

# LiNbO<sub>3</sub> 电光偏转器的研究

许发明 范滇元 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** 从电光效应出发, 对 LiNbO<sub>3</sub> 电光偏转器的基本品质因子进行研究, 导出了偏转器的设计公式, 用有限差分法计算了四柱面电极电光偏转器的电场分布, 对不同结构参数, 给出了梯度线性度和结构因子。

**关键词** 电光偏转器, 折射率梯度线性, 结构因子。

## 1 引 言

电光偏转器是非常独特的电光元件, 被广泛应用于数据处理、光通信、无光电阴极条纹相机<sup>[1]</sup>。其原理是通过特殊的电极结构, 在晶体中形成垂直于光束传播方向梯度电场, 根据电光效应产生折射率梯度, 使光束发生偏转。为了在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体内形成电场梯度, 采用四柱面体电极结构, 由于电极结构的复杂性, 用解析方法较难对晶体内的电场作定量细致的分析。本文在理论上从电光效应出发, 对偏转器的基本品质因子进行分析, 引入结构因子概念, 导出了设计公式, 用计算静态电场的有限差分法, 计算了不同结构参数的电场分布, 并根据电场梯度的线性度, 给出了设计参数和设计实例。

## 2 偏转器的结构和理论

为了利用 LiNbO<sub>3</sub> 晶体最大的电光系数  $\gamma_{33}$ , 偏转器采用图 1 所示结构, 对晶体 X 轴和 Z 轴 45° 方向切割, 光束沿 Y 轴传播, 形成梯度电场的电极是四个柱面体, 电极半径均为  $r$ ,  $D$  为晶体通光孔径, 结构参数为  $S = r/D$ 。

在 Z 轴方向加 X 轴向分布的电场  $E_x(x)$ , 根据电光效应,  $e$  光的折射率为:

$$n_e(x) = n_e - \frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{33} E_x(x) \quad (1)$$

式中  $n_e$  为晶体  $e$  光折射率, 当光波长为  $1.06 \mu\text{m}$  时约为  $2.16$ <sup>[2]</sup>,  $\gamma_{33}$  为晶体的电光系数,  $30.8 \times 10^{-12} \text{ m/v}$ <sup>[3]</sup>, (1) 式两边对  $x$  求导后, 可得:

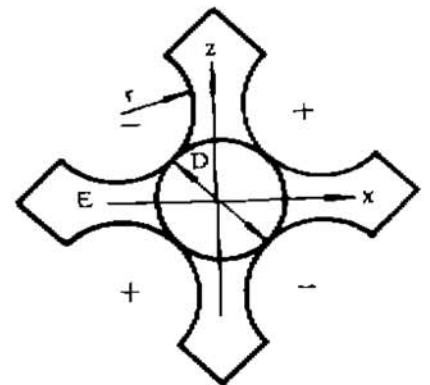


Fig. 1 Cross section of LiNbO<sub>3</sub> deflector

$$\frac{dn_z(x)}{dx} = - (1/2) n_o^3 \gamma_{33} d E_z(x)/dx \quad (2)$$

通常在通光孔径内  $\nabla n_z \ll n_z$ ，则光束通过长为  $L$  的晶体偏转  $\theta_z$  角度：

$$\theta_z = L dn_z(x)/dx \quad (3)$$

即：

$$\theta_z = - \frac{1}{2} L n_o^3 \gamma_{33} \frac{d E_z(x)}{dx} \quad (4)$$

电光偏转器的基本品质因子不是偏转角度，而是超过理想平面波光束衍射角的倍数  $N$ ，即：

$$N = - \frac{1}{2} L n_o^3 \gamma_{33} \frac{d E_z(x)}{dx} \frac{D}{2.44\lambda} \quad (5)$$

$\lambda$  为入射光的波长，仔细研究  $dE_z(x)/dx$ ，发现它与所加的电压  $V$  成正比，与晶体的具体尺寸大小的两次方成反比，如使：

$$C_s = \frac{D^2}{V} \frac{dE_z(x)}{dx} \quad (6)$$

发现它只与晶体的结构参数  $S$  有关，不妨称它为结构因子，把它代入(5)式，经整理可得到  $\text{LiNbO}_3$  这一类电光偏转器的设计公式：

$$N = - \frac{C_s}{4.88} \frac{n_o^3 \gamma_{33}}{\lambda} \Gamma \frac{L}{D} \quad (7)$$

