

# 电光偏转器的矩阵表示和应用

许发明 陈绍和 范滇元 邓锡铭

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

**提要** 用光线追迹的方法, 导出了电光偏转器的矩阵表达式, 是著名的  $ABCD$  矩阵的扩展, 它包含了电光偏转器的时变项。并用矩阵光学的理论对由电光偏转器对构成的激光脉冲整形系统进行了研究, 对实际应用的电光偏转器对参数的一致性、电脉冲的同步精度及光路排布提出了要求。

**关键词** 电光偏转器, 矩阵光学, 时变系统

## 1 引言

电光偏转器是用特殊的电极结构, 在电光晶体内形成梯度电场, 由于电光效应产生折射率梯度, 使通过它的光束发生偏折, 而偏折角度大小和所加的电场梯度有关, 也即和晶体上所加的电压有关。由于其独特的性能, 它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>及激光脉冲的整形和削波等<sup>[2]</sup>。

电光偏转器的具体结构参数和电场梯度线性度之间关系已作了研究<sup>[3]</sup>, 本文旨在运用梯度光学理论, 通过光线追迹, 为电光偏转器建立矩阵形式的数学模型, 这一模型采用了类似于矩阵光学中处理失调光学元件的方法, 引入了时变项。最后把模型应用于由电光偏转器对构成的激光脉冲整形系统, 对系统中电光偏转器对参数的一致性、电脉冲同步的精度及光路的排布提出了要求。

## 2 电光偏转器的矩阵表示

四柱面形的电极结构在  $\text{LiNbO}_3$  晶体中形成了梯度电场<sup>[3]</sup>, 为了利用晶体最大的电光系数  $\gamma_{33}$ , 电场方向和晶体的  $Z$  轴一致, 但电场梯度方向为  $X$  轴方向, 光线沿  $Y$  轴传播, 如电场是时变的, 则根据电光效应, 晶体  $e$  光的折射率为:

$$n_z = n_e + \Delta n = n_e - \frac{1}{2} * n_e^3 * \gamma_{33} * E_z(x, t) \quad (1)$$

$n_e$  为  $e$  光的折射率,  $\gamma_{33}$  为电光系数,  $E_z(x, t)$  表示  $Z$  向沿  $X$  轴分布的时变电场, 则折射率梯度为:

$$\text{grad}(n_z) = \text{grad}_x(n_z) = -\frac{1}{2} * n_e^3 * \gamma_{33} * \frac{dE_z(x, t)}{dx} \quad (2)$$

从式(2)中可见, 折射率梯度和电场梯度方向相反, 根据文献[3], 晶体内静态电场电场梯度和

电极上所加电压  $V$  有关系式:

$$C_s = \frac{D^2}{V} * \frac{dE_z(x)}{dx} \quad (3)$$

$C_s$  为结构因子, 只和偏转器的通光孔径和电极半径之比有关, 和偏转器具体尺寸大小、所加的电压无关,  $D$  为偏转器的通光孔径。显然式(3)也适用于时变电场, 则折射率梯度可直接用电极上加载的电压来表示:

$$\text{grad}_z(n_z) = -\frac{1}{2} * \frac{C_s}{D^2} * n_e^3 * \gamma_{33} * V(t) \quad (4)$$

根据折射率连续变化的媒质中光线的传播理论, 光线的曲率半径  $R$  和折射率梯度有关系式:

$$\frac{1}{R} = \alpha * \frac{\text{grad}(n)}{n} \quad (5)$$

$\alpha$  为光线的单位法线矢量。式(5)表明在连续变化的媒质中光线的曲率半径和归一化折射率梯度在光线法线上的投影分量成反比, 把式(4)代入, 可得:

$$\frac{1}{R} = -\frac{1}{2} * \frac{C_s}{D^2} * n_e^2 * \gamma_{33} * V(t) * \cos\varphi \quad (6)$$

$\varphi$  为折射率梯度的法线和光线切线的夹角, 一般偏转器的端面和折射率梯度方向平行, 因此  $\varphi$  也就是图 1 中的  $\theta_0$ 。当光线和折射率梯度方向垂直, 即  $\varphi = 0$  时,  $R$  最小, 即相同电压下偏折的角度最大, 而光线沿梯度方向通过时不发生偏折。实际上

和晶体长度相比,  $R$  是很大的, 偏折的角度也不大, 故偏转器中光线上各点的曲率半径相差很小, 因此, 在晶体内光线的轨迹近似为圆弧, 如图 1 弧  $\widehat{OP}$  所示, 又因弧  $\widehat{OP}$  长和直线  $\overline{OP}$ ,  $\overline{OB}$  长十分接近, 故偏转角度有:

$$\Delta\varphi = \frac{\widehat{OP}}{R} = \frac{\overline{OP}}{R} = -\frac{1}{2} * \frac{C_s}{D^2} * n_e^2 * \gamma_{33} * V(t) * \overline{OP} \cos\varphi = -\frac{1}{2} * \frac{C_s}{D^2} * n_e^2 * \gamma_{33} * V(t) * L \quad (7)$$

