

文章编号 : 0253-2239(2001)10-1249-04

# 各向异性光折变光开关的原理\*

阎晓娜<sup>1)</sup> 刘立人<sup>2)</sup>

(1), 上海大学理学院物理系, 上海 200436  
(2), 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

摘要: 提出了利用光折变的各向异性衍射特性在单块 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中建立光折变 2×2 开关组件的方案。为减少记录的各光折变全息组件之间的串扰, 采用局域热固定。基于衍射效率公式, 分析最佳衍射效率时入射光强比和写入角之间的关系。所建立的光开关具有小型化和垂直的输入/输出的特点。

关键词: 各向异性衍射; 直通-交换光开关; 衍射效率; 局域热固定

中图分类号: O734. + 2 文献标识码: A

## 1 引 言

光开关由于能提供比电子开关更宽的带宽而广泛应用于图像和数据通信中。最近几年已提出多种光学方法实现光开关, 如单模光纤寻址开关<sup>[1]</sup>、液晶开关<sup>[2]</sup>、方解石开关<sup>[3]</sup>等, 它们具有插入损耗低、驱动功率低和响应快等优点。

光折变全息由于其高的衍射效率和实时性已成为一种新的实现光开关的替代方案<sup>[4]</sup>。当光折变晶体电光张量的非对角元素参与光折变光栅的建立时有可能发生各向异性的衍射, 此时若满足光栅的相位匹配条件, 寻常偏振的读出光可以衍射到非常偏振的衍射光束, 反之亦然<sup>[5]</sup>。由于在各向异性衍射中, 读出和衍射光束具有正交的偏振, 改善了信噪比, 因此非常适合于信号处理应用。

基于光折变 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的各向异性衍射性质, 本文提出建立光折变 2×2 开关组件的方案。为减少记录的各光折变全息组件之间的串扰, 采用局域热固定对记录的全息进行固定。文中基于衍射效率公式<sup>[6]</sup>, 分析了为获得最佳衍射效率所需采用的入射光强比和写入角之间的关系。所建立的光开关具有小型化和垂直的输入/输出的特点。

## 2 各向异性衍射

图 1(a) 是各向异性衍射光栅的记录结构图。其中晶体光轴 C 垂直于入射面, 两束同偏振且波矢分

别为  $k_1$  和  $k_2$  的相干平面波  $E_1(r, t)$  和  $E_2(r, t)$  入射光折变晶体, 形成光栅的波矢  $k_{12} = k_1 - k_2$  垂直于晶体的 C 轴。记录过程结束后用一束同偏振的读出光束  $E_R$  读出, 如图 1(b) 所示。

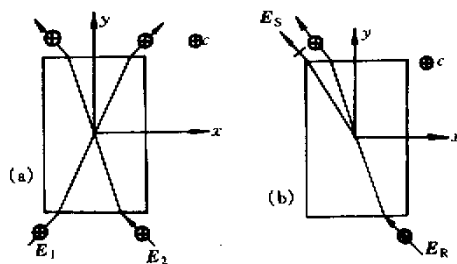


Fig. 1 (a) The recording system of anisotropic photorefractive hologram with e-polarized beams  $E_1$  and  $E_2$ . (b) The readout of the recorded hologram with e-polarized beam  $E_R$  and the o-polarized diffraction beam  $E_S$

$E_R$  的表示式为

$$E_R(r, t) = eE(r) \exp[i(k_R \cdot r - \omega t)] + C.C, \quad (1)$$

其中, C.C 代表共轭项,  $e$  和  $\omega$  分别为读出光束的单位偏振矢量和角频率,  $k_R$  为读出波矢。代入波动方程, 应用慢变化场近似得到关于读出和衍射光束的耦合波方程为<sup>[5]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_R}{\partial y} &= -im\kappa_R \exp(i\phi) \left( \frac{E_1^* E_2}{I_0} \right) E_S, \\ \frac{\partial E_S}{\partial y} &= -im\kappa_S \exp(-i\phi) \left( \frac{E_1 E_2^*}{I_0} \right) E_R, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中  $E_R$  和  $E_S$  分别为读出和衍射光的幅度,  $m$  为两写入光束的调制度,  $\phi$  为记录光栅相对于干涉条纹的相移。耦合系数

\* 国家自然科学基金和上海应用物理中心资助课题。

收稿日期 2000-03-23; 收到修改稿日期 2000-09-19

$$\kappa_R = \frac{\pi\chi_{\text{eff}}}{n_R\lambda_R\cos\theta_R}, \quad \kappa_S = \frac{\pi\chi_{\text{eff}}}{n_S\lambda_S\cos\theta_S}. \quad (3)$$