这个公式表明偏转器的基本品质因子不仅与晶体材料的折射率、电光系数、入射光波长有关，还与结构因子、所加电压、晶体长度和通光孔径之比有关。设计的时候，一般要求电光偏转器的基本品质因子总是对一定光波长和所加的电压而言，晶体选定后，折射率、电光系数、电压和波长这四项就被定了下来，结构因子则由给定电压下允许由波面畸变引起的光束弥散度决定，那么晶体的长度和通光孔径比也就定了，如果具体的通光孔径给定以后，那么，就得到了电光偏转器的一切设计参数。

下面利用计算静态电场分布的有限差分法，通过算例，给出不同结构参数和相应光束弥散度、结构因子。

### 3 数值计算和分析

象解析法一样，要计算晶体的电场分布，首先必须确定边界条件，然后计算晶体内有关各点的电势，据此算出电场分布，进行分析讨论。

为了计算快速有效和易于设置边界条件，用 Bresenham 方法生成电极的圆弧和边界电位的设置，根据直线电力线是在相邻圆弧圆心连线上的特点，可以确定电极间这一电力线上各点的电位，这样就确定了四周的边界条件。用快速收敛有限差分法：

$$\varphi_k^{(i,j)} = \frac{1}{4} [\varphi_{k-1,j}^{(i)} + \varphi_{k+1,j}^{(i)} + \varphi_{k,i-1}^{(j)} + \varphi_{k,i+1}^{(j)}]$$

式中  $k$  为计算次数， $\varphi_{k,i,j}$  表示坐标  $(i, j)$  点的电势。

经过几百次的计算后，使前后两次的误差达到 0.0001 为止。本算例设置电极电压为 10000 V，晶体的尺寸归一化为 10 mm × 10 mm，通光孔径为 5 mm。经过计算后，晶体内有关部分的电势分布图如图 2 所示。保持孔径不变，改变电极半径，可以计算不同结构参数下的

电场分布, 通过 X 轴上电场分布, 可以考察电场梯度的线性性, 图 3 展示了不同电极半径即不同结构参数的通光孔径内沿 X 轴上的电场分布情况。

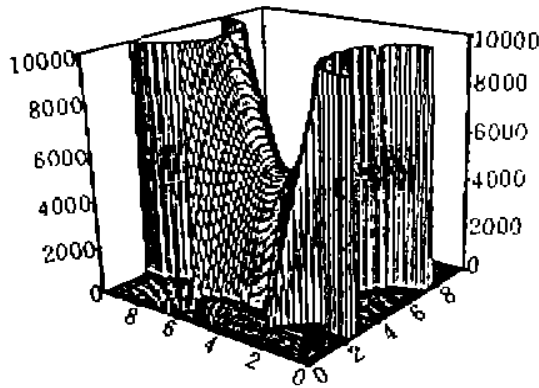


Fig. 2 Electrical potential distribution over the cased part in the LiNbO<sub>3</sub> crystal with  $S = 0.53$

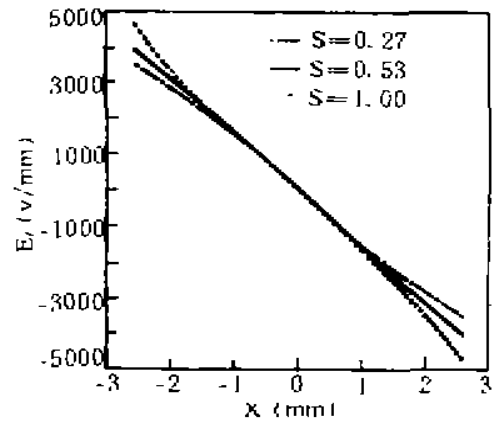


Fig. 3  $E_x$  on the X axis with different  $S$  while 10000 V is added to crystal and the deflector aperture 5 mm

