

超越曲面电极结构电光偏转器研究*

艾月霞 李景镇** 龚向东

深圳大学工程技术学院, 深圳 518060

摘要 采用有限元法对几种不同电极结构下电光偏转器的电场分布进行研究. 设计出一种具有较大偏转角度的超越曲面电极结构电光偏转器, 与圆柱电极结构和双曲面电极结构电光偏转器的性能对比, 可知此种电光偏转器的偏转角度更大, 电场梯度线性度更高.

关键词 电光偏转器; 电场梯度; 电场梯度线性度

中图分类号 TN312 **文献标识码** A

0 引言

偏转是高速摄影中的关键技术^[1], 主要包括转镜偏转^[2]、声光偏转、电光偏转等, 其中偏转速度最快的是电光偏转. 电光偏转利用电光效应产生折射率梯度, 使光束发生偏转, 可分为波导阵列偏转^[3,4]、电光晶体偏转和数字偏转^[5]. 波导阵列偏转和数字偏转制备比较困难. 电光晶体偏转通过特殊的电极结构, 在晶体中形成垂直于光束传播方向的梯度电场, 形成偏转. 本文主要研究的是电光晶体偏转.

电光晶体偏转中的一个研究重点是如何提高电光偏转器偏转角度. 提高偏转角度的方法有两种, 一是采用较大电光系数的晶体, 但是这种方法受到晶体材料生长方面的困难和能否加高压方面的限制. 目前常用的晶体有 LiNbO_3 、 KNbO_3 、 KTP ^[6~8] 等, KNbO_3 生长困难, 且不能加高电压; KTP 晶体的性能受温度的影响较大, 且电光偏转系数 γ_{33} 不够大. 几种晶体相比, LiNbO_3 的综合性能好, 生长 LiNbO_3 的技术也最成熟. 二是采用不同的偏转器结构, 四电极分布的电光偏转器已经证明是一种比较理想的偏转器结构^[9]. 本文通过对四电极分布的电光偏转器结构进行深入分析, 设计出一种具有较大偏转角度的超越曲面电极结构电光偏转器.

1 基本原理

电光偏转属于梯度扫描技术, 图 1 示出了电光晶体光束偏转原理. 当电光晶体中有垂直于入射方向的折射率梯度时, 光波束波阵面通过晶体到达出射面, 相对于传播轴线产生一个偏转角度

$$\theta = -L \frac{\Delta n}{D} \quad (1)$$

式中 D 为通光孔径, L 为偏转器长度, Δn 为折射率梯度. 在通光孔径固定时, 要获得较大的偏转角度, 一是用较长的晶体; 二是增大折射率梯度. 但是, 晶体的长度受到 $L \tan \theta \leq \frac{D-a}{2}$ (a 为光束直径) 的限制, 所以关键是要有尽可能大的折射率梯度.

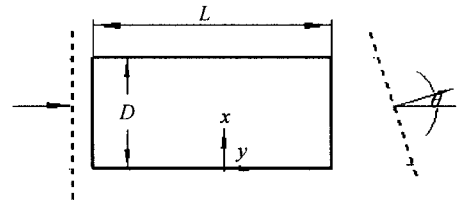


图 1 电光晶体光束偏转原理图

Fig. 1 Principle of electrooptic crystal deflection

LiNbO_3 晶体属于三方晶体, 未加电场时的折射率椭球为

$$B_1^0(x^2 + y^2) + B_3^0z^2 = 1 \quad (2)$$

式中, $B_1^0 = B_2^0 = 1/n_o^2$, $B_3^0 = 1/n_e^2$, n_o 和 n_e 分别为单轴晶体的寻常光和非寻常光的主折射率. 当晶体外加电场时, 由 LiNbO_3 晶体的线性电光系数矩阵, 得到外加电场后的感应折射率椭球方程为

$$\left(\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{22}E_y + \gamma_{13}E_z\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{22}E_y + \gamma_{13}E_z\right)y^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + \gamma_{33}E_z\right)z^2 + 2\gamma_{51}E_yyz + 2\gamma_{51}E_xzx - 2\gamma_{22}E_xxy = 1 \quad (3)$$

为了利用最大电光系数 γ_{33} , 采用电场平行于 z 轴的横向运用. 在 z 方向加 x 轴向分布的电场, $E_x = E_y = 0$, $E_z \neq 0$, 式(3)变为

$$\frac{x^2 + y^2}{n_o^2 \left(1 - \frac{1}{2}n_o^2\gamma_{13}E_z\right)^2} + \frac{z^2}{n_e^2 \left(1 - \frac{1}{2}n_e^2\gamma_{33}E_z\right)^2} = 1 \quad (4)$$

由式(4)可知, 加 E_z 电场后, LiNbO_3 晶体的三个主轴方向不变, z 轴仍为光轴, 光沿 y 轴传播. 主折射率的大小发生变化 $n_o' = n_o - \frac{1}{2}n_o^3\gamma_{13}E_z$, $n_e' = n_e - \frac{1}{2}n_e^3\gamma_{33}E_z$.

