

# 新型 KTP 电光偏转器的设计和分析\*

谢兴龙 陈绍和 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 设计了新型 KTP 电光偏转器, 当通光口径  $D = 4 \text{ mm}$ 、长度  $L = 40 \text{ mm}$  时, 其时间分辨率为  $180 \text{ ps}$ , 从而可获得最窄宽度为  $400 \text{ ps}$  的整形激光脉冲, 而相同结构的  $\text{LiNbO}_3$  电光偏转器最窄只可获得宽度为  $830 \text{ ps}$  的整形激光脉冲, 分析了电光偏转器设计中影响其性能指标的因素, 指出利用恒温炉装置可消除激光脉冲在传播过程中的波面畸变。

**关键词** KTP 电光偏转器, 品质因子, 温度补偿, 时间分辨率。

## 1 引 言

电光偏转器是激光脉冲整形系统中不可缺少的部件, 其性能的好坏直接影响着整形系统的复原效果。目前, 神光 II 采用四电极  $\text{LiNbO}_3$  电光偏转器作为整形的核心部件, 获得了几百个皮秒到 2 个纳秒宽的整形激光脉冲, 考虑到新型 KTP 材料与  $\text{LiNbO}_3$  相比具有如下优点 (见表 1)<sup>[1, 2]</sup>: 1) 光学破坏阈值比  $\text{LiNbO}_3$  高 2~3 个数量级, 所以可以获得功率较大的整形激光脉冲; 2) 微波介电常数小, 从而受外场的影响较小, 并且具有较快的响应时间; 3) 压电系数小, 从而受外界应力的影响较小; 4) 一阶线性电光系数  $\gamma_{33}$  大于  $\text{LiNbO}_3$  的  $\gamma_{33}$ , 从而具有较大的电光效应; 5) KTP 的半波电压与同样尺寸的  $\text{LiNbO}_3$  差不多, 但动态范围比  $\text{LiNbO}_3$  大 30~40%, 从而允许加更高的电压脉冲; 6) KTP 时间分辨率高于  $\text{LiNbO}_3$ ~30% 左右, 从而可以获得更窄的整形激光脉冲。本文设计了新型 KTP 电光偏转器, 并对其结果进一步分析, 得出作为快响应的电光偏转器, KTP 的综合性能要好于  $\text{LiNbO}_3$ , 利用它不但可获得较大宽度的整形激光脉冲, 而且减小了整形脉冲的前后沿宽度。

Table 1.

	$P_{th} (\text{MW}/\text{cm}^{-2})$	$\epsilon_{eff}$	$\gamma_{33} (\text{pm}/\text{V})$	$\gamma_{33} (\text{pm}/\text{V})$	$V_{\lambda/2} (\text{V})$	$n_o^3 \gamma_{33} / \epsilon (\text{pm}/\text{V})$
$\text{LiNbO}_3$	~ 5	37.0	28.8	10.0	590	8.3
KTP	150~ 5000	13.0	36.3	8.8	592	17.4

(计算半波电压时, 参数  $L = 40 \text{ mm}$ ,  $D = 4 \text{ mm}$ 。)

\* 本课题为神光-II 升级课题。

收稿日期: 1996 年 11 月 29 日; 收到修改稿日期: 1997 年 2 月 18 日

## 2 KTP 电光偏转器设计的基本原理

### 2.1 电光偏转器的品质因子

电光偏转器的基本原理是在垂直于光束的传播方向上形成线性折射率梯度, 而线性折射率梯度是由线性梯度电场通过电光效应产生的。假定电光偏转器内只有  $Z$  方向电场  $E_z$ , 从而在正交直角坐标系中, 晶体的折射率为:

$$n_x = n_{x0} - n_{x0}^3 \gamma_{13} E_z / 2, \quad n_y = n_{y0} - n_{y0}^3 \gamma_{13} E_z / 2, \quad n_z = n_{z0} - n_{z0}^3 \gamma_{33} E_z / 2 \quad (1)$$

