

无热致静态位相延迟、单块晶体结构的 KNbO_3 和 KTP 电光开关

卢秀权 陈绍和

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 分析表明,当光在双轴晶体中波矢沿着某些特定方向传播时,不会表现出一阶热致静态位相延迟,这个方向暂时被称为晶体的无热致静态位相延迟光传播方向(NTSPR 方向)。根据前人发表的相关数据,采用适当近似,求得 KNbO_3 的 NTSPR 方向是 $(90^\circ, 90^\circ \pm 50.19^\circ, \mp 50.19^\circ)$, KTP 的 NTSPR 方向是 $(90^\circ \pm 30.78^\circ, 90^\circ, \mp 30.78^\circ)$,并分别讨论了这两种晶体在这些方向的电光品质因数 η_e ,结果表明,利用某些双轴晶体 NTSPR 方向大的电光品质因数制成的新型、单块晶体结构电光开关,不需要温控,而且,器件本身的通光长度可以做得更短。

关键词 KNbO_3 , KTP 电光开关,热致静态位相延迟,电光品质因数 η_e

1 引 言

多数双轴铁电晶体具有较强的电光效应,作为电光开关材料,在光通信、光信息处理以及高功率激光脉冲的时间整形等方面得到了广泛应用。然而,调制器静态位相延迟的强烈温度效应使我们在使用时不得不对晶体采取严格的温控^[1];或者用两块、甚至多块晶体制成所谓热补偿结构的电光开关^[1],这样,既增加了器件的长度,又由于光在多个端面受到反射,进一步增加了器件的插入损耗。解决这些问题的核心是找到晶体的 NTSPR 方向,当光沿着该方向传播时,不会表现出一阶热致静态位相延迟。

KNbO_3 , KTP 晶体由于电光系数大、光学破坏阈值高等一些综合性能优于 LiNbO_3 和 KD^*P ,它们在电光方面应用价值已受到国内外的关注^[1~5]。本文根据前人发表的相关数据,采用适当近似,求得 KNbO_3 的 NTSPR 方向是 $(90^\circ, 90^\circ \pm 50.19^\circ, \mp 50.19^\circ)$, KTP 的 NTSPR 方向是 $(90^\circ \pm 30.78^\circ, 90^\circ, \mp 30.78^\circ)$,并分别讨论了这两种晶体在这些方向的电光品质因数 η_e 。

2 KNbO_3 , KTP 晶体的 NTSPR 传播方向

光在双轴晶体中传播时,两个相互正交的偏振模式间相对位相延迟

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda}(n_1 - n_2)L \quad (1)$$

L 为晶体的通光长度, n_1, n_2 分别为两个相互正交偏振模式的折射率, 为传播方向 (θ, φ, ψ) 的函数(这里 θ, φ, ψ 分别为光波矢与晶体主轴 x, y, z 的夹角)。

加热后, 折射率会发生变化, 而且晶体也要发生微小热膨胀, 因此热致静态位相延迟^[1]

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial T} = \frac{2\pi L}{\lambda} \left[\frac{\partial n_1}{\partial T}(\theta, \varphi, \psi) - \frac{\partial n_2}{\partial T}(\theta, \varphi, \psi) + \xi [n_1(\theta, \varphi, \psi) - n_2(\theta, \varphi, \psi)] \right] \quad (2)$$

其中, $\xi = (1/L)(dL/dT)$ 为光传播方向的热膨胀系数。按照 NTSPR 传播方向的定义, 如果晶体的确存在这样的方向, 则方程

$$\frac{\partial n_1}{\partial T}(\theta, \varphi, \psi) - \frac{\partial n_2}{\partial T}(\theta, \varphi, \psi) + \xi [n_1(\theta, \varphi, \psi) - n_2(\theta, \varphi, \psi)] = 0 \quad (3)$$

存在实数解, 而分析表明在双轴晶体中, 实数解是存在的。

2.1 KTP 的 NTSPR 方向

根据文献[3], 对于 KTP 晶体, 三个主折射率之间有 $\partial n_x/\partial T < \partial n_y/\partial T < \partial n_z/\partial T$, 且热膨胀影响相对较小, 可作为微扰项。

