

文章编号: 0258-7025(2005)03-0319-04

# 入射光偏振方向对 LiNbO<sub>3</sub> 晶体近光轴 电光调制的影响

宋 哲, 刘立人, 周 煜, 刘德安, 任海霞  
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 分析了在垂直 LiNbO<sub>3</sub> 晶体光轴方向加电压, 光沿近光轴方向传播时, 入射光偏振方向对电光调制器的影响。通过计算加电场后双折射光程差的变化和偏光振动方向的转动, 画出在正交偏振镜下不同起偏方向的锥光干涉图, 得到干涉图随起偏方向变化的规律: 由偏光振动方向转动引起的消光区域随起偏方向的转动而转动, 在起偏和检偏方向上始终消光, 在与起偏方向成  $\pm 45^\circ$  角方向始终全透光, 并且消光线的交点即感应双光轴头不随起偏方向的转动而变化, 始终在折射率变大的感应主轴上。

**关键词** 激光技术; 电光调制; 近光轴; LiNbO<sub>3</sub> 晶体

**中图分类号** O 436.4 **文献标识码** A

## Effect of the Polarization Direction of Incident Light on Electro-Optic Modulator for Light Propagating near the Optic Axis in LiNbO<sub>3</sub>

SONG Zhe, LIU Li-ren, ZHOU Yu, LIU De-an, REN Hai-xia

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

**Abstract** The electro-optic effect in LiNbO<sub>3</sub> crystal has been analyzed for light propagating near the optic axis with any polarization direction and for an electric field direction perpendicular to the optic axis. The passive and the electrically induced birefringences and the rotation of polarization direction have been calculated, and the conoscopic interference figures under orthogonal polariscopes for different polarization directions and a field in  $x$ -axis of LiNbO<sub>3</sub> have been plotted. The extinction areas caused by the rotation of polarization direction change with the polarization direction of light, but the two heads of the induced optical axes do not vary, which are always on the induced principal axis with bigger refractive index. The directions of polariscopes are always extinction, and the  $\pm 45^\circ$  directions with polariscopes always have the maximum intensity. The conoscopic interference figures have been demonstrated experimentally by rotating polariscopes directions, which are accord with the theoretically calculating plots.

**Key words** laser technique; electro-optic modulation; near optical axis; LiNbO<sub>3</sub> crystal

## 1 引 言

LiNbO<sub>3</sub> 晶体作为电光开关和电光调制器的最佳材料之一, 它的电光特性不断被人们研究。由于光沿光轴传播时的电光效应是线性的, 且没有自然双折射, 因此被广泛应用在电光开关和电光调制器

中。但它要求光束沿光轴传播, 在实际应用中必须严格校准, 因此研究光沿近光轴传播时的电光效应是有意义的。Fay<sup>[1]</sup>研究了圆偏振光近光轴传播时的电光效应, 因此只考虑了感应双折射引起的光程差对调制器的影响, 没考虑偏光振动方向转动的影响。文献[2]只研究了入射光偏振方向与感应主轴

收稿日期: 2003-09-28; 收到修改稿日期: 2003-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(60177016)和国家科技部(2002CCA03500)资助课题。

作者简介: 宋 哲(1974—), 女, 辽宁人, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事光学互连网络和光学信息处理方面的研究。E-mail: songzhe@mail.siom.ac.cn 或 zhesong@eyou.com

成  $45^\circ$  时的近光轴电光效应, 给出光程差和偏光振动方向转动对调制器的影响。本文在此基础上, 分析了入射光偏振方向与感应主轴成任意角时的近光轴电光效应, 得到调制器输出光强随起偏方向变化的规律。目前  $\text{LiNbO}_3$  晶体在电光开关中的应用还仅限于光沿光轴传播时的情况<sup>[3~5]</sup>, 因此本文的研究对于拓展  $\text{LiNbO}_3$  晶体在电光开关和电光调制器中的应用是有意义的。