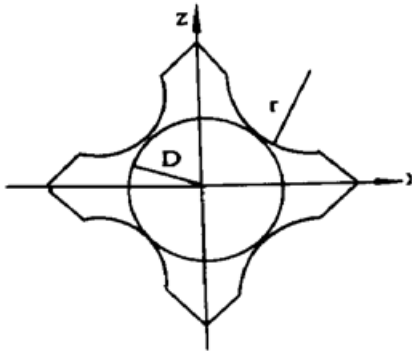


Fig. 1 Cross-section of KTP electro-optic deflector

式中  $n_{x0}$ 、 $n_{y0}$ 、 $n_{z0}$  为未加电场时的轴向折射率, 对 KTP 晶体, 当波长等于  $1.06 \mu\text{m}$  时,  $n_{x0}$ 、 $n_{y0}$ 、 $n_{z0}$  分别为 1.7481、1.7557、1.8393<sup>[1]</sup>, 为了利用最大的电光系数  $\gamma_{33}$ , 在加工时, 沿与 KTP 晶体的  $x$  轴和  $z$  轴成  $45^\circ$  的方向切割, 使光束沿  $y$  轴方向传播,  $z$  轴方向的梯度电场由四个柱面电极来产生, 于是, 其电光偏转器的截面如图 1 所示。

其伴随电场  $E_x$  的影响可以证明是很小的, 从而可以忽略。假定在  $z$  轴上加  $x$  方向分布的电场  $E_z(x)$ , 根据(1)式, 对  $z$  方向上沿  $y$  轴传播的光束有效折射率为:

$$n_z(x) = n_{z0} - n_{z0}^3 \gamma_{33} E_z(x) / 2 \quad (2)$$

光束通过长度为  $L$  的 KTP 晶体后发生偏转, 偏转角  $\theta$  为:

$$\theta = L \frac{dn_z(x)}{dx} = - \frac{1}{2} L n_{z0}^3 \gamma_{33} \frac{dE_z(x)}{dx} \quad (3)$$

对一电光偏转器定义品质因子  $N$  为偏转角与光束受偏转器孔径限制的理想平面波光束的衍射全角之比。即:

$$N = - \frac{1}{2} L n_{z0}^3 \gamma_{33} \frac{dE_z(x)}{dx} \frac{D}{2.44\lambda} \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为入射光的波长,  $D$  为电光偏转器的通光孔径。由(2)式知, 折射率梯度和电场梯度的线性密切相在, 在图 1 中, 以  $r$  表示电极半径,  $D$  表示通光孔径, 四柱面电极形成的电位梯度的线性只与电极半径和通光孔径的比值有关。定义结构参数  $S = r/D$ 。通过比较结构参数  $S$  相同但尺寸不同的电光偏转器可知, 电场梯度的大小和偏转器上所加电压成正比, 和通光口径的平方成反比, 引入系数  $C_s$ , 使:

$$C_s = - \frac{D^2}{V} \frac{dE_z(x)}{dx} \quad (5)$$

于是:

$$\theta = \frac{1}{2} L n_{z0}^3 \gamma_{33} \frac{C_s V}{D^2}, \quad N = \frac{C_s}{4.88} \frac{n_{z0}^3 \gamma_{33}}{\lambda} V \frac{L}{D} \quad (6)$$

由于  $C_s$  只与晶体的结构参数  $S$  有关, (6)式表示了偏转器的基本品质因子与晶体材料的折射率, 电光系数, 入射激光波长以及偏转器的结构因子, 所加电压, 偏转器长度和通光口径的关系。

### 2.2 温度变化与波面畸变

由于 KTP 是双轴晶体, 当加上一电压之后, 在  $z$  方向和  $x$  方向上将产生一相位迟  $\Gamma$ , 满足<sup>[3]</sup>:

$$\Gamma = - (2\pi/\lambda)L(n_{z0} - n_{x0}) + (\pi n_{z0}^3/\lambda)[\gamma_{33} - (n_{x0}/n_{z0})^3\gamma_{13}]V(L/D) \tag{7}$$

