

文章编号: 0253-2239(2006)02-0290-4

# 激光偏振编码制导中铌酸锂晶体编码技术研究\*

周木春 陈延如 赵 琦 袁兴起

(南京理工大学电光学院, 南京 210094)

**摘要:** 针对激光驾束制导系统光束能量调制方式的原理缺陷, 讨论了用铌酸锂晶体的电光效应实现空间偏振编码的原理。对铌酸锂晶体的电光效应进行了理论分析, 在此基础上设计了基于普科尔效应的空间偏振编码调制器。确定了 X 轴方向加电场的最佳运用方式, 使得经过编码器后的线偏振光具有理想的偏振态梯度分布。对接收数据处理方式进行了讨论, 得到了差和比方式对旋转不敏感的结论。在实验室中用可见光进行了近场实验, 获得了从最上方近似右旋圆偏振光到中间的线偏振光再到最下方的左旋圆偏振光的偏振态分布。实验曲线表明获得了与理论计算基本一致的结果。

**关键词:** 物理光学; 编码器; 偏振编码; 驾束制导; 电光晶体

中图分类号: O439; O436.3 文献标识码: A

## Study on Encoding Using LiNbO<sub>3</sub> Crystal in Laser Polarization Encoding Guidance

Zhou Muchun Chen Yanru Zhao Qi Yuan Xingqi

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

**Abstract:** In order to solve the theoretical limitation of laser beam energy modulating commonly applied in existing laser beam-rider guidance system, the principle of realization of space polarization encoding and decoding using lithium niobate (LiNbO<sub>3</sub>) crystal for its electrooptic effect is studied. The electrooptic effect of LiNbO<sub>3</sub> crystal is analyzed, based on which a modulator used in space polarization encoding system is designed. And applying the electric field in X direction is found to be the best means to make linear polarization have an expected polarization gradient distribution after passing encoder. Discussion of received data processing way proves that the difference over sum method is independent of rotation. Near field experiments using visible light in laboratory have got polarization states varying through approximately right-handed circular polarization on the top of the beam to the linear polarization at the center of the beam and then to left-handed circular polarization at the bottom of the beam. The curves of experiments show that experimental results accord with theoretical calculation basically.

**Key words:** physical optics; encoder; polarization encoding; beam-rider guidance; electrooptic crystal

### 1 引 言

激光驾束制导是激光制导中的一种指令制导技术, 编码方式是驾束制导技术的核心。现有应用编码方式有轮盘扫描、条束扫描、飞点扫描等<sup>[1]</sup>, 本质上都是对激光辐射强度进行空间调制编码, 它们存在共同的缺点: 机械调制速度的限制, 无法满足更高飞行速度的要求; 激光能量损失大, 对激光光源要求严格; 对烟尘干扰敏感, 导致实际制导的精度下降。针对上述问题, 各国都在进行新的编码方式的

研究, 美国在上世纪后期提出了空间偏振编码概念<sup>[2]</sup>。国内廉汝林、冯显杰等作了许多工作<sup>[3]</sup>。本文研究了用铌酸锂电光晶体制作编码器, 并通过实验实现了空间偏振编码。

### 2 空间编码理论分析

偏振编码原理如图 1 所示, 由激光光源输出一线偏振光, 沿光的传输轴上放置一对垂直和水平偏

\* 国家自然科学基金(50176020)和南京理工大学科研发展基金(XKF05024)资助课题。

作者简介: 周木春(1980~), 男, 河南信阳人, 助教, 主要从事光电信息探测方面的研究。E-mail: mczhou@sohu.com

收稿日期: 2004-12-24; 收到修改稿日期: 2005-06-16

码器,分别对入射光进行相位调制,在相对光轴不同位置产生不同椭圆度和旋转方向的椭圆偏振光,经发散光学系统后在二维空间形成偏振态梯度分布的光场,编码过程(以 Y 轴方向为例)为