* 国家自然科学基金(60477042)和国家自然科学基金仪器基础专项基金(60127501)资助

** Tel: 0755-26536217 Email: lijz@szu.edu.cn

收稿日期: 2004-09-27

公式 $n'_e = n_z(x) = n_e - \frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{33} E_z(x)$ 两边对 x

求导可得

$$\frac{dn_z(x)}{dx} = -\frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{33} \frac{dE_z(x)}{dx} \quad (5)$$

式中, n_e 为晶体 e 光折射率, 当波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 时约为 $2.16^{[10]}$, γ_{33} 为电光系数, 为 $30.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}^{[11]}$, 则光束通过长为 L 的晶体偏转角度 θ 为

$$\theta = -L \frac{dn_z(x)}{dx} = -\frac{1}{2} L n_e^3 \gamma_{33} \frac{dE_z(x)}{dx} \quad (6)$$

电光偏转器的品质因子为偏转光束扫过可分辨光斑的个数 $N^{[11]}$

$$N = \theta \frac{D}{2.44\lambda} = \frac{L}{2.44\lambda} n_e^3 \gamma_{33} E_z(x) \quad (7)$$

电场梯度的线性只和电极半径 r 和通光孔径 D 有关, 定义结构参量 $s = r/D$, 通过比较结构参量相同但尺寸不同的偏转器可知, 电场梯度的大小和偏转器上所加的电压成正比, 和通光口径的平方成反比, 所以引入系数 C_s ,

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

于是

$$\theta = \frac{1}{2} L n_e^3 \gamma_{33} \frac{C_s V}{D^2}, N = \frac{C_s}{4.88} \frac{n_e^3 \gamma_{33} V L}{\lambda D} \quad (8)$$

2 圆柱电极结构和双曲面电极结构偏转器分析

常用偏转器设计中, 沿 $45^\circ-z$ 切割晶体后, 四电极如图 2 的圆柱面电极, 光束沿 y 轴方向传播, 在 z 轴方向加 x 轴向分布的电场 $E_z(x)$, 由于电光效应

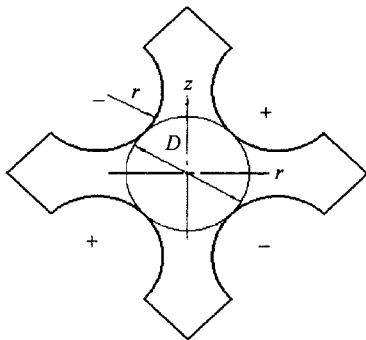


图 2 圆柱电极结构偏转器

Fig. 2 Cylinder electrode structure deflector

在 x 轴向产生电场梯度分布, 使得光束向折射率小的方向偏转. $s = r/D$ 为结构参量, 改变 s 值, 电光偏转器通光孔径内电场梯度发生变化.

采用有限元法分析了不同结构参量 s 时圆柱面电极电光偏转器的电场分布, 设置电极电压为 10000 V , 晶体通光孔径为 5 mm , 图 3 展示了电光偏转器采用不同结构因子 s 时, x 轴上电场分布情

况. 常用的偏转器设计都采用了结构因子为 0.53 时的电极分布.

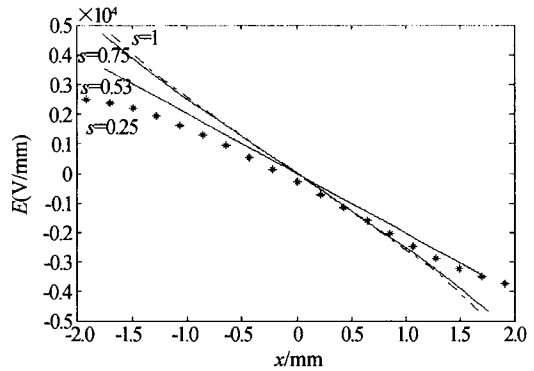


图 3 不同结构参量下电场比较

Fig. 3 Electric field comparison of different structure factor

由图 3 可看出, 结构因子 $s = 0.53$ 时, 电场梯度线性度较好. 但当 $s = 1$ 时, 偏转的角度大, 比 $s = 0.53$ 时偏转角度扩大了 1.16 倍, 但是其线性度不高. 随着结构参量 s 的增加, 偏转角度增大, 线性度同时变差.

