

# KNbO<sub>3</sub> 电光偏转器\*

卢秀权 陈绍和

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

沈德忠

(北京人工晶体所 北京 100018)

**提要** 分析了 KNbO<sub>3</sub> 晶体的电光性质, 利用电光张量系数  $\gamma_{33}$  加工成电光偏转器, 偏转梯度电场由四个柱面电极产生。实验结果表明, 在结构参数、通光口径及其它条件均等同的情况下, 该器件的基本品质因子约是 LiNbO<sub>3</sub> 电光偏转器的 2 倍。

**关键词** LiNbO<sub>3</sub> 晶体, 电光张量系数, 四极电场, 基本品质因子

## 1 引 言

KNbO<sub>3</sub> 晶体是重要的具有钙钛矿结构的铁电材料, 在室温下, 它属于正交晶系, 对称类型为 *mm*2, 晶格参数:  $a = 0.5695 \text{ nm}$ ,  $b = 0.3973 \text{ nm}$ ,  $c = 0.5721 \text{ nm}$ 。晶体有较大的非线性光学系数和高的光学破坏阈值<sup>[1]</sup>, 可直接倍频半导体激光, 除了可以用角度相位匹配外, 还能在相当宽的光波段内实现非临界相位匹配(NCPM), 因此被广泛用于光的倍频、和频、光频转换以及光学参量振荡。

表 1 作为电光偏转器材料的几种常用晶体

Table 1 Summary of some possible materials for making linear deflectors

E-O materials	transparency range/ $\mu\text{m}$	$\lambda = 1.06 \mu\text{m}$			dielectric constants $\epsilon$
		E-O coefficients $\gamma/\text{pm/V}$	refractive index $n$	damage threshold $/\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$	
ADP	0.2~ 1.2	23 ( $\gamma_{41}$ )	$n_o = 1.52$ $n_e = 1.47$	~ 500	$\epsilon_1 = \epsilon_2 = 56$ $\epsilon_3 = 15$
KDP	0.2~ 1.5	11 ( $\gamma_{63}$ )	$n_o = 1.50$ $n_e = 1.46$	~ 500	$\epsilon_1 = \epsilon_2 = 44$ $\epsilon_3 = 15$
KD* P	0.2~ 1.5	24.1 ( $\gamma_{63}$ )	$n_o = 1.50$ $n_3 = 1.46$	~ 1000	$\epsilon_1 = \epsilon_2 = 58$ $\epsilon_3 = 50$
LiN-bO <sub>3</sub>	0.4~ 5.0	30.8 ( $\gamma_{33}$ )	$n_o = 2.28$ $n_3 = 2.16$	~ 100	$\epsilon_1 = \epsilon_2 = 78$ $\epsilon_3 = 32$
KTP	0.35~ 4.5	35 ( $\gamma_{33}$ )	$n_1 = 1.76$ $n_2 = 1.77$ $n_3 = 1.86$	> 500	$\epsilon_1 = 11.9$ $\epsilon_2 = 11.3$ $\epsilon_3 = 17.5$
KN-bO <sub>3</sub>	0.4~ 5.0	64 ( $\gamma_{33}$ ) 380( $\gamma_{42}$ )	$n_1 = 2.22$ $n_2 = 2.25$ $n_3 = 2.11$	> 500	

\* 国家高技术 863 基金资助项目。

KNbO<sub>3</sub> 晶体还有较大的电光系数, 以前也许是由于生长优质晶体困难, 至今还很少有人报道它在电光器件方面的应用。然而, Grey Mizell 等人证明了采用他们的方法生长、处理之后的晶体, 光学质量好, 对 0.4~5.5 μm 光波段透明。目前, 广泛应用于数据处理、光通讯, 条纹相机的电光偏转器一般采用 ADP, KDP, KD\*P, LiNbO<sub>3</sub> 等晶体。这些晶体电光系数普遍偏小 (参看表 1<sup>[1,2]</sup>), 光要偏转一定角度需要相对较高的电压。在用于惯性约束核聚变(ICF) 的高功率激光装置(如神光-2<sup>#</sup>) 的驱动器中的时空变换脉冲整形系统的核心部件仍是 LiNbO<sub>3</sub> 电光偏转器, 由于 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的光学破坏阈值相当低, 因而成为限制激光功率的因素之一。也有人考虑在这样一个整形系统中改用 KTP 电光偏转器, 但 KTP 晶体的电光系数  $\gamma_{33}$  也不大。本文先分析了晶体的电光效应, 然后采用合理的偏转器电极结构, 导出其基本品质因子, 在文章的结束部分给出了实验结果, 并指出有可能利用晶体的最大电光系数  $\gamma_{42}$  加工成电光偏转器, 这些都说明 KNbO<sub>3</sub> 作为电光偏转器材料, 有它的优势。

