

新型电光波片

李瑞镛 曹连科

(上海市激光技术研究所)

提要: 报道一种新型的电光波片。与通常的电光调制器相比,它不仅可改变 o 光与 e 光之间的位相差,而且可以通过外加电场改变 o 光与 e 光的振幅比值。该器件可以用作电光旋光器。

A new $e-o$ waveplate

Li Ruiyong, Chao Liankou

(Shanghai Institute of Laser Technology, Shanghai)

Abstract: A new $e-o$ waveplate is reported. Compared with ordinary $e-o$ modulators, this device can control not only the phase difference between o -beam and e -beam, but also the direction of the main axis of the waveplate, i. e. to change the ratio of amplitude of o -beam and e -beam. Hence we can get any states of polarization from one state of polarization using this device. It can also be used as an $e-o$ rotator.

当晶体:

1. 光的偏振态可以用邦加球(Poincare Sphere)面上的点来描述。

设有一个偏振光为:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 e^{i\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta e^{i\phi} \end{pmatrix} \quad (1)$$

表示到邦加球上的 P 点, 则 P 点的径纬度为:

$$\begin{cases} \operatorname{tg} 2\psi = \operatorname{tg} 2\beta \cos \phi \\ \operatorname{tg} 2\chi = \sin 2\beta \sin \phi \end{cases} \quad (2)$$

让这一偏振光通过普通的电光调制器, 当调制器上的电场改变时, 仅改变 o 光与 e 光的位相差而它们的振幅 a_1 与 a_2 却没有变化。故

P 点的斯托克斯参数 $S_1 = a_1^2 - a_2^2 = \text{常数}$, P 点只能在 S_2 为常数的平面与球面相交的小圆上移动。而本文中提出的新器件可以同时改变 a_1 , a_2 以及 ϕ , 因此可得到复盖整个球面的所有偏振态。

我们可以对输出光的电矢量分量进行计算:

$$M_J \cdot \begin{pmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta e^{i\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta' \\ \sin \beta' e^{i\phi'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A + iB \\ C + iD \end{pmatrix}$$

经计算得到:

收稿日期: 1987年5月5日。

$$\begin{aligned}
 A &= \cos \beta (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \cos \delta) \\
 &+ \sin \beta \sin \left(\phi + \frac{\delta}{2} \right) \sin 2\alpha \sin \frac{\delta}{2} \\
 B &= -\cos \beta \sin^2 \alpha \sin \delta + \sin \beta \\
 &\times \cos \left(\phi + \frac{\delta}{2} \right) \sin 2\alpha \sin \frac{\delta}{2} \\
 C &= \cos \beta \sin 2\alpha \sin^2 \frac{\delta}{2} + \sin \beta \\
 &\times [\cos^2 \alpha \cos(\phi + \delta) + \sin^2 \alpha \cos \phi] \\
 D &= \cos \beta \sin 2\alpha \sin \frac{\delta}{2} \cos \frac{\delta}{2} \\
 &- \sin \beta [\cos^2 \alpha \sin(\phi + \delta) + \sin^2 \alpha \sin \phi]
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{cases}
 \beta' = \text{tg}^{-1} [(C^2 + D^2) / (A^2 + B^2)] \\
 \phi' = \text{tg}^{-1} [(AD - BC) / (AC + BD)]
 \end{cases} \quad (4)$$

输出偏振态的振幅之比与位相差由 β' 与 ϕ' 描述, 将其代入(2)式就可算出其在邦加球上的经纬度。图 1 是用计算机对输入光分别为水平偏振光以及左旋圆偏光给出的计算结果, 外加电场的 θ 值连续从 0 变到 2π , 波长产生的位相差 δ 分别取 $\frac{\pi}{4}$ 、 $\frac{\pi}{2}$ 、 $\frac{3\pi}{4}$ 、 π 和 $\frac{5\pi}{4}$ 。从图 1 中可以看到, 输出光的偏振态可以复盖整个球面。

如果入射光为线偏光, 其方位角为 β , 那么出射光就是:

$$M_J \cdot \begin{pmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha e^{i\delta}) \cos \beta + \sin \alpha \cos \alpha (1 - e^{i\delta}) \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \alpha (1 - e^{i\delta}) \cos \beta + (\cos^2 \alpha e^{i\delta} + \sin^2 \alpha) \sin \beta \end{pmatrix}$$