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{G} \times \mathbf{E}_1, \quad (1)$$

$$\text{式中 } \mathbf{G} = \cos(\delta/2) \begin{bmatrix} 1 & i \tan(\delta/2) \\ i \tan(\delta/2) & 1 \end{bmatrix},$$

为编码器的琼斯矩阵,  $\mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$  表示沿 Y 轴方向振动的线偏振光,经编码的出射光为

$$\mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} i \sin(\delta/2) \\ \cos(\delta/2) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$\delta$  即为编码器产生的相位差,是 Y 方向位置函数。光经过编码器后就携带了方位信息。

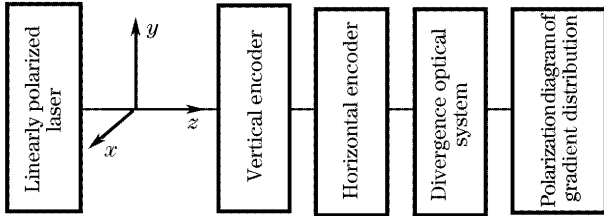


图 1 空间偏振编码示意图

Fig. 1 Schematics of space polarization encoding

对 X 方向的分析可得到同样的结果,垂直和水平编码器的输出信号合成后形成二维信息光场,为避免相互干扰,可采用分时或调频的办法。

飞行器在激光束中飞行,接收器根据偏振图检测出相对光轴的位置,控制飞行器沿瞄准线飞行。

显然编码器件是整个系统的核心。编码器负责实现光的偏振态和空间位置的对应关系。

### 3 编码器设计

考虑到铌酸锂晶体质地坚硬,不溶于水,不易潮解,机械性能好,掺杂后具有较高的抗光损伤阈值<sup>[4,5]</sup>,选其作为编码器材料。作电光晶体使用时,铌酸锂晶体在不同加电方式和通光方向下电光效应的结果相差很大。

第一种方式,电场沿 Z 轴施加,  $E_x = E_y = 0$ ,  $E_z = E$ 。加电后晶体折射率主轴轴向不变,主折射率大小改变<sup>[6]</sup>,如图 2 所示。

纵向运用时没有相位差产生,横向运用时通过长为  $l$  的晶体后产生的相位差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n'_z - n'_x)l = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)l + \frac{\pi}{\lambda}(\gamma_{13} - \gamma_{33})n_o^3 El, \quad (3)$$

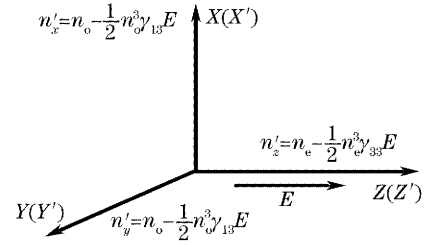


图 2 电场沿 Z 轴作用下晶体的主折射率变化图  
Fig. 2 Change of major refraction indexes when the electric field is applied in Z direction

式中  $n_e$  易受温度的影响,则  $\delta = \delta(T, l)$ , 成为温度  $T$  和长度  $l$  的函数,环境温度的变化将影响  $\mathbf{G}$  的稳定性。

第二种方式,电场沿 X 轴施加时,  $E_x = E_y = 0$ ,  $E_x = E$ 。加电后晶体的折射率椭球改变,长短轴旋转  $45^\circ$ ,同时主折射率大小也发生变化<sup>[5]</sup>,如图 3 所示。

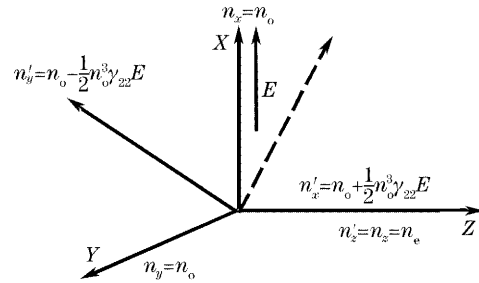


图 3 电场沿 X 轴作用下晶体的主折射率变化图  
Fig. 3 Change of major refraction indexes when the electric field is applied in X direction