式中  $L$  为偏转器长度。从表达式(7)可见通过电光偏转器的光线偏折的角度和初始点  $O$  处的入射角度无关。即不同角度入射的光束通过偏转器后都偏折同一角度, 故  $P$  处的角度有:

$$\theta_p = \theta_0 + \Delta\varphi \quad (8)$$

由于光束被偏折的角度不大, 角度偏折引入的位移为:

$$\Delta X_b = \left[ \text{tg}\left(\varphi + \frac{1}{2} * \Delta\varphi\right) - \text{tg}(\varphi) \right] * L \approx \frac{1}{2} * \Delta\varphi * L \quad (9)$$

考虑到  $RP_1$  和  $RP_2$  处介质折射率突变面, 那么电光偏转器可用  $3 \times 3$  增广矩阵表示为:

$$\begin{pmatrix} X_{\text{out}} \\ \theta_{\text{out}} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{n_e} & -\frac{1}{4} * \frac{C_s}{D^2} * n_e^2 * \gamma_{33} * V(t) * L^2 \\ 0 & 1 & -\frac{1}{2} * \frac{C_s}{D^2} * n_e^3 * \gamma_{33} * V(t) * L \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{\text{in}} \\ \theta_{\text{in}} \\ 1 \end{pmatrix}$$

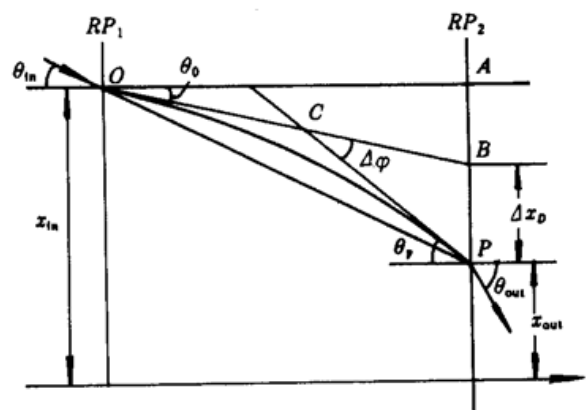


Fig. 1 Optical ray in the electro-optical deflector.

$RP_1$  and  $RP_2$  are ends of the deflector

## 3 应 用

用高功率激光实现惯性约束核聚变要求驱动靶的激光脉冲有特定的形状,我们已经用电

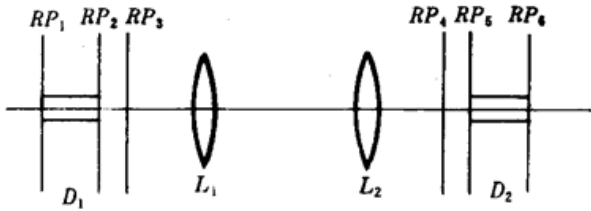


Fig. 2 Typical optical schematic of complex pulse shaping with a pair of deflectors

$RP_1 \sim RP_6$ ; reference planes;  $D_{1,2}$ ; deflectors;  $L_{1,2}$ ; lenses

光偏转器对实现了 280 ps 以上任意宽度脉冲削波<sup>[2]</sup>,并获得了 ICF 感兴趣的复杂形状的激光脉冲。这个光学系统的核心如图 2 所示,激光脉冲整形的基本原理是偏转器  $D_1$  上加载电压后,通过的光束偏离原来的传播方向,而且偏折的角度随电压的增加而增大,导致光束的焦斑在  $L_1$  的后焦面上直线扫描, $L_1$  和  $L_2$  构成  $4f$  系统, $L_2$  和  $D_2$  的作用是把偏折扫开的光束回复到原来的传播方向去,若在  $L_1$  和  $L_2$  的共焦面上沿焦斑扫描线放置有