当取 $\delta = \pi$ 时, 上式就化简为:

$$M_J \cdot \begin{pmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(2\alpha - \beta) \\ \sin(2\alpha - \beta) \end{pmatrix} \quad (5)$$

于是当外加电场使波片的位相差为 π 时, 出射光仍将保持线偏振态, 但其方位角发生了旋转。因此该器件可以作为一种旋光器使用。

如果所加的外电场为频率 ω 的交变电场,

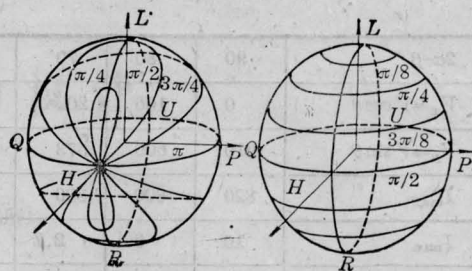


图 1 电光波片对偏振态的变换

左图: 输入光为水平线偏振光;

右图: 输入光为左旋圆偏振光

即 $\alpha = \omega t$, 并在该波片后面放一个检偏器, 其

Jones 矩阵为: $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ 。经过检偏器后的光强为:

$$\begin{aligned}
 I &= \mathbf{E}_o^* \cdot \mathbf{E}_e = \cos^2 \frac{\delta}{2} \cos^2 \beta \\
 &+ \sin^2 \frac{\delta}{2} \cos^2(\omega t - \beta)
 \end{aligned}$$

其中直流项为

$$I_0 = \cos^2 \frac{\delta}{2} \cos^2 \beta + \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (6)$$

交流项为

$$I_{2\omega} = \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\delta}{2} \cos 2(\omega t - \beta) \quad (7)$$

入射线偏光的方位角 β 出现在光强信号中的相位因子中, 可以用相敏检波的方法来检测 β 。这种测量方法可以避免激光噪声及光学系统本身对激光强度的影响而导致的测量误差。因此在高压电场以及高压下的大电流测量方面有潜在的应用前景。

2. 实验所用的晶体材料为铌酸锂, 沿光轴方向切割, 外形尺寸为 $5 \times 5 \times 40$ mm, 在其四个侧面的中心镀上电极(铬+金), 电极宽度为 $d(1 \sim 4$ mm)。测试光源用 $\phi 1.2$ mm 的 He-Ne 激光, 功率 2.2 mW (图 2)。

首先对器件沿 x 轴与 y 轴方向的半波电压进行静态测量, 得到 x 方向半波电压为 605 V, y 方向半波电压为 614 V, 取平均值为 610 V。分别用两组可调直流电压源对两对电极施加电压 V_x 与 V_y , 用带角度读数的偏振

表 1

$2\alpha-\beta$	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
$V_x = V \cos \theta$	0	106	203	305	392	467	528	573	600	610
$V_y = V \sin \theta$	610	600	573	528	467	392	305	209	106	0
I_{\max}	820	800	800	800	790	800	800	810	810	800
I_{\min}	10	6	2.7	5.1	12	23	31	41	21	22
I_{\max}/I_{\min}	82	133	304	157	66	35	26	20	40	36

棱镜测量输出光的两个正交分量。实验数据列于表 1。从表 1 中可看出，输出光与线偏光非常接近，线偏振度在 20 到 304 之间变化。当对所加电压进行微调，可以使输出光的线偏振度提高到 130 以上，最高达到 8889。图 3 表示为了获得与理论计算一致的线偏振光输出，所加电压与计算给出的电压值的曲线。

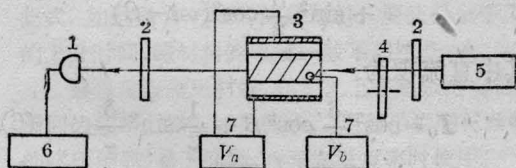


图 2 实验装置

1—硅光电池接收器；2—带 0~360° 读数的偏振棱镜；3—电光波片；4—斩波器；5—He-Ne 激光器；6—HWS-3890 测量放大器；7—加在波片上的正弦和余弦电压

由于输出光的偏振态由波片的主轴方位 α 及位相差 δ 决定，而 α 与 δ 又取决于晶体内的电场方向与强度，因此产生实验误差的主要原因在于晶体内电场的分布。

影响电场分布的一个原因是电极的宽度。因为电极宽度小于电极的间距，所以晶体内的电场分布是不均匀的。当入射光束的直径比较大或入射点偏离晶体中心，都会因为光所经之处的电场改变而导致实验误差。