## 2 电光效应

KNbO<sub>3</sub> 晶体的电光效应可由电光张量系数  $\gamma_{13}, \gamma_{23}, \gamma_{33}, \gamma_{42}, \gamma_{51}$  来描述<sup>[2]</sup>, 在外电场  $E = (E_1, E_2, E_3)$  的作用下, 折射率椭球变成

$$\left[ \frac{1}{n_1^2} + \gamma_{13}E_3 \right] x_1^2 + \left[ \frac{1}{n_2^2} + \gamma_{23}E_3 \right] x_2^2 + \left[ \frac{1}{n_3^2} + \gamma_{33}E_3 \right] x_3^2 + 2\gamma_{42}E_2x_2x_3 + 2\gamma_{51}E_1x_1x_3 = 1 \quad (1)$$

其中,  $n_1, n_2, n_3$  为晶体主折射率, 现在, 我们分别讨论晶体在三个主轴方向加电场时的电光性质, 然后以此为根据, 考虑采用合理的偏转器电极结构。

1) 在  $x_3$  方向加电场, (1) 式退化成

$$\left[ \frac{1}{n_1^2} + \gamma_{13}E_3 \right] x_1^2 + \left[ \frac{1}{n_2^2} + \gamma_{23}E_3 \right] x_2^2 + \left[ \frac{1}{n_3^2} + \gamma_{33}E_3 \right] x_3^2 = 1 \quad (2)$$

此时, 晶体主轴不旋转, 如图 1(a), 通常有  $1/n_i^2 \gg \gamma_{i3}E_3$ , 可求得加电场后新的主折射率

$$n_{x1} = n_1 - \frac{1}{2}n_1^3\gamma_{13}E_3 \quad n_{x2} = n_2 - \frac{1}{2}n_2^3\gamma_{23}E_3 \quad n_{x3} = n_3 - \frac{1}{2}n_3^3\gamma_{33}E_3 \quad (3)$$

电场导致折射率的变化为

$$\Delta n_{x1}^a = -\frac{1}{2}n_1^3\gamma_{13}E_3 \quad \Delta n_{x2}^a = -\frac{1}{2}n_2^3\gamma_{23}E_3 \quad \Delta n_{x3}^a = -\frac{1}{2}n_3^3\gamma_{33}E_3 \quad (4)$$

2)  $x_2$  方向加电场, (1) 式退化为

$$\frac{1}{n_1^2}x_1^2 + \frac{1}{n_2^2}x_2^2 + \frac{1}{n_3^2}x_3^2 + 2\gamma_{42}E_2x_2x_3 = 1 \quad (5)$$

此时, 晶体主轴绕  $x_1$  轴转一个角度  $\theta$ , 如图 1(b) 所示, 求方程(5) 系数矩阵本征值和本征矢, 或直接使用坐标旋转变换, 可以得到  $\theta$  的大小(在  $E_2 \approx 10^6$  V/m,  $\theta$  的典型值约为百分之一弧度, 常被忽略) 和主折射率的变化

$$\Delta n_{x2}^b = \frac{1}{2}n_2^3\alpha^b\gamma_{42}^2E_2^2 \quad \Delta n_{x3}^b = \frac{1}{2}n_3^3\alpha^b\gamma_{42}^2E_2^2 \quad \Delta n_{x1}^b = 0 \quad (6)$$

其中,  $1/\alpha^b = 1/n_2^2 - 1/n_3^2$ 。

3)  $x_1$  方向加电场, 此时, 晶体主轴绕  $x_2$  轴转过一个小角度, 如图 1(c)。电场引起的主折射率变

化为

$$\Delta n_{x1}^c = \frac{1}{2} n_1^3 \alpha^c \gamma_{31}^2 E_1^2 \quad \Delta n_{x3}^c = -\frac{1}{2} n_3^3 \alpha^c \gamma_{31}^2 E_1^2 \quad \Delta n_{x2}^c = 0 \quad (7)$$