$n_R$ 、 $n_S$  和  $\theta_R$ 、 $\theta_S$  分别是读出光和衍射光在晶体内的折射率和折射角,假定读出和衍射光的波长  $\lambda_R = \lambda_S$ 。耦合系数中有效极化率<sup>[5]</sup>

$$\chi_{\text{eff}} = (e_1 \cdot e_2)(e_R \cdot \delta x \cdot e_S), \quad (4)$$

而 
$$\delta x = -\epsilon \cdot r \cdot E_{sc} \cdot \epsilon, \quad (5)$$

其中  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_R$ 、 $e_S$  分别是两记录光束、一读出和一衍射光束的单位偏振向量,  $\epsilon$  是二阶介电张量,  $r$  是三阶电光张量,  $E_{sc}$  是空间电荷场。

为观察到各向异性衍射必须满足两个条件<sup>[5]</sup>:

- 1)  $\chi_{\text{eff}} \neq 0$
- 2) 相位匹配条件:

$$k_{RS} = k_R - k_S. \quad (6)$$

在各向异性光栅结构中,光轴垂直于读出波矢量和光栅矢量组成的平面,因此空间电荷场在  $z$  轴的投影  $E_z = 0$ ,而在  $x$  和  $y$  轴的投影  $E_x$  和  $E_y$  则不为 0。

对  $\text{LiNbO}_3$  晶体来说  $\delta x$  的表达式为

$$\delta x = \begin{bmatrix} -r_{22}E_y n_o^4 & -r_{22}E_x n_o^4 & r_{51}E_x n_o^2 b_e^2 \\ -r_{22}E_x n_o^4 & r_{22}E_y n_o^4 & r_{51}E_y n_o^2 b_e^2 \\ r_{51}E_x n_o^2 n_e^2 & r_{51}E_y n_o^2 n_e^2 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中  $n_o$  和  $n_e$  分别为寻常和非常光折射率,  $r_{ij}$  为电光系数。由(7)式可知,对于  $\text{LiNbO}_3$  晶体仅有  $\delta x_{33}$  为 0,因此只有非常偏振光之间的耦合是禁止的,而寻常光衍射到非常偏振光和由非常偏振光衍射到寻常偏振之间的耦合是允许的。这样就可以采用非常偏振的光束记录光栅,由于在这种情况下写入光之间不会发生耦合,因此可以用衍射效率公式来精确地表示衍射效率  $\eta$  的大小<sup>[6]</sup>:

$$\eta = \sin^2 \left[ \frac{m\pi\chi_{\text{eff}}d}{n_R\lambda_R(\cos\theta_R\cos\theta_S)^{1/2}} \right]. \quad (8)$$

图 2(a)、图 2(b) 是一个特殊的各向异性衍射光栅记录结构图。图 2(a) 中用两束非常偏振的光束写入光栅,图 2(b) 是在写入过程结束后用一垂直入射的非常偏振光束来读取,此时若相位匹配条件满足,寻常偏振的光束将从记录的各向异性光栅读出,相应的折射率椭球如图 2(c) 所示。在图 2(c) 中同样绘出了为满足各向异性衍射所需的相位匹配条件,用公式可以表示为

$$\begin{aligned} 2n_e^2 + 2n_e^2\cos(\theta_1 + \theta_2) &= n_e^2 + n_o^2 + 2n_on_e\cos\theta_3, \\ n_o\cos(\theta_3 - \alpha) &= n_e\cos\alpha, \quad \theta_2 - \theta_1 = 2\alpha, \\ \theta_2 &= \arcsin(n_e\sin\theta_2), \quad \theta_1 = \arcsin(n_e\sin\theta_1), \end{aligned}$$

$$\theta_3 = \arcsin(n_o\sin\theta_3),$$

式中  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  和  $\theta'_1$ 、 $\theta'_2$ 、 $\theta'_3$  分别为两入射光和读出衍射光相对于坐标轴  $y$  轴的内外角度,  $\alpha$  为  $y$  轴与两写入光束角平分线之间的夹角。

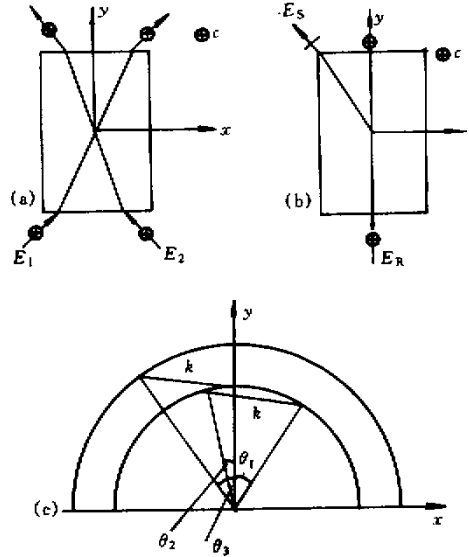


Fig. 2 One specific recording (a) and readout condition of anisotropic diffraction (b) and the corresponding indicatrix diagram(c)