(7) 式第一项为晶体的双折射效应所产生的, 第二项是由于加电压后由电光效应所导致的相位延迟, 与第一项相比可以忽略不计。为了获得更好的复原效果, 并且消除整形过程中的波面畸变, 必须进行补偿, 考虑到 KTP 晶体折射率随温度变化有:  $\Delta n_x = 1.1 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\Delta n_z = 1.6 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , 以及其热扩张系数  $\alpha_y = 0.9 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , 为此将(7)式写为:

$$\Gamma = - \frac{2\pi}{\lambda}L_0(n_{z0} - n_{x0}) [1 + (\frac{\Delta n_z - \Delta n_x}{n_{z0} - n_{x0}} + \alpha_y)\Delta T] \tag{8}$$

式中  $L_0$ 、 $n_{z0}$ 、 $n_{x0}$  为室温下的值,  $\Delta L = \alpha_y L \Delta T$ , 为了补偿双折射相位, 令  $\Gamma = 2m\pi$ ,  $m$  为整数, 从而得到:

$$\Delta t = [\frac{m\lambda}{L_0(n_{z0} - n_{x0})} - 1][\frac{\Delta n_z - \Delta n_x}{n_{z0} - n_{x0}} + \alpha_y]^{-1} \tag{9}$$

将数值代入有:  $\Delta T = 4.5526m - 15667.9^\circ\text{C}$ , 取  $m = 3442 + n$ , 从而便得到 KTP 电我偏转器应维持的恒定温度。

$$T = 22.1 + 4.5526n \text{ (}^\circ\text{C)} \tag{10}$$

式中  $n$  为整数, 该式说明当  $T$  变化  $4.5526^\circ\text{C}$  时, 相位将变化  $2\pi$ , 也就是说, 当温度变化时, 沿  $z$  轴和  $x$  轴方向在激光传播的过程中, 将发生相位延迟和波面畸变, 如图 3 所示, 实线为相位延迟曲线, 虚线为波面畸变与温度的依赖关系, 可以看出, 波面畸变以  $4.5526^\circ\text{C}$  为周期, 为了使相位畸变小于十分之一一个波长, KTP 偏转器的温度变化必须保证小于  $0.4^\circ\text{C}$ , 为此, 将 KTP 电光偏转器放置在一具有温度控制的炉子中, 恒温炉温度灵敏度为  $0.1^\circ\text{C}$ , 如图 2 所示, 其保持的温度可根据环境温度调整  $n$  值, 使其与环境温度相差最小, 这样可以减少外界对恒温炉的影响。在实验中令  $n = 0$ , 从而  $T = 22.1^\circ\text{C}$ 。

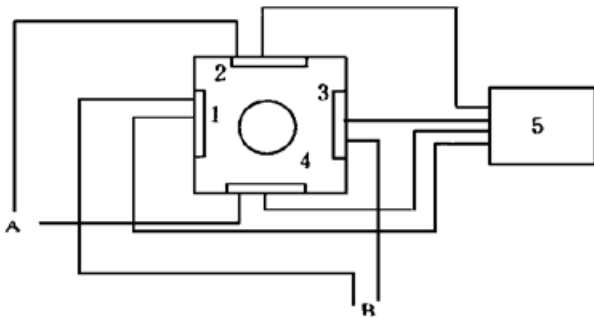


Fig. 2 KTP electro-optic deflector with a temperature controller. 1, 2, 3, 4, are temperature sensors, 5 is a temperature contrlor. A, B are electrical pulse input lines

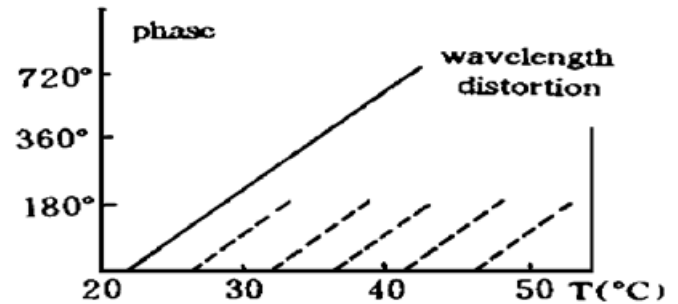


Fig. 3 Phase delay and wavelength distortion versus temperature (dashed lines are wavelength distortion)