文献[9]报导了四个双曲面电极结构产生的理想电场分布. 本文也对双曲面电极结构偏转器进行了分析, 发现双曲面电极结构并不是很理想. 从图 5 中可以看出双曲面电极结构的优缺点: 偏转器通光孔径中间一段电场梯度线性较高, 但梯度不大, 因此偏转角度不大.

实验首先用圆柱电极结构的电光偏转器验证了分析结果, 加工通光孔径为 5 mm , 晶体长度为 45 mm , 结构参量为 0.53 的电光偏转器. 由于偏转器的体积较小, 不易安装铜电极, 所以采用在晶体 4 个圆弧面上镀银的办法(每个镀银面距晶体抛光端面 1 mm 左右), 达到准确加电压到偏转器的目的; 另外为了防止电极间有爬电情况, 用绝缘胶封装. 实验所得偏转角度为 0.0011 rad/kV , 与理论计算值吻合.

3 超越曲面电极结构电光偏转器设计

为了探索具有高性能的偏转器结构, 采用有限元法对通光孔径固定情况下各种不同电极结构电光偏转器的电场分布进行研究. 图 4 是所设计的超越曲面电极结构电光偏转器, 通光孔径为 5 mm , 长度为 45 mm , 利用了结构因子 $s = 1$ 时电场梯度大的优点, 并对该结构做进一步的改进. 分析表明, 影响电光偏转器电场梯度的电极结构主要是靠近中心的电极分布, 而且为了防止加高压时两电极间爬电现象严重, 应尽量在设计中加大两电极间棱的距离. 设计每个电极棱的宽度为 1.5 mm , 用离散的点构成偏转器截面四个电极曲线, 这些离散的点可以拟合成为一个最高次幂为六次的超越曲线

$$z=0.0362x^6-0.4471x^5+2.1091x^4-4.7146x^3+5.1812x^2-2.0139x+D/2 \quad (9)$$

式中 D 为偏转器的通光孔径. 曲线拟合是以偏转器的中心为坐标原点, 拟合偏转器向上的电极截面一半曲线而得, 电极曲面如图所示, 为 4 个沿 y 轴分布的超越曲面构成.

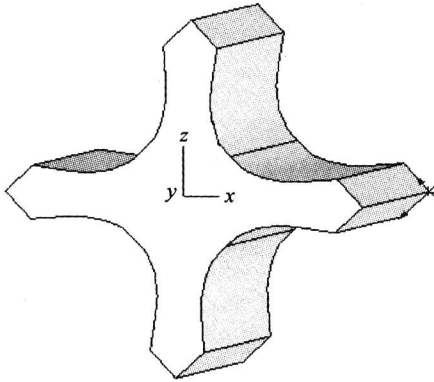


图 4 超越曲面电极电光偏转器
Fig. 4 Hypersurface Electrode Structure deflector

图 5 分别展示了超越曲面电极结构、两种圆柱电极结构和双曲面电极结构的电场梯度在 x 轴上变化情况. 从图 5 可以看出, 圆柱电极结构中, 结构因子为 0.53 的偏转器电场梯度线性度比较高, 但是偏转角度不大; 结构因子为 1 的偏转器偏转角度大, 但线性度不高; 双曲面电极结构也是中间一段线性度较高, 但通光孔径中心偏转角度也不大; 超越曲面电极偏转器在通光孔径小于 3 mm 的区域内, 偏转角度比常用结构(结构因子为 0.53)的偏转器扩大了 1.1 倍. 这种新型结构偏转器是针对出射激光束直径小于 3 mm 的系统所设计的. 利用了偏转器通光