当偏振方向沿 Y 轴的线偏振光沿 Z 轴传播时,  $X'$  轴和  $Y'$  轴向振动的等幅线偏振分量有着不同的传播速度,穿过长  $l$  的晶体后引起相位差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n'_x - n'_y)l = \frac{2\pi}{\lambda}n_o^3 \gamma_{41} El, \quad (4)$$

$\delta$  仅是  $l$  的函数,线偏振光通过晶体后被调制,变成椭圆偏振光,椭圆度跟晶体的长度有关,实际选择了第二种方式。为得到偏振态的梯度分布,把晶体加工成两块几何参量一样但 X、Y 轴的方向相反的晶块,如图 4 所示。光通过后在不同的高度产生线性变化的相位差。

研制中两个晶块的组合非常关键。最简单的办法是胶粘,但研究发现,胶层会影响光的偏振特性,产生较强的退偏振,胶层的抗光损伤阈值较低。解决这一问题的最理想方法是光胶,但光胶性能不稳定,无法实用。这里用机械方法对准,但中间不可避免有空气层。综合考虑光能量的透过率、空气层厚度、半波电压等影响,确定编码器尺寸必须满足  $H/L > 2.7$ 。

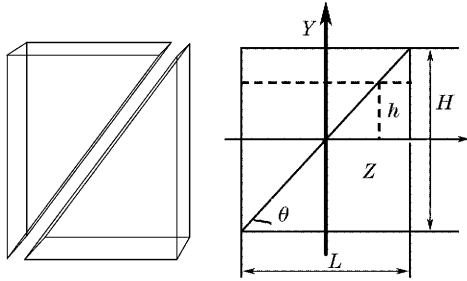


图 4 晶体组合图和侧视图

Fig. 4 The three-dimensional elevation and side view of the polarization encoder

计算可得线偏振光通过长为  $L$ , 高为  $H$  的晶体, 在  $h$  处产生的相位差为

$$\delta = 4\pi n_o^3 \gamma_{22} ELh / (\lambda H), \quad (5)$$

由(5)式和(2)式可知,  $\delta = \delta(h)$ , 经过编码器后成为垂直位置的线性函数,  $\delta$  对应不同的椭圆偏振光, 则从晶体上半部分出射的光由线偏振光逐渐过渡到右旋圆偏振光, 下半部分则由线偏振光过渡到左旋圆偏振光。偏振态分布如图 5 所示。同样可得到光通过水平编码器后在左右方向的偏振态分布如图 6 所示。光通过晶体后就携带了位置信息, 从而实现了编码。

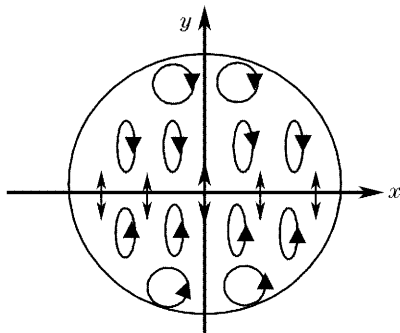


图 5 垂直方向的远场偏振图

Fig. 5 Far field polarization state distribution in vertical direction

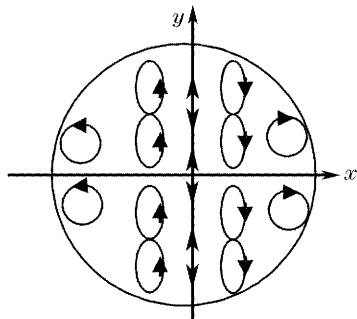


图 6 水平方向的远场偏振图

Fig. 6 Far field polarization state distribution in horizontal direction

接收器的解码装置, 由光学系统和解码电路组成, 如图 7 所示。把光信号转变成电信号, 驱动接收器控制在远场空间飞行的飞行器实现制导。光学系统由接收望远镜、偏振片、波片等构成。四分之一波片把圆偏振变成线偏振, 左圆偏振光变成线偏振分量, 而右圆偏振则变成与前述线偏振光垂直的线偏振分量。经过分束棱镜和两个线偏振滤波片<sup>[7]</sup>, 分别送至两个光电探测器。