### 2.3 时间分辨率

假定  $a\epsilon$  为电光偏转器单位长度的电容, 则有:

$$I = a\epsilon \frac{dV(t)}{dt} \tag{11}$$

电光偏转器的时间分辨率定义为:

$$\tau = \frac{a\epsilon}{n_{z0}^3\gamma_{33}} \frac{D}{LC_s} \frac{2.44\lambda}{I} \tag{12}$$

经过测量, 对所设计的 KTP 电光偏转器, 其电容为  $14 \text{ pF}$ , 而同样尺寸的  $\text{LiNbO}_3$  电光偏转

器的电容为 25 pF, 当加峰值 10 kV, 宽度 10 ns 的高压电脉冲时, KTP 电光偏转器时间分辨率为 180 ps, 而同样尺寸的 LiNbO<sub>3</sub> 电光偏转器其时间分辨率为 414 ps, 从而说明利用 KTP 电光偏转器最窄可获得宽度为 400 ps 的整形激光脉冲, 而利用 LiNbO<sub>3</sub> 电光偏转器最窄可获得 830 ps 宽的整形脉冲。

### 3 KTP 电光偏转器的设计及其分析

经过计算知道<sup>[4]</sup>, 在  $S = 0.53$  和  $C_s = 3.85$  时, 所获得的整形脉冲畸变最小, 为此根据实际需要设计 KTP 电光偏转器通光口径  $D = 4$  mm。在高压电脉冲峰值等于 10 kV 时, 由  $L \tan \theta = (D - a)/2$  ( $a$  为光束的直径, 取为 3 mm) 并将(6)式, 代入可得  $L = 40$  mm。由此从理论上计算得到对所设计的 KTP 电光偏转器, 偏转角为 0.0011 rad/kV, 偏转一个衍射极限的电压为 595V, 而相同结构的 LiNbO<sub>3</sub> 分别为 0.0014 rad/kV 和 463 V, 虽然其数值略大于 KTP 电光偏转器的值, 但由于 KTP 偏转器的时间分辨率高于 LiNbO<sub>3</sub> 偏转器, 可以采用提高高压电脉冲的峰值或减小整形小孔的口径的方法来获取更窄宽度的整形激光脉冲。另外

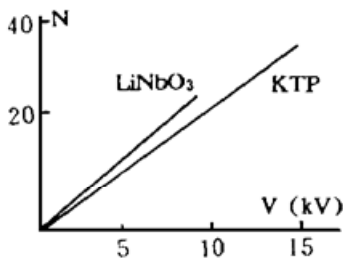


Fig. 4 Quality factors of LiNbO<sub>3</sub> and KTP electro-optic deflector versus high voltages

由于 KTP 的动态范围比 LiNbO<sub>3</sub> 大, 从图 4 可以看出, KTP 电光偏转器的品质因子  $N$  在动态范围内是可以超过 LiNbO<sub>3</sub> 偏转器的品质因子的。图 5 给出了利用平行光扫描方式,  $4f$  望远镜系统的透镜焦距为 70 mm, 整形小孔口径为 2 mm 时, 对 KTP 电光偏转器和 LiNbO<sub>3</sub> 电光偏转器分别加 3000 V 和 2500 V 的高压电脉冲时, 所获得的整形激光脉冲。(a)、(b) 分别对应了 LiNbO<sub>3</sub> 电光偏转器和 KTP 电光偏转器所获得的结果, 由图中可以看出, 使用 KTP 电光偏转器所获得的整形脉冲其宽度小于使用 LiNbO<sub>3</sub> 电光偏转器所获得的整形脉冲的宽度, 并且其前后沿的宽度也比较窄。