其中,  $1/\alpha^c = 1/n_3^2 - 1/n_1^2$ 。

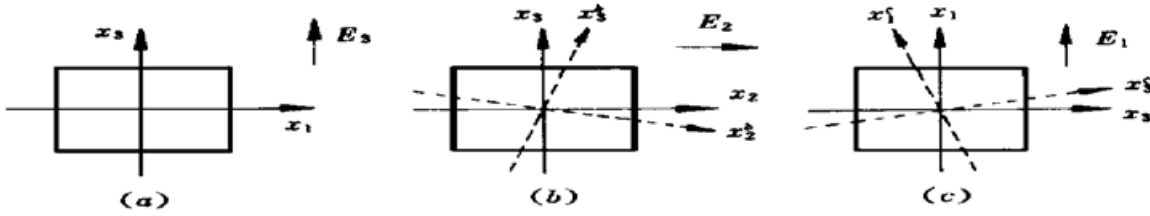


图 1 加上电场  $E_i (i = 1, 2, 3)$  后, 晶体新的折射率主轴相对于原主轴的旋转

Fig. 1 The rotation of the new index principle axes with respect to the unperturbed principle axes when an electric-field  $E_i$  is applied,  $i = 1, 2, 3$

### 3 偏转器结构及其基本品质因子

根据对 KNbO<sub>3</sub> 晶体电光效应的分析, 我们采用了图 2 示出的偏转器结构。相对晶体  $x_1$  轴和  $x_3$  轴  $45^\circ$  方向切割, 光束沿  $x_2$  轴传播, 偏振方向为  $x_3$  方向。光偏转所需的梯度电场由四个圆柱电极提供<sup>[3]</sup>, 电极半径均为  $r$ ,  $D$  为通光口径, 定义偏转器的结构参数  $S = r/D$ 。则光束通过长为  $l$  的晶体后, 在  $x_1x_2$  平面内转过的角度为

$$\Phi = -l \cdot \Delta n / D \quad (8)$$

其中,  $\Delta n$  是光束在  $x_1$  方向两端所经历的最大折射率之差, 由(4) 式得

$$\Delta n = n_3^3 \gamma_{33} E_{3\max} \quad (9)$$

其中,  $E_{3\max}$  为晶体通光口径边缘  $E_3$  的极大值, 在确定了通光口径、结构参数之后, 它与外加电压成正比。

根据文献[4] 中的(2) 式, 电光偏转器的基本品质因子不是偏转角度  $\Phi$ , 而是偏转光束扫过可分辨光斑的个数  $N$

$$N = \Phi \cdot D / 2.44\lambda = (l/2.44\lambda) n_3^3 \gamma_{33} E_{3\max} \quad (10)$$

由此可见, 偏转器基本品质因子与材料的电光系数  $\gamma_{33}$  成正比, 因而, KNbO<sub>3</sub> 电光偏转器的品质因子比相应 LiNbO<sub>3</sub> 晶体电光偏转器的品质因子大了许多。

当然, 在这种四极电场结构的偏转器中, 存在  $E_1$  电场沿  $x_3$  方向梯度分布的问题。但是进一步计算表明: 光束沿  $x_3$  方向的偏转可以忽略。

由(4) 式和(7) 式, 得到

$$R = \frac{\Delta n_{x3}^a}{\Delta n_{x3}^c} = \frac{\gamma_{33} E_3}{\alpha^c \gamma_{31}^2 E_1^2} \quad (11)$$