## 2 近光轴电光调制

$\text{LiNbO}_3$  晶体的近光轴电光效应是指在晶体  $x-y$  面内加电场, 光沿偏离光轴一个小角度  $\theta$  的方向传播时折射率随电场变化的效应, 这一变化可以借用折射率椭球来描述。即垂直于光波矢方向并通过椭球中心的平面与椭球相交的截面为一椭圆, 其两主轴方向就是该传播方向上的两个偏振方向, 长度等于它们的有效折射率。如图 1 所示,  $z$  为光轴方向,  $z''$  为光波矢方向, 剖面线的椭圆垂直于波矢, 其主轴方向  $(x''', y''')$  为此光束的两个偏振方向, 它们的折射率为  $n_{x''}$  和  $n_{y''}$ ,  $x', y'$  为感应主轴方向, 图中起偏方向和检偏方向分别为  $x$  轴和  $y$  轴。根据折射率椭球方程可以求出在  $x-y$  面内加电场  $E$  后的双折射光程差和偏光振动方向<sup>[2]</sup>。

双折射光程差

$$\Gamma = \Delta n \cdot l = (n_{x''} - n_{y''}) \cdot l = \frac{n_o^3 l}{2} [(\Delta \sin^2 \theta - 2\gamma_{22} E)^2 + 8\gamma_{22} E \Delta \sin^2 \phi \sin^2 \theta]^{1/2}, \quad (1)$$

偏光振动方向

$$\tan 2\beta = \frac{2\gamma_{22} E \sin 2\phi}{2\gamma_{22} E \cos 2\phi - \Delta \sin^2 \theta}, \quad (2)$$

其中  $\Delta = \frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_o^2}$ ,  $n_o$  和  $n_e$  分别为晶体内  $o$  光和  $e$  光的主折射率,  $l$  为晶体光轴长度,  $\gamma_{22}$  为电光系数,  $\phi$  为光波矢偏离感应主轴的角度 (若电场方向与  $x$  轴成  $\omega$  角, 则感应主轴绕光轴旋转了  $\xi$  角,  $\xi = (90^\circ - \omega)/2$ , 如图 1(b) 所示),  $\beta$  为偏光振动方向转动的角度。

当光束偏离光轴时, 若无电场, 光束的偏振方向一个在主截面内, 另一个与之垂直; 加电场后, 偏振方向一般不在主截面内 (或垂直方向), 即偏光振动方向发生了转动。这种现象对调制器的影响很大。对于正交偏振镜下的调制器, 其调制度为

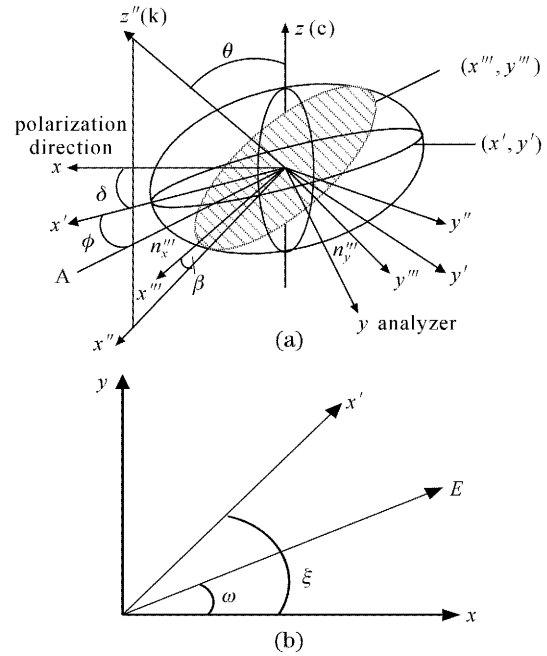


图 1 折射率椭球及电光效应

Fig. 1 Index ellipsoid and electro-optic effect

$$\frac{I_2}{I_1} = \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\pi}{\lambda} \Gamma, \quad (3)$$