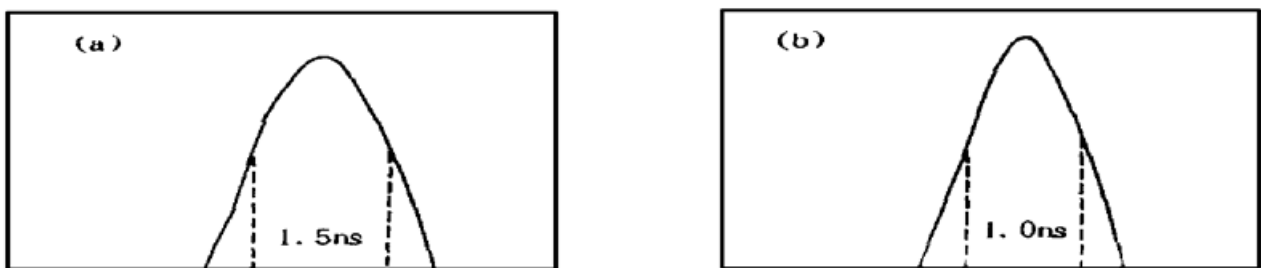


Fig. 5 Laser pulses shaped by a LiNbO<sub>3</sub> and a KTP deflector system (a) by a LiNbO deflector, with  $V = 2500$  V, shaping aperture 2 mm, (b) by a KTP deflector, with  $V = 3000$  V, shaping aperture 2 mm

**结 论** KTP 晶体的综合性能好于 LiNbO<sub>3</sub> 晶体, 在时空变换法激光脉冲整形过程中, 采用 KTP 晶体作为电光偏转器, 虽然由于其折射率稍低从而对电脉冲值的要求稍高, 但由于其响应时间快了一倍多, 所以可获得更窄的整形激光脉冲。另外由于 KTP 的光学破坏阈值在同样的条件下, 比 LiNbO<sub>3</sub> 高出 2~3 个数量级, 从而可大大提高整形激光脉冲的输出功率, 这样可降低对大功率固体激光驱动器的后继放大器要求。总之, 在综合考虑的情况下, 利用 KTP 电光偏转器作为整形器件, 要优于利用 LiNbO<sub>3</sub> 电光偏转器。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] J. D. Bierlein, C. B. Arweiler, Electro-optic and dielectric properties of  $\text{KTiOPO}_4$ . *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(15) : 917~ 919
- [ 2 ] K. L. K. Cheng, L. T. Cheng, J. D. Bierlein *et al.*, Preparation of single-domain  $\text{KTiOAsO}_4$  crystals for device application. *Proc. SPIE*, 1992, **1863** : 40~ 53
- [ 3 ] X. D. Wang, P. Basseras, R. J. Dwayne Miller, Investigation of  $\text{KTiOAsO}_4$  as an electro-optic amplitude modulator. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(5) : 519~ 521
- [ 4 ] Mark G. Roelofs, Identification of  $\text{Ti}^{3+}$  in KTP and its possible role in laser damage. *J. Appl. Phys.*, 1989, **65**(12) : 4976~ 4982

**Design and Analysis of a New Type of KTP Electro-Optic Deflector**

Xie Xinglong      Chen Shaohe      Deng Ximing

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

(Received 29 November 1996; revised 18 February 1997)

**Abstract** A novel KTP electro-optic deflector with diameter  $D = 4$  mm, length  $L = 40$  mm, is designed. Compared with the same size  $\text{LiNbO}_3$  deflector, the temporal resolution of KTP deflector is 180 ps, while  $\text{LiNbO}_3$  deflector is 414 ps. The shaped laser pulse with the least width of 400 ps of KTP deflector and 830 ps for  $\text{LiNbO}_3$  can be obtained respectively. Factors affect the property of electro-optic deflector are analyzed. Using a temperature-controlled oven, the wave-front distortion in laser pulse propagation can be eliminated.

**Key words** KTP electro-optic deflector, quality factor, temperature compensation, temporal resolution.