透过率分布的空间光强调制器,则可实现激光脉冲波形的整形。现用得到的电光偏转器的矩阵表达式对这个系统的光束复原问题进行研究。

参考平面  $RP_3$  和  $RP_4$  为  $4f$  系统的主平面,设电光偏转器的端面距  $4f$  系统的前后主平面的距离为  $\Delta Z$ ,则经过整形系统后光束的位置和角度有如下关系:

$$\begin{pmatrix} X_{out} \\ \theta_{out} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{L_2}{n_e} & \Delta X_{D2}(t) \\ 0 & 1 & \Delta \theta_{D2}(t) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \Delta Z & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \Delta Z & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{L_1}{n_e} & \Delta X_{D1}(t) \\ 0 & 1 & \Delta \theta_{D1}(t) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_{in} \\ \theta_{in} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -1 & -2 * \Delta Z - \frac{L_1 + L_2}{n_e} & \Delta X_{D2}(t) - \Delta X_{D1}(t) - \left( 2 * \Delta Z + \frac{L_2}{n_e} \right) * \Delta \theta_{D1}(t) \\ 0 & -1 & \Delta \theta_{D2}(t) - \Delta \theta_{D1}(t) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_{in} \\ \theta_{in} \\ 1 \end{pmatrix}$$

其中

$$\Delta X_{Di}(t) = -\frac{1}{4} * \frac{C_s}{D_i^2} * n_e^2 * \gamma_{33} * V_i(t) * L_i^2$$

$$\Delta \theta_{Di}(t) = -\frac{1}{2} * \frac{C_s}{D_i^2} * n_e^3 * \gamma_{33} * V_i(t) * L_i$$

文献[2]中使用的电光偏转器的材料为  $\text{LiNbO}_3$ ,  $n_e = 2.16$ ,  $\gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ ,  $C_s = 3.858$ ,通光孔径  $D$  设计为 4 mm,偏转器的长度  $L$  为 3 cm,加载 10 kV 的电压后,偏转器偏转约 37.8'。

光束复原的意思就是要使电光偏转器产生偏折前后整形系统输出的光束的位置和方向保持一致,即光束的出射位置和角度不随时间变化,对于上述系统的矩阵表达式来说,也就是必须同时满足条件:

$$\Delta X_{out}(t) = \Delta X_{D2}(t) - \Delta X_{D1}(t) - \left( 2 * \Delta Z + \frac{L_2}{n_e} \right) * \Delta \theta_{D1}(t) = 0 \quad (10)$$

$$\Delta \theta_{out}(t) = \Delta \theta_{D2}(t) - \Delta \theta_{D1}(t) = 0 \quad (11)$$

上述条件实际上对驱动偏转器的电脉冲、电光偏转器参数和位置三个独立部分提出了要求,下面就这三个方面分别进行讨论。

为了使两个偏转器上加载的电脉冲电压相等,精确同步,用可靠快速的冷阴极管高压脉冲

发生器产生电脉冲,通过电缆接口一分为二,分别去驱动两个电光偏转器,控制电缆的长度,以补偿激光脉冲通过偏转器之间光程所需的时间,实现电光脉冲的精确同步。

然而实际加载于偏转器上的电脉冲前沿有形式:

$$V(t) = V_0 \left[ 1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_s + \tau_r}\right) \right] * u(t)$$

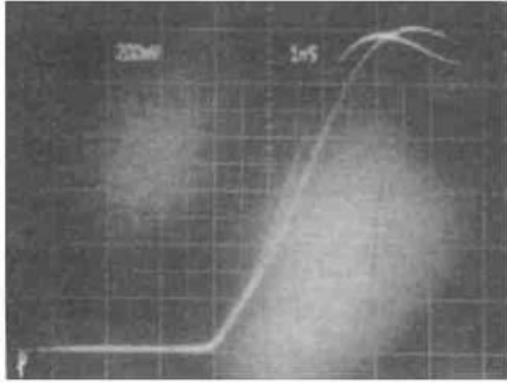
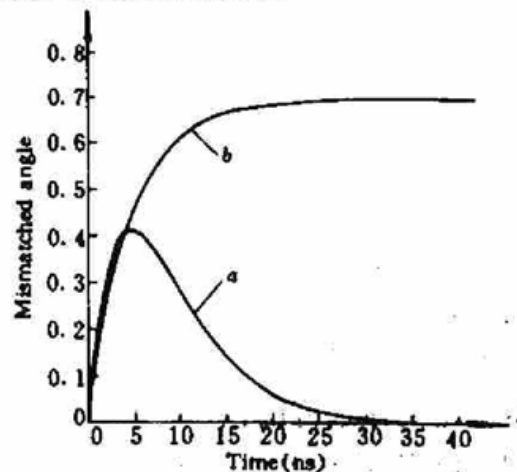


Fig. 3 Rising edges of electrical pulses added to the deflectors with different equivalent capacities