当光的波矢在 $x-z$ 主平面内时, 主轴 y 方向是允许的光的一个偏振方向, 折射率随温度的变化恰好为 $\partial n_y/\partial T$ 。与之正交模式的偏振方向在 $x-z$ 主平面, 由图 1(a), 当 ψ 从 0° 变到 90° , 或者由 0° 到 -90° 时, 折射率随温度的变化 $\partial n_{x-z}(90^\circ - \psi, 90^\circ, \psi)/\partial T$ 将由 $\partial n_x/\partial T$ 变到 $\partial n_z/\partial T$, 可想而知, 总会存在满足方程(3) 的这样两个 ψ (一正一负), 为此, 我们来求 ψ 的具体值。

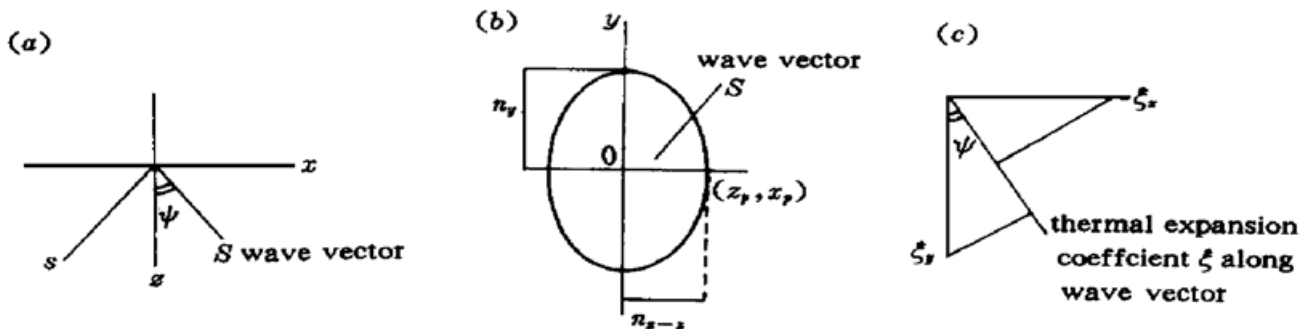


图 1 KTP 的 $x-z$ 主平面内存在两个 NTSPR 方向

(a) $x-z$ 主平面内的波矢与 z 的夹角 ψ ; (b) 折射率 n_y 和 n_{x-z} ; (c) 波矢方向的热膨胀系数 ξ

Fig. 1 There are two NTSPR directions in the $x-z$ principal plane of KTP

(a) The angle ψ between z axis and wave vector in the $x-z$ principal plane;

(b) The refractive indices n_y and n_{x-z} ; (c) The thermal expansion coefficient ξ along the wave vector direction

如图 1(b), 求折射率 $n_{x-z}(90^\circ - \psi, 90^\circ, \psi)$ 只需求原点到折射率椭球与直线

$$\begin{cases} y = 0 \\ z = \pm x \operatorname{tg}(|\psi|) \end{cases} \quad \text{“-” 对应 } \psi > 0, \text{ “+” 对应 } \psi < 0 \quad (4)$$

交点 (z_p, x_p) 的距离

$$n_{x-z}(90^\circ - \psi, 90^\circ, \psi) = \sqrt{x_p^2 + z_p^2} = \frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\psi)}}{\sqrt{\frac{1}{n_x^2} + \frac{1}{n_z^2} \operatorname{tg}^2(\psi)}} = \frac{n_x n_z}{[n_z^2 \cos^2(\psi) + n_x^2 \sin^2(\psi)]^{1/2}} \quad (5)$$

考虑到在 KTP 中, 对 $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 的光有 $n_z - n_x = 0.0918$ ^[3], 将(5) 式对 T 求导

$$\frac{\partial n_{x-z}}{\partial T} = \frac{n_{x-z}^3}{n_x^3} \frac{\partial n_x}{\partial T} \cos^2(\psi) + \frac{n_{x-z}^3}{n_z^3} \frac{\partial n_z}{\partial T} \sin^2(\psi) \approx \frac{\partial n_x}{\partial T} \cos^2(\psi) + \frac{\partial n_z}{\partial T} \sin^2(\psi) \quad (6)$$