影响电场分布的另一个原因是因为两对电极间存在静电相互作用，使电极上的电荷分布发生了改变。从实验上来证明这一点是容易的。首先在晶体上镀一对电极，测量其

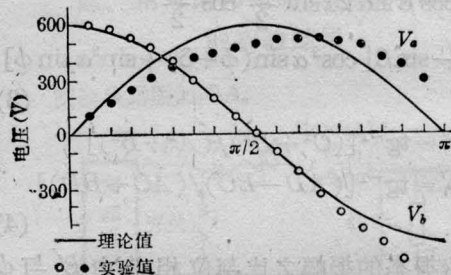


图 3 电光波片用作旋光器时，实际所加的电压与理论值的曲线

半波电压，然后再镀另一对电极，再测量其半波电压，两次测量的结果有明显的差异，不仅半波电压数值而且调制曲线的位置都发生了变化(图 4)。

根据分析，电极的宽度与形状对晶体内电场分布起决定作用。增加电极宽度可使晶体中心部分的电场均匀性改善，但电极宽度受到晶体尺寸的限止，而且由于两对电极上电荷之间的相互作用使电场发生畸变，电极宽度越大，这种影响就越显著。当电极宽度

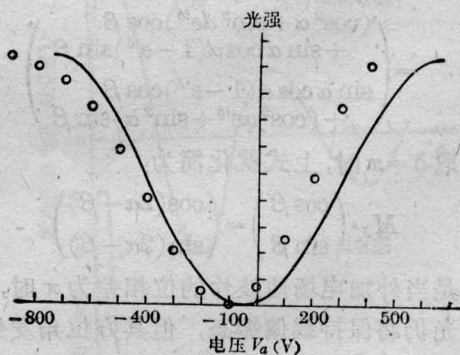


图 4 实线表示一对电极的半波电压；点代表二对电极的半波电压

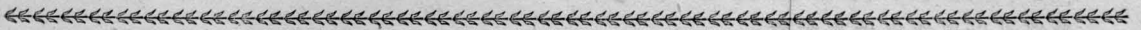
(下转第 589 页)

表2 本实验中的激光输出功率

M_2 对 $1.064\mu\text{m}$ 激光的透过率	连续输出功率(W)		准连续平均输出功率(W)	
	$0.532\mu\text{m}$	$1.064\mu\text{m}$	$0.532\mu\text{m}$	$1.064\mu\text{m}$
11%	1.0	32	16	17
4%	2.8	22	25	8
2%	3.7	18	27	7
全反	6.5	0.3	33	0

下降的迹象。在整个运行过程中,除对 KTP 晶体的放置角度作过微小的调整之外,激光在晶体上的入射位置一直保持不变。激光的光斑直径大约只有 0.5mm , 而 KTP 的通光面是 $6\times 6\text{mm}^2$, 所以激光在 KTP 晶体上的

入射位置有很大的选择余地。上述的实验是基于入射位置不变的基础上的, 如果选用一个新的入射位置, 上述的实验现象将会重复出现。



(上接第 592 页)

减小, 虽然电极间相互作用同时减小, 但窄电极本身产生的电场在晶体中心的均匀性却变差。我们用宽度为 2.5mm 、 2mm 、 1mm 的电极分别进行了实验。在只有一对电极与有两对电极的情况测得的半波电压分别为: $592/603$ 、 $627/639$ 、 $765/775\text{V}$ 。这表明当电极宽度减小使晶体中心电场减小, 从而半波电压升高, 在有两对电极的情况下, 晶体中心的电场同样会减小, 表现出半波电压的升高。

对于具有不同宽度电极的晶体, 我们用计算机分别计算了晶体内部的等势线分布。当电极宽度为晶体宽度的 $\frac{1}{10}$ 时, 晶体中心

等势线很疏, 即电场强度很小, 半波电压很高; 当电极宽度接近晶体宽度时, 晶体四角电场强度很大, 远大于中心区域的电场。因此我们选用电极尺寸为晶体宽度的 $\frac{1}{2}$ 。此外受到等势线轮廓的启发, 我们制作了一个具有凹面电极的器件, 晶体尺寸为 $7\times 7\times 40\text{mm}$, 电极形状与某一等势面重合, 为 $R=3.6$ 的圆柱面, 电极宽度为 5mm 。使用这种凹面结构, 可以取比较宽的电极, 这里已经超过了晶体宽度的二分之一。目前我们正在用这一器件对线偏光进行相位检测, 获得了初步的理想结果, 将于以后作详细报道。