其中  $\tau_s$  是电脉冲信号本身的上升时间,一般为 1 ns 左右,  $\tau_r$  为电光偏转器的响应时间,由电光偏转器的等效电容和电缆特征阻抗决定,  $V_0$  为脉冲电压,  $u(t)$  为单位阶跃脉冲,表示  $t < 0$  时偏转器上没有电压。这就要求在实际加工电光偏转器的电极时必须使偏转器对的等效电容相等。图 3 表示因偏转器对的等效电容不同而导致加载的电压上升有快慢,这样使得通过整形系统的光束的出射角度产生动态漂移。用上述电光偏转器的参数,但一个偏转器的等效电容为 70 pf,另一个为 78 pf 时,依据得到的模型计算,光束角度漂移的过程如图 4 曲线 a 所示,漂移角度的单位用波长为 1.06  $\mu\text{m}$  的受偏转器孔径限制的光束的衍射极限全角的倍数来表示。这一因素导致漂移的特点是系统出射光束经过快速的偏向后达到最大值,然后慢慢回复到原来的方向。光束的出射位置也有相应的变动。

过程如图 4 曲线 a 所示,漂移角度的单位用波长为 1.06  $\mu\text{m}$  的受偏转器孔径限制的光束的衍射极限全角的倍数来表示。这一因素导致漂移的特点是系统出射光束经过快速的偏向后达到最大值,然后慢慢回复到原来的方向。光束的出射位置也有相应的变动。

Fig. 4 Variation of the mismatched angle of the light beam output from the pulse shaping system versus time. The mismatched angle is measured by times of the full diffraction-limited angle of the aperture of the deflector. a; due to disaccord of efficiency capacity of the deflectors. b; due to disaccord of optical parameter of the deflectors



在激光脉冲整形的应用中,电光偏转器对不仅要保证其等效电容的等同,而且也需要使两者的光学参数一样,也即必须控制加工过程中的误差,使偏转器的长度和孔径尽量一致。给偏转器镀上电极和光学加工引入误差也会导致偏转器对失配,因此而引起的整形系统的出射光束角度的动态漂移情况如图 4 曲线 b 所示,其特点是光束飘移到某一角度后就不再改变。

即使电光偏转器对的所有性能一样,从式(10)可知,只有满足  $\Delta Z = -\frac{L_2}{2 * n_s}$  时,光束才能彻底复原,否则尽管出射光束的角度和原方向一样,但光束的位置随时间而变化,变化的幅度和失调的距离成正比。

如果以上的条件同时得到满足,则整形系统等效为一直角反射棱镜。只有这样整形系统输出的激光脉冲不仅在时间上强度的变化满足需要,而且保证了其空间上光束方向的一致性。

## 参 考 文 献

- 1 C. L. M. Ireland. The use of a LiNbO<sub>3</sub> deflector in a ~100 ps resolution streak camera. *Opt. Commun.*, 1978, 27 : 459~562
- 2 许发明, 陈绍和, 陈兰荣等. 用快速电光偏转器对激光脉冲削波. *中国激光*, 1996, A23(9): 811~814
- 3 许发明, 范滇元, 陈绍和等. LiNbO<sub>3</sub> 电光偏转器的研究. *光学学报*, 1996, 16(3): 369~372

## Matrix Expression for Electro-optic Deflector and Application

Xu Faming Chen Shaohe Fan Dianyuan Deng Ximing

(Shanghai Institute Optic and Fine Mechanism, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** Using a light ray tracing, this paper presents the matrix expression for an electro-optic deflector. It is the extension of the famous *ABCD* matrix expression for Gaussian optics, but includes the possibility of considering a time-dependent element for the deflector. A pulse shaping system is studied with theory of matrix optics, which is constructed mainly by a pair of deflectors. Finally make demands on the accordance of two deflectors' parameters, synchronization precision between electronical pulses added to the deflectors, and positions of the deflectors in the pulse shaping system are presented.

**Key words** electro-optic deflector, matrix optics, time-dependent system

.....

## 第一届《计量科技优秀论文评选》征集通知

为提高计量科研技术人员和管理干部的专业水平,进一步开展计量学科技学术交流,弘扬学术精神,为中青年科技工作者提供在本领域中进一步提高发展的机会,中国计量测试学会和中国技术监督情报研究所共同主办《计量科技优秀论文评选》活动。

本次论文评选范围包括:1992~1995年在计量专业论文集、学报、期刊、会议录上发表的各种理论研究、应用及计量管理文章;未发表过的论文也可直接参加评选。评委由中国计量测试学会各专业委员会委员及有经验的编辑组成。论文征集截止到1996年12月30日,评选为优秀论文的文章;发给作者优秀论文证书一册,还将出版优秀论文专辑(具体事宜另行通知)。有意参加者请与《计量测试文摘》编辑部张维、康金玉联系,电话64220321,64219988转322或将文章打印,注明发表刊物名称、年、卷、期及所属专业连同评选费80元整直接寄往北京和平里西街甲2号《计量测试文摘》编辑部,邮编100013。

《计量测试文摘》编辑部

1996年10月2日