理论表明, 折射率梯度的线性度取决于晶体内部电场的线性度, 对于电场梯度的线性度人们可以从其相对畸变的统计进行研究, 即对  $\frac{dE_x(x)/dx - \overline{dE_x(x)/dx}}{dE_x(x)/dx}$  的标准方差  $d_r$  进行研究, 电场梯度的相对畸变度的物理意义就是偏转光束波面畸变度和偏转角度之比, 反映到傅里叶变换的焦平面上即为, 焦斑的弥散度和焦斑移动距离之比, 直接反应了偏转器的质量。不仅如此, 电场梯度的相对畸变度也只和晶体的结构参数有关。从具体算例的电场梯度的平均值, 去掉具体的电压和晶体尺寸因素, 可以得到只和一定结构参数相关的偏转器的结构因子, 表 1 列出了不同结构参数和相对畸变度、结构因子之间的关系。

Table 1. Dependence of  $d_r$  and  $C_s$  upon  $S$

$S$	$d_r$	$C_s$	$S$	$d_r$	$C_s$
0.27	0.091	3.410	0.67	0.063	4.134
0.40	0.074	3.577	0.73	0.102	4.257
0.50	0.032	3.800	0.80	0.107	4.274
0.53	0.010	3.858	0.83	0.129	4.388
0.57	0.029	3.977	0.87	0.156	4.474
0.63	0.055	4.110	1.00	0.161	4.489

### 4 讨论和设计实例

从表 1 中可以发现, 随着结构参数的增加, 结构因子成缓慢增加趋势。而当结构参数小于 0.53 时, 参数越小, 反而相对畸变度越大; 当结构参数大于 0.53 时, 参数增加, 相对畸变度则急剧增大, 当结构参数为 0.53 时, 偏转器的相对畸变度最小, 为 0.01, 也就是说, 反映在有傅里叶变换的焦平面上, 衍射极限光束扫过 100 个光斑后, 才弥散一个光斑。一般选用这个参数和相应的结构因子 3.858。

另外根据电磁学理论, 偏转器的单位长度电容也只和结构参数和晶体的介电常数有关, 和具体通光孔径尺寸无关。

电光偏转器的孔径根据实际需要而定, 本文设计的 LiNbO<sub>3</sub> 电光偏转器尺寸为  $D = 4 \text{ mm}$ 、

$S = 0.53$ 、 $L = 30$  mm, 用焦距为 740 mm 的透镜作偏转光束的傅里叶变换, 经读数显微镜测量在焦平面上波长为  $1.06 \mu\text{m}$  光斑的移动量为  $0.79 \text{ mm/kV}$ , 即偏转的角度为  $0.00107 \text{ rad/kV}$ , 偏转一个衍射极限光斑的电压为 605 V, 而理论计算分别为  $0.83 \text{ mm/kV}$ 、 $0.0011 \text{ rad/kV}$  和 576 V, 误差主要来源于测量和晶体加工, 这表明依据理论计算和实际测试的元件的性能, 两者非常相符。

### 参 考 文 献

- [1] C. L. M. Ireland, The use of a  $\text{LiNbO}_3$  deflector in a  $\sim 100$  ps resolution streak camera. *Opt. Commun.*, 1978, 27(3): 459~562
- [2] D. N. Nikogosyan, Nonlinear optics crystals (review and summary of data). *Soviet. J. Quant. Electron.*, 1977, 7(1): 1~13
- [3] Marvin J. Weber, *Handbook of Laser Science and Technology*. CRC Press Inc., 1982: 260

## Study of $\text{LiNbO}_3$ Electro-Optic Deflector

Xu Faming      Fan Dianyuan      Cheng Shaohe      Deng Ximing

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

(Received 28 March 1995)

**Abstract** The fundamental figure of merit of  $\text{LiNbO}_3$  deflector was studied based on the electro-optic effect. Designing formula was derived. The electrical potential distribution over the deflector with four-cylindrical electrodes was calculated by the method of finite difference. Refractive-index gradient linearity and structure factor were obtained for different structure parameters.

**Key words** electro-optic deflector, refractive-index gradient linearity, structure factor.