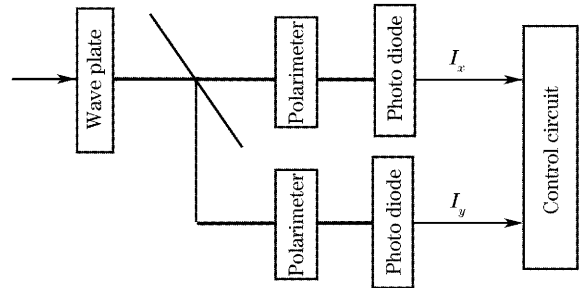


图 7 解码过程示意图

Fig. 7 Schematics of polarization decoding process  
解码过程为

$$\mathbf{E}_3 = \mathbf{G} \times \mathbf{E}_2, \quad (6)$$

式中  $\mathbf{E}_2$ 、 $\mathbf{E}_3$  分别代表入射光矢量和出射光矢量,  $\mathbf{G}$  为接收机光学系统的琼斯矩阵, 光电探测器的输出光电流分别为  $I_x, I_y$ 。则可求得

$$I_x = E_{3x} \times E_{3x}^* = K[\sin(\delta/2) + \cos(\delta/2)]^2, \quad (7)$$

$$I_y = E_{3y} \times E_{3y}^* = K[\cos(\delta/2) - \sin(\delta/2)]^2, \quad (8)$$

为消除系数  $K$  的影响, 这里有两种数据处理方法, 一种是直接相除, 另一种是用差和比的方法, 结果分别如下:

$$I_x/I_y = \tan^2(\delta/2 + \pi/4), \quad (9)$$

$$(I_x - I_y)/(I_x + I_y) = \sin \delta, \quad (10)$$

比较可知, 前一种方法处理数据变化范围远大于后一种方法, 不便于后续电子电路的处理。而且可以证明, 采用差和比的处理方式, 制导系统对接收器的旋

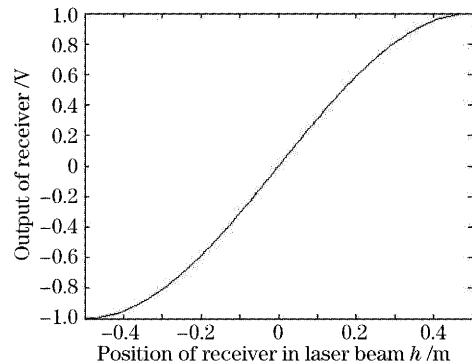


图 8 位置和输出信号的关系曲线

Fig. 8 Relation curve of position and output

转不敏感,因而具有更广泛的应用范围。这里采用第二种方法,设差和比信号为  $f$ ,由(5)式和(10)式可知, $f$  为零,表明在光束的正中心, $f > 0$ ,表示在光束上方, $f = 1$  在光束上边缘; $f < 0$  表示在光束下方, $f = -1$  对应在光束下边缘。输出信号  $f$  和接收器的位置  $h$  具体关系如图 8 所示。

## 4 测试结果

实验在实验室中进行,考虑方便调试这里采用可见光,光源选 He-Ne 激光器(波长 632.8 nm)实验原理如图 9 所示,其中检测仪器固定在三维平台,可精确测量上下左右位置。