式中  $\lambda$  为真空中的波长,  $I_1$  为输入光强,  $I_2$  为输出光强,  $\alpha$  为晶体内偏光振动方向与起偏方向的夹角。若起偏方向与感应主轴  $x'$  的夹角为  $\delta$ , 则  $\alpha = \delta + \phi - \beta$ 。因此入射光偏振方向和偏光振动方向的转动主要是通过  $\sin^2 2\alpha$  项影响调制度的,  $\sin^2 2\alpha = 1$  表示调制度最大,  $\sin^2 2\alpha = 0$  表示完全消光, 没有调制作用。由感应双折射引起的光程差变化对调制度的影响表现在  $\sin^2 \frac{\pi}{\lambda} \Gamma$  项,  $\Gamma$  为半波长整数倍时,  $\sin^2 \frac{\pi}{\lambda} \Gamma = 1$ , 调制度最大,  $\Gamma$  为波长整数倍时,  $\sin^2 \frac{\pi}{\lambda} \Gamma = 0$ , 调制度最小。

入射光的偏振方向、感应双折射和偏光振动方向的转动对调制器的影响可以用光轴干涉图来表现。光程差等位线和偏光振动方向转动引起的消光等位线 (即光轴干涉图) 可以在极坐标  $(\rho, \phi)$  中画出。设

$$f = \frac{\Gamma}{\lambda} = \left[ \left( \frac{n_o^3 l}{2\lambda} \right)^2 \Delta^2 \sin^4 \theta + \left( \frac{n_o^2 l}{2\lambda} \right)^2 (2\gamma_{22} E)^2 - 4 \left( \frac{n_o^3 l}{2\lambda} \right)^2 \gamma_{22} E \Delta \sin^2 \theta \cos 2\phi \right]^{1/2}, \quad (4)$$

当  $f = 1, 2, 3, \dots$  时, 表示光程差为波长的整数倍, 在正交偏振镜下是暗环, 当  $f = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$  时, 表

示光程差为半波长的整数倍,在正交偏振镜下是亮环.由于 $\theta$ 很小,可以令 $\rho = \sqrt{\frac{n_o^3 l}{2\lambda} \Delta \sin^2 \theta} \approx \sqrt{\frac{n_o^3 l}{2\lambda} \Delta \theta^2}$ , $\rho$ 表示偏离光轴 $\theta$ 角的光所产生的光程差, $d = \frac{n_o^3 l}{2\lambda} (2\gamma_{22} E) = \frac{1}{2} \frac{V}{V_{1/2}}$ , $d$ 表示所加电压与半波电压的比值,则(4)式可表示为

$$f = (\rho^4 - 2\rho d \cos 2\phi + d^2), \quad (5)$$

(2)式可表示为

$$\rho^2 = d \cos 2\phi - d \sin 2\phi / \tan(2\delta + 2\phi - 2\alpha), \quad (6)$$

若令 $\sin^2 2\alpha = 0.5$ 为消光宽度,则根据(5),(6)式可求出各种情况下的光轴干涉图.当 $d = 0$ 时,表示无电场时的光轴干涉图,此时 $f = \rho^2, \beta = 0$ ,在 $\phi = \pm 45^\circ/2 - \delta$ 或 $\pm(90^\circ - 45^\circ/2) - \delta$ 时, $\sin^2 2\alpha = 0.5$ ,在 $\phi = -\delta$ 或 $90^\circ - \delta$ 时, $\sin^2 2\alpha = 0$ ,在 $\phi = \pm 45^\circ - \delta$ 时, $\sin^2 2\alpha = 1$ ,图2是在 $x$ 方向起偏时的光轴干涉图.当 $d = 1/2$ 时,表示加半波电压时的光轴干涉图,图3给出在 $x$ 方向加电场,即感应主轴旋转 $45^\circ$ ,起偏方向与感应主轴分别成 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 和 $60^\circ, f = 1, 2, 3, 4, 5$ 时的光轴干涉图,图中点划线是垂直于光轴的椭圆截面( $x-y$ 面)的原主轴方向和感应主轴方向,虚线是 $\sin^2 2\alpha = 1$ 的双曲线的渐近线.