将 KNbO<sub>3</sub> 晶体的参数代入上式, 令  $E_3 = E_1 = 10^6$  V/m,  $R \approx 51$ 。

### 4 实验结果和讨论

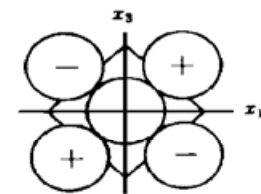


图 2 KNbO<sub>3</sub> 电光偏转的横截面

Fig. 2 Cross section of the KNbO<sub>3</sub> deflector

实验使用的晶体尺寸为  $5 \times 5 \times 32$  (mm), 为了能在同等条件下与  $\text{LiNbO}_3$  电光偏转器<sup>[7]</sup> 作比较, 加工晶体时, 使用了同样的一些参数: 通光孔径  $D = 4$  mm, 结构参数  $S = 0.53$ , 晶体长度  $l = 30$  mm (每个电极距晶体抛光端面各约 1 mm 左右), 用焦距为 740 mm 的透镜作偏转光束的傅里叶变换, 入射光波长  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 。经读数显微镜测得焦平面上光斑的移动量为 1.53 mm/kV, 偏转一个衍射极限的光斑所需电压为 313 V。据文献[5]报道, 利用  $\text{LiNbO}_3$  电光

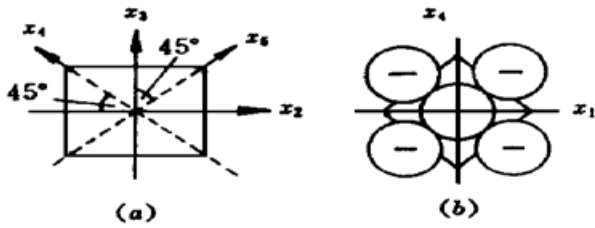


图 3 利用  $\gamma_{42}$  制成的  $\text{KNbO}_3$  电光偏转器

(a)  $x_4, x_5$  的方向; (b) 电光偏转器的横截面

Fig. 3 Structure of the  $\text{KNbO}_3$  deflector by using  $\gamma_{42}$

(a) orientation of  $x_4, x_5$ ; (b) cross section of the deflector

整个装置控制在室温工作 ( $\gamma_{42}$  随温度的升高而明显减小)。需要说明的是, 当光在双轴晶体中不沿主轴传播的时候, 光线矢量与光波矢量方向并不一致 (本例中约有  $3^\circ \sim 4^\circ$  的夹角)。

### 参 考 文 献

- 1 Liu Songhao, He Guangsheng. Optics of Intense Light and Its Applications. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Publishing House, 1995, 27~ 28 (kn Chinese)
- 2 J. D. Bierlein, C. B. Arweiler. Electro-optic and dielectric properties of  $\text{KTiOPO}_4$ . *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(15): 917~ 919
- 3 R. P. Kiyatkin. Analysis of control field in quadrupole optical-radiation deflectors. *Opt. Spectrosc.*, 1975, **38**(2): 209~ 211
- 4 C. L. M. Ireland. A  $\sim 20$  ps resolution crystal streak camera. *Opt. Comm.*, 1979, **30**(1): 99~ 103
- 5 Xu Faming, Fan Dianyuan, Chen Shaohe *et al.*. Study of  $\text{LiNbO}_3$  electro-optic detector. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(3): 369~ 372 (in Chinese)

## A $\text{KNbO}_3$ Electro-Optic Deflector

Lu Xiuquan Chen Shaohe

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

Shen Dezhong

(Research Institute of Synthetic Crystals, Beijing 100018)

**Abstract** In this paper, the electro-optical properties of a  $\text{KNbO}_3$  single crystal was studied. A  $\text{KNbO}_3$  deflector with four cylindrical electrodes, which utilizes the coefficient  $\gamma_{33}$  of the EO tensor, was made. Results of the experiment indicated that the fundamental figure of merit of the  $\text{KNbO}_3$  deflector was about twice that of the  $\text{LiNbO}_3$  crystal with equal structural parameters, aperture and length.

**Key words**  $\text{KNbO}_3$ , coefficient of EO tensor, quadrupolar electric-field, fundamental figure of merit

偏转器, 得到焦平面上光斑的移动量为 0.79 mm/kV, 偏转一个衍射极限光斑所需电压为 605 V。

由此, 我们得到了用  $\text{KNbO}_3$  代替  $\text{LiNbO}_3$  的电光偏转器, 可将基本品质因子约增大一倍。

我们考虑如果利用  $\text{KNbO}_3$  晶体的最大电光系数  $\gamma_{42}$ <sup>[2]</sup>, 就可以进一步提高偏转器品质因子。设想中的电光偏转器结构如图 3,  $x_3$  为光波矢方向, 偏振方向为  $x_4$ , 电光偏转发生在  $x_1x_5$  平面,