由图 1(c) 的几何关系, 求得热膨胀系数

$$\xi = \xi_x \sin(\phi) + \xi_z \cos(\phi) \quad (7)$$

其中, ξ_x , ξ_z 分别为晶体沿主轴 x , z 方向的热膨胀系数。根据文献[3, 6] 报道的 KTP 的热膨胀系数、主折射率以及主折射率随温度变化的数据, 如果不要求非常精确的计算, 可以忽略热膨胀对方程(3) 的贡献, 这样可大大简化 ϕ 的表达式。

将(5), (6) 代入方程(3), 最后求得

$$\phi_p = \pm \arccos \left[\frac{\partial n_z / \partial T - \partial n_y / \partial T}{\partial n_z / \partial T - \partial n_x / \partial T} \right]^{1/2} \quad (8)$$

将文献[3] 的数据代入, 可得 KTP 的 NTSPR 方向

$$(90^\circ - \phi_p, 90^\circ, \phi_p) = (90^\circ \pm 30.78^\circ, 90^\circ, \mp 30.78^\circ) \quad (9)$$

2.2 KNbO₃ 的 NTSPR 方向

根据文献[5], KNbO₃ 的主折射率间有 $\partial n_y / \partial T < \partial n_x / \partial T < \partial n_z / \partial T$, 而且 $\partial n_y / \partial T < 0$, 可以想象, 在 y - z 主平面内有晶体的 NTSPR 方向。虽然还没有找到有关 KNbO₃ 热膨胀效应的报道, 但我们仍然假定它仅是一种微扰, 采用和 2.1 同样的近似处理, 得到 NTSPR 方向与主轴 z 的夹角

$$\phi_N = \pm \arccos \left[\frac{\partial n_z / \partial T - \partial n_x / \partial T}{\partial n_z / \partial T - \partial n_y / \partial T} \right]^{1/2} = \pm 50.19^\circ \quad (10)$$

3 KNbO₃, KTP 晶体 NTSPR 方向的电光品质因数

3.1 KNbO₃ 晶体

假定 KNbO₃ 晶体沿 $(90^\circ, 90^\circ - \phi, \phi)$ 方向切割, 如图 2 所示, 并采用所谓的横向电光效应制成电光开关, 设作用在晶体上的电场大小为 E , 折射率椭球方程变成

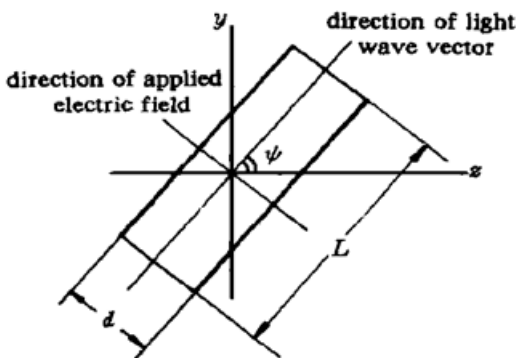


图 2 沿 $(90^\circ, 90^\circ - \phi, \phi)$ 方向切割的 KNbO₃ 晶体

Fig. 2 KNbO₃ crystal cuted along direction $(90^\circ, 90^\circ - \phi, \phi)$

$$\left[\frac{1}{n_x^2} + \gamma_{13} E_3 \right] x^2 + \left[\frac{1}{n_y^2} + \gamma_{23} E_3 \right] y^2 + \left[\frac{1}{n_z^2} + \gamma_{33} E_3 \right] z^2 + 2yz \gamma_{42} E_2 = 1 \quad (11)$$

其中, $E_2 = \pm E \cos |\phi|$, $E_3 = E \sin |\phi|$, “-” 对应 $\phi > 0$, “+” 对应 $\phi < 0$ 。

加电场后, 晶体主轴绕 x 转过一个小角度, 当光沿着 NTSPR 方向传播时, x 仍是允许的一个偏振方向, 求该方向的折射率, 只要求直线

$$\begin{cases} y = 0 \\ z = 0 \end{cases} \quad (12)$$

与(11) 的交点到原点的距离

$$n_x'' = n_x - \frac{n_x^3}{2} \gamma_{13} E \sin(|\phi|) \quad (13)$$

与之正交的模式沿直线

$$\begin{cases} x = 0 \\ z = \pm y \operatorname{tg}(|\phi|) \end{cases} \quad \text{“-” 对应 } \phi > 0, \text{ “+” 对应 } \phi < 0 \quad (14)$$