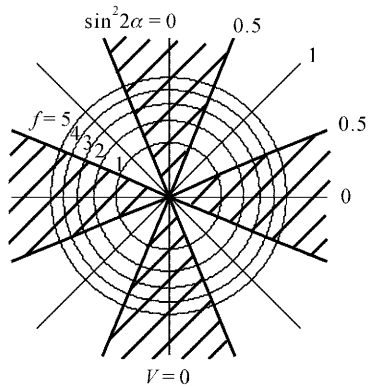


图2 无电场时的等光程差等位线和消光线

Fig. 2 Contours of equal optic path difference and extinction when no electric field is applied

### 3 分 析

对图2,3和式(1),(2)的分析如下:

1) 无电场时只存在自然双折射, $\Gamma_0 = \frac{n_o^3 l}{2} \Delta \sin^2 \theta, \beta = 0$ ,光程差等位线是一系列同心圆环,消光线是一系列十字,并通过起偏和检偏方向.

2) 加电场后,由于感应双折射,光程差等位线变成一系列同轴椭圆环,椭圆的主轴即是感应主轴.

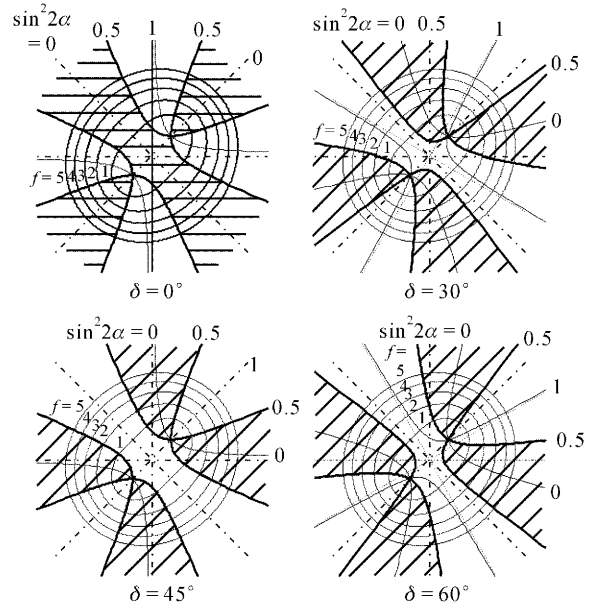


图3 加电场时的等光程差等位线和消光线

Fig. 3 Contours of equal optic path difference and extinction when an electric field is applied

在光轴方向上, $\Gamma = n_o^3 \gamma_{22} E l$ ,在感应主轴方向上, $\Gamma = \Gamma_0 + n_o^3 \gamma_{22} E l$ ,光程差随电场的变化是线性的,电压变化一个半波电压,光程差也变化一个半波长.在其他方向上已失去线性电光效应.

3) 加电场后,由偏光振动方向转动引起的消光线由十字线变成双曲线,均通过感应双光轴头,说明在感应光轴方向上无偏振性质,相当于光学各向同性介质.

4) 由偏光振动方向转动引起的消光区域随起偏方向的转动而转动,而感应双光轴头不随起偏方向的转动而变化,始终在折射率变大的感应主轴上,即椭圆的长轴上.在起偏和检偏方向上始终消光;在与起偏方向成 $\pm 45^\circ$ 角方向始终有 $\sin^2 2\alpha = 1$ ,但此时的电光效应不是线性的;在感应主轴方向上, $\beta = 0$ ,不产生偏振方向转动,但此时 $\sin^2 2\alpha \neq 1$ ,受到起偏方向的限制.只有感应主轴与起偏方向成 $45^\circ$ 角时,感应主轴方向上才有 $\sin^2 2\alpha = 1$ ,既不受偏光振动方向转动的影响又有线性电光效应.

5) 在其他方向上消光比较差,不能使调制器完全消光或完全透光,而且电光效应不是线性的,产生半波长光程差所需电压应比半波电压高.