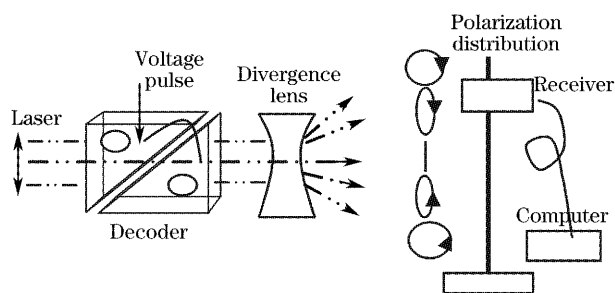


图 9 实验过程示意图

Fig. 9 Schematics of experiment

晶体处入射光斑直径为 0.5 cm,远场光斑直径为 3 cm,在垂直方向每 3 mm 取一个点测试,所得结果见图 10。图中横坐标表示探测点的位置,纵坐标表示接收机输出的差和比信号。在光束中心(24.5 cm处),测得数据接近为零,为线偏振光,从光束中心向下测量,信号为负,为左旋椭圆偏振光。输出值逐渐变大,在边缘,获得接近圆偏振的偏振光。从光束中心向上测量,数值大小基本对称,符号相反,为旋转方向相反的圆偏振光。对照图 6 可知,

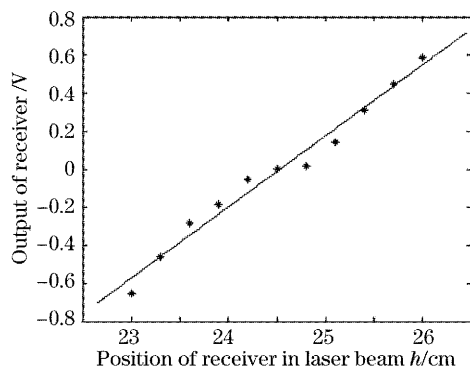


图 10 实验结果

Fig. 10 Experimental result

实验结果与理论规律一致。由理论曲线知在光束中心具有较好的线性度,实验曲线在中心略有波动,这与测量的精度有关,在误差允许范围内。实验曲线的两端没有获得完全的圆偏振光,这是由于晶体的电光系数比理论值小造成的,实验发现提高调制电压可以获得完整的正弦曲线。在实际应用时,选取中间线性区更方便接收处理。实验在不同的室温环境中进行,都能获得类似的曲线。

## 5 结 论

本文从理论和实验两个角度研究表明采用铌酸锂电光晶体做编码器实现光的空间偏振编码,横向加电压是最理想的方式。实验证明编码器中心相位差为零的位置到两侧相位差为  $45^\circ$  的区间,输出信号线性好,适合作为工作区。在实际应用中,还要进一步提高铌酸锂晶体的光学性能。

## 参 考 文 献

- Deng Renliang. *Optics Guiding Technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1992. 176~190 (in Chinese)  
邓仁亮. 光学制导技术[J]. 北京: 国防工业出版社, 1992. 176~190
- Zhang Chengquan. *Enchiridion of Laser Apparatus Used in Overseas Army* [M]. Beijing: Enginery Industry Press, 1989. 205~229 (in Chinese)  
张承铨. 国外军用激光仪器手册[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1989. 205~229
- Feng Xianjie, Bao Zhenwu, Li Xiangyin. Study of special encoder using polarized light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(12): 1652~1655 (in Chinese)  
冯显杰, 鲍振武, 李湘银. 偏振光子编码及解码研究[J]. 光学学报, 2000, **20**(12): 1652~1655
- Seng Fang, Chen Jun, Xia Zongren. A novel method for measuring the laser damage threshold of crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 503~506 (in Chinese)  
盛芳, 陈军, 夏宗仁等. 对晶体光损伤阈值测量的一种新方法的研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(4): 503~506
- Chen Haibo, She Weilong. Temperature dependence of electrooptic modulator and its optimal design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1456~1459 (in Chinese)  
陈海波, 余卫龙. 电光调制器的温度特性及其最优化设计[J]. 光学学报, 2003, **23**(10): 1456~1459
- Li Gongliang, Guo Jihua. *Principle of Crystal Optics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999. 340~344 (in Chinese)  
李恭亮, 郭继华. 晶体光子原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 240~344
- Li Hongxia, Wu Fuquan, Fan Jiyang. An analytical study on modulated intensity's perturbation for the polarizing prisms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1456~1459 (in Chinese)  
李红霞, 吴福全, 范吉阳. 偏光棱镜调制器调制光强扰动的理论分析[J]. 光学学报, 2003, **23**(12): 1456~1459