \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta k)^2 + 4\kappa_q \kappa_q^*}$, L 是有效的晶体长度。从(1)、(2)式可以看到, 最大出射光光强发生在下式成立的时候:

$$\Delta k = 0, \quad (5)$$

$$\sin(|\kappa|L) = 1. \quad (6)$$

式中 $\Delta k = 0$ 为电光效应的准相位匹配条件。而准相位匹配条件(3)对波长非常敏感, 波长的微小变化都可以使得输出光光强急剧下降^[13], 这就是它可以用作滤波器的原因。在温度为 298 K (25 °C) 的条件下, 对于波长为 $\lambda_0 = 1550$ nm 的光波, 利用色散公式^[15], 可以求得铌酸锂的 o 光与 e 光主折射率为 $n_o = 2.21283, n_e = 2.13732$ 。由(5)式可知, 若 PPLN 的一阶倒格矢为 $\alpha_1 = 2\pi(n_o - n_e)/\lambda_0$, 则波长为 λ_0 的光沿着 x 轴传播时, PPLN 的一阶倒格矢能够补偿 o 光与 e 光的相位失配, 从而使得电光效应的准相位匹配条件得到满足。这时, 相应的极化周期为 $\Lambda = 2\pi/(k_1 - k_2) = \lambda/n_o - n_e = 20.527 \mu\text{m}$ 。为了使滤波器有最大的输出光强, 需满足条件 $\sin(|\kappa|L) = 1$, 计算可得最大输出光强时的外加电场为 $E_0 = 0.169$ kV/mm。

当入射光偏离 x 轴传播时,有效极化周期将会变成 $\Lambda' = \Lambda / \cos \delta$,因此其中心透过波长也会改变。由准相位匹配条件可知相位匹配时的 m 阶倒格矢为 $\alpha_m = k_1 - k_2$,其相应的极化周期为

$$\Lambda = \frac{m\lambda}{n_o - n_e}. \quad (7)$$

值得注意的是,由于光学超晶格在极化方向(z 方向)上很薄(0.5 mm 左右),入射光被限制在 x - y 平面,所以当入射光偏离 x 轴, o 光与 e 光的折射率保持不变。因此,要保持各个方向的准相位匹配条件都满足,极化周期必须保持不变,如图 2 所示。而具有这种倒格矢分布特点极化方案为环形周期极化。图 3 是利用环形周期极化铌酸锂制作而成的 Solc 型电光滤波器。

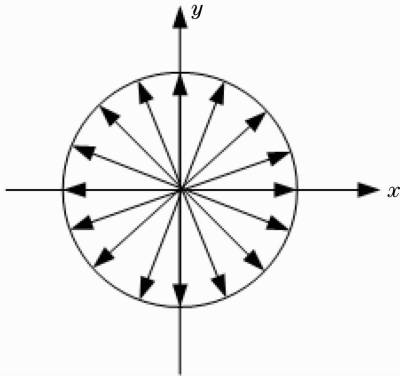


图 2 不同方向入射所需的倒格矢的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of reciprocal vector incident from different directions

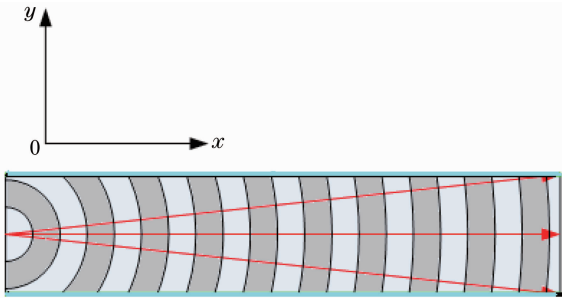


图 3 角度不敏感的 Solc 型电光滤波器(俯视)
Fig. 3 Scheme of athermal Solc-type electro-optical filter (top view)

只要入射光在 x - y 平面传播且经过极化中心,光通过的有效极化周期长度不发生改变,因而在发生离轴入射时,透射谱中心波长不会发生漂移。在这种设计中,根据公式 $\lambda_0 = (n_o - n_e)\Lambda$ 可知,在晶体工作温度不变的情况下,入射光对应的双折射大小并不改变,而有效极化周期长度也没有发生改变,因此,准相位匹配条件将保持,相应的中心透过波长也

将保持不变。图 4 为使用角度不敏感的 Solc 型滤波器的透射谱,从图中可以看到,当入射光偏离正入射时,透射率曲线依然不变,中心波长不发生偏移。必须指出的是,这个方案是假设入射处为一个点,如果入射处移动,光在传播过程中感受到倒格矢会发生变化,它会对滤波产生影响,因此在使用中必须保证入射点为一点。

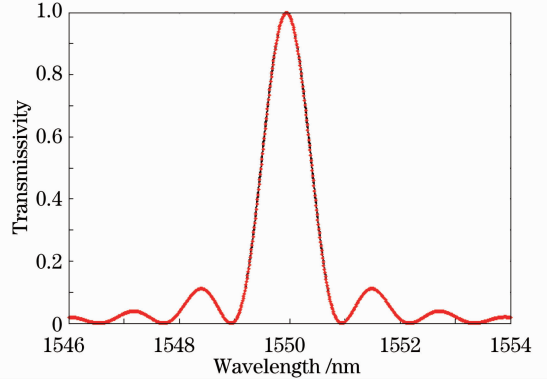


图 4 角度不敏感 Solc 型滤波器的透射谱(黑色实线为正入射情形,红色点状为斜入射情形)