### 4 实 验

实验用 LiNbO<sub>3</sub> 晶体尺寸为 15 mm×24 mm×

15 mm, 在晶体  $x$  方向加电压, 半波电压约 2500 V, 起偏器与检偏器正交。图 4 是用 632.8 nm 的 He-Ne 激光照射得到的不同起偏方向下的光轴干涉图。与理论计算得到的光轴干涉图相符。

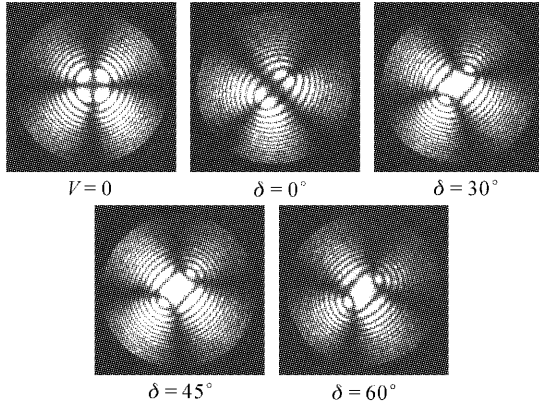


图 4 无电场和在  $x$  方向加半波电压时, 在正交偏振镜下的光轴干涉图

Fig. 4 Photographs of the conoscopic interference figure under the two orthogonal directions of the polarizers when no electric field or a half-wave voltage is applied on  $x$ -direction

## 5 结 论

通过分析在  $\text{LiNbO}_3$  晶体垂直光轴方向加电压, 光沿近光轴方向传播时, 不同起偏方向对电光调制器的影响, 得出偏光电光调制器的光强随电场变化的分布规律: 由偏光振动方向转动引起的消光区域随起偏方向的转动而转动, 在起偏和检偏方向上始终消光, 在与起偏方向成  $45^\circ$  角方向始终全透光, 并且消光线的交点即感应双光轴头不随起偏方向的转动而变化, 始终在折射率变大的感应主轴上。这

一结论在实验上得到了证实。改变起偏方向对调制器的影响等效于在  $x$ - $y$  面内改变电场方向对调制器的影响。所得结论也适用于其他单轴电光晶体, 如  $\text{KDP}(\text{KH}_2\text{PO}_4)$  型晶体。

利用  $\text{LiNbO}_3$  晶体的近光轴电光效应随起偏方向或电场方向变化的规律, 可以通过选择合适的方向切割晶体(即选择合适的电场方向)和合适的起偏方向, 将光束偏转到与起偏方向成  $\pm 45^\circ$  角的方向, 使调制器工作在最佳状态, 使  $\text{LiNbO}_3$  晶体能更广泛地应用于电光开关和偏光调制器中。

## 参 考 文 献

- 1 H. Fay. Electro-optic modulation of light propagating near the optic axis in  $\text{LiNbO}_3$  [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1969, **59**(11): 1399~1404
- 2 Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, a group of crystal modulation. Electro-optic modulation of light propagating near the optic axis and laser Q switch in a single block of crystal [J]. *Lasers*, 1975, **2**(2): 8~19  
中国科学院上海光机所晶体调制组. 近光轴电光调制和单块晶体激光 Q 开关[J]. *激光*, 1975, **2**(2): 8~19
- 3 Wang Ning, Yin Yaozu, Qian Jiajun *et al.*. Cantor network, two-dimensional compact structure, control algorithm and its optical implementation [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(7): 958~962  
王 宁, 殷耀祖, 钱家钧 等. 集成模块化 Cantor 网络的控制和光学实现[J]. *光学学报*, 1996, **16**(7): 958~962
- 4 Song Zhe, Liu Liren, Ren Haixia *et al.*. Integrated optical bypass-exchange switch [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 777~780  
宋 哲, 刘立人, 任海霞 等. 单块晶体  $2 \times 2$  光开关[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 777~780
- 5 Ren Haixia, Liu Liren, Song Zhe *et al.*. Double refraction and reflection of sequential interfaces in a crystal and application to integration of  $1 \times N$  optical switch [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 152~157  
任海霞, 刘立人, 宋 哲 等. 晶体的连续双折射双反射及其集成应用:  $1 \times N$  电光开关[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 152~157