偏振, 求该方向的折射率, 同样只要求(14)和(11)的交点到原点的距离

$$n_{y-z}'' = n_{y-z} - \frac{n_{y-z}^3}{2} [\gamma_{23}E \sin(|\phi|) \cos^2(|\phi|) + \gamma_{33}E \sin^3(|\phi|) + 2\gamma_{42}E \sin(|\phi|) \cos^2(|\phi|)] \quad (15)$$

其中

$$n_{y-z} = \frac{n_y n_z}{[n_z^2 \cos^2(\phi) + n_y^2 \sin^2(\phi)]^{1/2}}$$

由(13)和(15)式得电场导致的双折射

$$n_{y-z}'' - n_x'' = \frac{1}{2} \{ n_x^3 \sin(|\phi|) \gamma_{13} - n_{y-z}^3 [\gamma_{23} \sin(|\phi|) \cos^2(|\phi|) + \gamma_{33} \sin^3(|\phi|) + 2\gamma_{42} \sin(|\phi|) \cos^2(|\phi|)] \} E = \frac{1}{2} \eta_{eV} E \quad (16)$$

η_{eV} 称为电光品质因数(其中电光系数的值由文献[7]提供), 图3(a)作出了随角度 ϕ 的变化, 在 $\phi = \phi_N$ 处, $\eta_{eV} = 2521.6 \text{ pm/V}$, 而在 y 方向的电光品质因数(对应图中 $\phi = 90^\circ$) 仅为 303.2 pm/V 。假设电光开关的口径为 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, 半波电压定为 1.16 kV , 如果沿 y 方向切割, 晶体的通光长度为 24 mm ; 但是如果沿 NTSPR 方向切割, 晶体的通光长度只需 3 mm , 而且此时不需要对晶体温控或者器件采用双晶体热补偿结构。

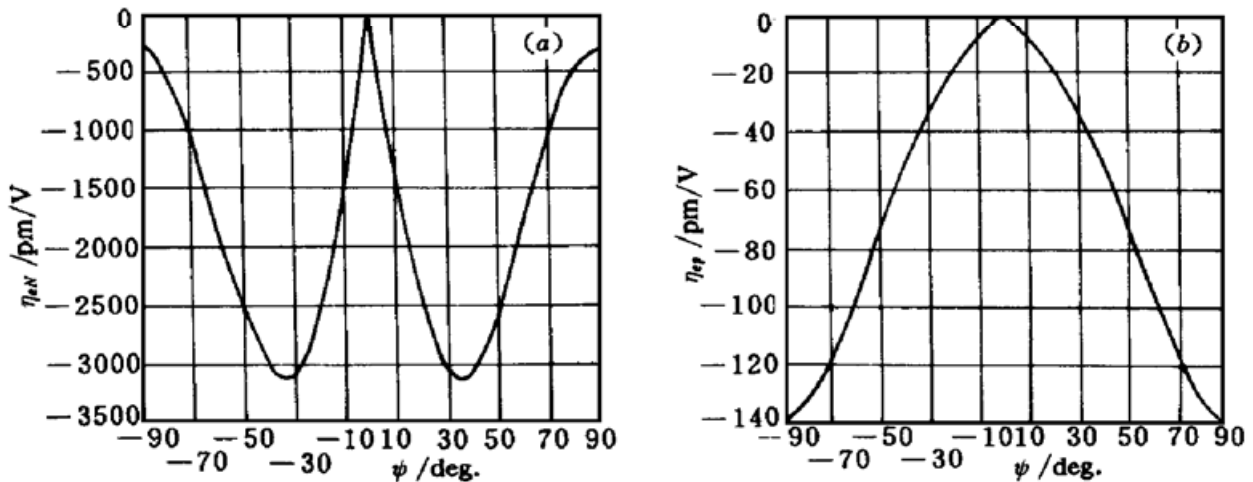


图3 (a) KNbO₃ 的电光品质因数 η_{eV} 随 ϕ 的变化; (b) KTP 的电光品质因素 η_{eV} 随 ϕ 的变化

Fig. 3 (a) The electro-optic figure of merit η_{eV} of KNbO₃ changes as a function of ϕ ;