Fig. 4 Transmission spectrum of athermal Solc-type filter (solid line denotes the case of normal incidence, and dotted line denotes the case of oblique incidence)

这种利用环形周期极化铌酸锂设计的角度不敏感 Solc 型电光滤波器,大大提高了滤波器的工作稳定型,降低了调谐的难度。另外,这种新型的角度不敏感 Solc 型滤波器可望在多角度、多光束同时滤波,扩展了 Solc 型电光滤波器的应用范围。随着平面印刷技术在二维超晶格设计上的应用,设计制作这种环形周期极化铌酸锂不存在任何技术问题,人们已经利用二维光学超晶格观察到许多新奇的物理现象^[16-17]。因此,提出的这种角度不敏感 Solc 型滤波器也不存在技术障碍。

3 结 论

利用二维环形周期极化铌酸锂能提供辐射状固定倒格矢的特性,设计出基于环形周期极化铌酸锂的角度不敏感 Solc 型电光滤波器。这种新型的角度不敏感 Solc 型滤波器中心透过波长在偏离正入射情况下仍然可以保持不变,另外,其还有许多潜在应用,如多角度多光束滤波等。

参 考 文 献

- 1 Liu Fei, Jin Jie, Li Kejia. Design of electro-optic tunable finite impulse response filter [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10):

1023003.
 刘 菲, 金 杰, 李可佳. 电光可调谐有限脉冲响应滤波器设计 [J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1023003.
- 2 Zhang Juan, Yu Shuai, Guo Sen, *et al.*. Design of flat-top polarization filters based on one-dimensional photonic crystal theory [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0105005.
 张 娟, 于 帅, 郭 森, 等. 基于一维光子晶体理论的平顶偏振滤波器设计 [J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0105005.
- 3 Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng, Fan Linyong, *et al.*. Comb-filter based on twin-core fiber coupler [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0505001.
 江微微, 赵瑞峰, 范林勇, 等. 基于双芯光纤耦合器的梳状滤波器 [J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0505001.
- 4 Y Q Lu, J J Zheng, Y L Lu, *et al.*. Frequency tuning of optical parametric generator in periodically poled optical superlattice LiNbO₃ by electro-optic effect [J]. Appl Phys Lett, 1999, 74(1): 123–125.
- 5 Y Q Lu, Z L Wan, Q Wang, *et al.*. Electro-optic effect of periodically poled optical superlattice LiNbO₃ and its applications [J]. Appl Phys Lett, 2000, 77(23): 3719–3721.
- 6 Y Q Lu, M Xiao, G J Salamo. Wide-bandwidth high frequency electro-optic modulator based on periodically poled LiNbO₃ [J]. Appl Phys Lett, 2001, 78(8): 1035–1037.
- 7 J H Shi, J H Wang, L J Chen, *et al.*. Tunable Solc-type filter in periodically poled LiNbO₃ by UV-light illumination [J]. Opt Express, 2006, 14(13): 6279–6284.
- 8 L J Chen, J H Shi, X F Chen, *et al.*. Photovoltaic effect in a periodically poled lithium niobate Solc-type wavelength filter [J]. Appl Phys Lett, 2006, 88(12): 121118.
- 9 X F Chen, J H Shi, Y P Chen, *et al.*. Electro-optic Solc-type wavelength filter in periodically poled lithium niobate [J]. Opt Lett, 2003, 28(21): 2115–2117.
- 10 Y M Zhu, X F Chen, J H Shi, *et al.*. Wide-range tunable wavelength filter in periodically poled lithium niobate [J]. Opt Commun, 2003, 228(1-3): 139–143.
- 11 G L Zheng, W L She. Fast and wide-range continuously tunable Solc-type filter based on periodically poled LiNbO₃ [J]. Appl Phys B, 2007, 88(4): 545–549.
- 12 A Yariv, P Yeh. Optical Waves in Crystal: Propagation and Control of Laser Radiation [M]. New York: Wiley Press, 1984. 132–143.
- 13 G L Zheng, H C Wang, W L She. Wave coupling theory of quasi-phase-matched linear electro-optic effect [J]. Opt Express, 2006, 14(12): 5535–5540.
- 14 W L She, W K Lee. Wave coupling theory of linear electrooptic effect [J]. Opt Commun, 2001, 195(1-4): 303–311.
- 15 M V Hobden, J Warner. The temperature dependence of the refractive indices of pure lithium niobate [J]. Phys Lett, 1966, 22(3): 243–244.
- 16 V Berger. Nonlinear photonic crystals [J]. Phys Rev Lett, 1998, 81(19): 4136–4139.
- 17 C D Chen, X P Hu, Y L Xu, *et al.*. Cerenkov difference frequency generation in a two-dimensional nonlinear photonic crystal [J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(7): 071113.

栏目编辑: 韩 峰