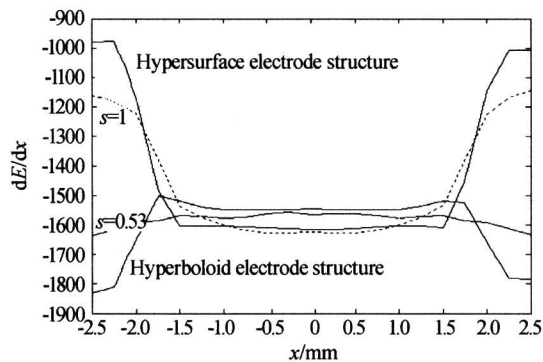


图 5 不同电极结构电场梯度比较
Fig. 5 Electric field gradient comparison of different structure factor

孔径中 3 mm 区域内电场梯度大的特性. 且在这个区域内, 相对畸变度即偏转光束面畸变度和偏转角之比为 0.002, 而常用结构偏转器相对畸变度为 0.01^[6], 即线性度也提高了 5 倍.

4 结论

1) 根据具体要求设计的超越曲面电极结构偏转器与以往设计的偏转器比, 在有效段内偏转角度较大, 电场梯度线性度较高.

2) 结构因子为 0.53 的圆柱面电极电光偏转器, 其偏转角度比结构因子为 $s=1$ 的圆柱面电极电光偏转器中间一段小; 但 $s=1$ 时电场梯度线性度不高, 改进设计的超越曲面电极偏转器, 通光孔径在 3 mm 的区域内不仅偏转角度大, 线性度也提高了 5 倍.

3) 根据本文的设计方法, 可根据需要设计出高线性度区域宽、梯度大的偏转器.

参考文献

- 1 李景镇, 孙凤山. 超高速摄影用高强度铝合金转镜动态特性的研究. 光子学报, 2000, **29**(5): 636~640
Li J Z, Sun F S. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(5): 636~640
- 2 李景镇, 谭显祥, 龚向东, 等. 超高速转镜分幅摄影时间信息参量测量的研究. 光子学报, 2004, **33**(7): 855~858
Li J Z, Tan X X, Gong X D, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 855~858
- 3 Gong Xiangdong, Li Jingzhen, Li Shanxiang, et al. Optical phased array beam deflector drive study. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 307~309
- 4 李家立, 石顺祥. 新型光波导阵列电光快速扫描器的光波导效应. 光子学报, 2002, **31**(8): 951~955
Li J L, Shi S X. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8): 951~955
- 5 Xu Wang, Daniel Wilson. Liquid-crystal blazed-grating beam deflector. *Applied Optics*, 2000, **39**(35): 6545~6555
- 6 许发明, 范滇元, 陈绍和, 等. LiNbO₃ 电光偏转器的研究. 光学学报, 1996, **16**(3): 369~372
Xu F M, Fan Z Y, Chen S H, et al. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(3): 369~372
- 7 卢秀权, 陈绍和, 沈德忠. KNbO₃ 电光偏转器. 中国激光, 1998, **25**(6): 519~522
Lu X Q, Chen S H, Shen D Z. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, **25**(6): 519~522
- 8 谢兴龙, 陈绍和, 邓锡铭. 新型 KTP 电光偏转器的设计和分析. 光学学报, 1997, **17**(11): 1571~1575
Xie X L, Chen S H, Deng X M. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(11): 1571~1575
- 9 徐国昌. 四极电光偏转器的特性和设计. 东南大学学报, 1992, **22**(6): 13~17
Xu G C. *Journal of Southeast University*. 1992, **22**(6): 13~17

- 10 Nikogosyan D N. Nonlinear optics crystals. *Soviet J Quant Electron*, 1977, **7**(1): 1~13
- 11 Ireiand C L M. A ~ 20ps resolution crystal streak camera. *Opt Comm*, 1979, **30**(1): 99~103

Studies on Electro-Optic Deflector with Hypersurface Electrode Structure

Ai Yuexia, Li Jingzhen, Gong Xiangdong

College of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060

Received date: 2004-09-27

Abstract The electric field distributions of electro-optic deflectors with several different electrodes was studied by the finite element method. A new deflector with hypersurface electrode structure and bigger deflection angle is designed. Compared with the deflectors based on cylindrical electrode structure and hyperboloid electrode structure, it is shown that the new designed electro-optic deflector has bigger deflection angle and higher linearity of electric field gradient.

Keywords Electro-optic deflector; Electric field gradient; Linearity of electric field gradient



Ai Yuexia received bachelor degree from Changchun University of Science and Technology in 2002. Now, she is pursuing master degree in Shenzhen University under guidance of professor Li Jingzhen. Her master project is related to electro-optic deflectors used in high speed photography.