(b) The electro-optic figure of merit η_{eV} of KTP changes as a function of ϕ

3.2 KTP 晶体

采用与 3.1 节相同的方法, 可求得 KTP 电光品质因数与传播方向 ($90^\circ - \phi, 90^\circ, \phi$) 的关系

$$\eta_{eV} = n_y^3 \sin(|\phi|) \gamma_{23} - n_{x-z}^3 [\gamma_{13} \sin(|\phi|) \cos^2(|\phi|) + \gamma_{33} \sin^3(|\phi|) + 2\gamma_{51} \sin(|\phi|) \cos^2(|\phi|)] \quad (17)$$

曲线 $\eta_{eV} - \phi$ 示于图3(b), 在 $\phi = \phi_p$ 处, $\eta_{eV} = 33.5 \text{ pm/V}$, 根据文献[3, 4], 可算得在 y 方向的电光品质因数是 175.2 pm/V 。假设电光开关的口径为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 半波电压定为 1.16 kV , 沿 y 方向切割时, 晶体的通光长度为 20 mm ; 沿 NTSPR 方向切割时, 晶体的通光长度为 109 mm 。相比之下, 对于 KTP 电光开关, 我们还有必要采取双晶体热补偿结构^[1]。

4 结 论

本文结果说明,利用某些双轴晶体 NTSPR 方向大的电光品质因数制成的新型、单块晶体结构电光开关,不需要温控。而且,器件本身的通光长度可以做得更短。至于精确测定双轴晶体 NTSPR 方向及其电光品质因数的实验装置,我们正在考虑当中。本文分析结果的另一个重要意义是利用双轴晶体的 NTSPR 方向,可以制成不受温度影响的波片、径向双折射透镜光束空间整形器^[8],以用于现代的高功率激光系统。

参 考 文 献

- 1 Lu Xiuquan, Chen Shaohe. KTP Electro-optic switch. *Chinese J. Lasers*, 1999, **26**(4): 321~ 324
- 2 J. D. Bierlein, C. B. Arweiler. Electro-optic and dielectric properties of KTiOPO_4 . *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(15): 917~ 919
- 3 John D. Bierlein, Herman Vanherzeele. Potassium titanyl phosphate: properties and new applications. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**(4): 622
- 4 Lu Xiuquan, Chen Shaohe, Shen Dezhong. KNbO_3 Electro-optic deflector. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(6): 519~ 522 (in Chinese)
- 5 Beat Zysset, Ivan Biaggio, Peter Gunter. Refractive indices of orthorhombic KNbO_4 . I. Dispersion and temperature dependence. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, **9**(3): 380~ 386
- 6 Hong Lial, Hongyuan Sheng *et al.*. Accurate values for the index of refraction and the optimum phase match parameters in a flux grown KTiOPO_4 crystal. *Opt. Laser Technol.*, 1988, **20**: 103~ 104
- 7 Amon Yariv, Pochi Yeh. *Optical Waves in Crystals*. Copyright© by John Wiley & Sons. Inc. 1984
- 8 B. Lü, Y. Ye, Z. Sui *et al.*. Analysis of a radially varying transmission system used for spatial beam shaping. *Optik*, 1996, **101**(3): 97~ 100

Single-crystal KNbO_3 , KTP Electro-optic Switches without Thermal-induced Static Phase Retardation

Lu Xiuquan Chen Shaohe

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract A careful analysis demonstrated that when optical beams propagated with the wave vector parallel to the some orientations in biaxial crystals, they would not exhibit the first-order thermal-induced static phase retardation. These orientations were now called NTSPR directions of the crystals. In this paper, taking some approximations, we theoretically founded the NTSPR directions in KNbO_3 and KTP crystals, with the help of the relative data from the literature. Also, the EO figure of merits at these NTSPR directions in KNbO_3 , KTP crystals is discussed. The calculations implied that with the large EO figure of merits at these NTSPR directions in some biaxial crystals, the novel single-crystal EO switches would have short propagation length and need not to be temperature-controlled compared to EO switches of traditional structure.

Key words KNbO_3 , KTP electro-optic switch, thermal-induced static phase retardation, electro-optic figure of merits