根据(9)式绘出的图 3 是两记录角度和衍射角度之间的关系曲线。

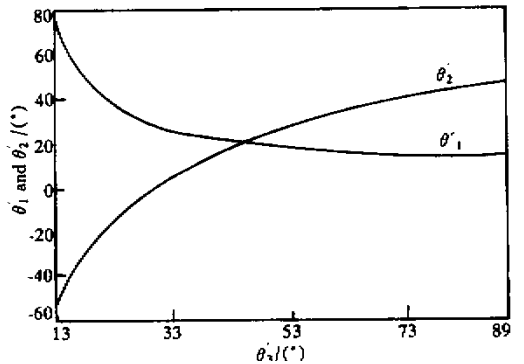


Fig. 3 Relation between  $\theta'_1$ ,  $\theta'_2$  and  $\theta'_3$  (in degree) measured outside the crystal for the Bragg phase matching condition

### 3 直通交换开关的实现

从图 2 的特定记录结构可以看出,当  $E_R$  读出时,就会实现图 4(a) 所示的结构,很显然这是  $1 \times 2$  的开关设置。当在输入面相隔一定距离的两个位置处分别用非常偏振光束记录两个独立的光栅,记录

过程结束读出时会实现图 4(b)的设置,这是 2×2 的直通交换开关。

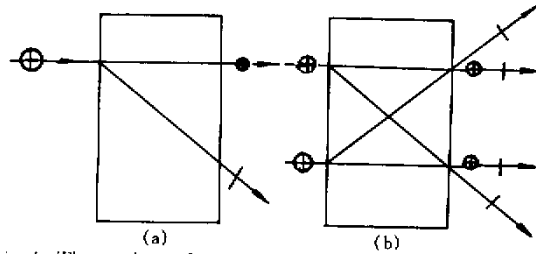


Fig. 4 The readout of one hologram (a) and two holograms (b). Obviously, the 1×2 and 2×2 switching arrangements are realized

实际上根据前述的记录方法图 4(b)的结构是不可能实现的,因为写入的两个光栅在晶体内是重叠的,这就会使一特定的读出光束受到两个光栅的作用而使衍射光束偏离预期的方向。这个问题可以通过 CO<sub>2</sub> 激光局域热固定方案解决<sup>[7]</sup>。理论和实验已论证用 CO<sub>2</sub> 激光束附加吸热体可以实现光折变全息的局域热固定。这样只有需要的局域光栅被记录,图 4(b)的结构才能实现。另外热固定可以长期保存记录的光栅,在实际应用中是很有意义的。

图 4 中,在读出输入面光栅时的衍射光束是倾斜于输出面输出的,无法直接应用于下一级互连。为解决这一问题,在输出面倾斜光束输出的位置记录固定另一个局域的全息光栅,用来实现对倾斜的衍射光束再次衍射而使之垂直于输出面输出。输出面光栅记录的方法是在晶体的输出面侧用前一面的衍射光束和从前一面垂直入射的寻常偏振光束记录全息组件,而后用 CO<sub>2</sub> 激光束局域热固定。显影后就会有图 4 的读出结构。其中的倾斜输出可以通过选择合适记录光强比消除,这样就实现了图 5 的开关结构。若在输出面侧放置偏振选择器,开关的直通和交换操作就会实现。

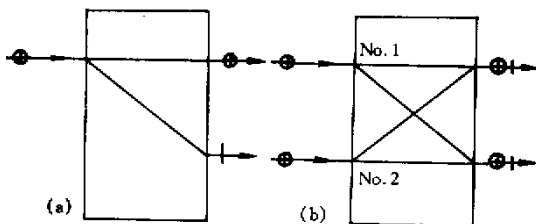


Fig. 5 The setup of 1×2 (a) and 2×2 switches (b)

### 4 衍射效率

从上一节原理的叙述得知,图 5(b)中输入面标号为 No. 1、No. 2 的全息的衍射效率为 50% 而输出

面全息衍射效率为 100% 是必要的,因为只有这样才能保证开关无论处于直通还是交换操作,两个输出端口的读出光强相等且输出方向垂直于输出面。

上述衍射效率要求可以由选择合适的记录光强比实现。本文作为实例仅讨论如何获得输入面 50% 的衍射效率,不讨论输出面 100% 衍射的获得,因为输出面光束若倾斜输出是无法到达输出端探测器的,因此不会对输出端器件产生影响。又因输出面光强比的计算要用到输入面光栅的实际衍射强度,而这要由实验确定,而本文只是原理的讨论,故暂不讨论这个问题。

对标号为 No. 1、No. 2 的全息 1、2 来说,由于记录的非常偏振光束之间无耦合的作用(8)式的衍射效率是适用的,考虑热固定操作对衍射效率的影响,无热固定时的衍射效率(8)式应改写为

$$\eta = \sin^2 \left[ \eta_1 \frac{m \pi \chi_{\text{eff}} d}{n_R \lambda_R (\cos \theta_1 \cos \theta_2)^{1/2}} \right], \quad (10)$$

其中  $\eta_1$  为热固定效率,实验测得的数值是 60%<sup>[7]</sup>。把预期的光栅效率  $\eta = 50\%$  代入上式,得到写入角度和写入光强调制度  $m$  之间的关系:

$$m = \frac{n_R \lambda_R (\cos \theta_1 \cos \theta_2)^{1/2}}{2 \eta_1 \chi_{\text{eff}} d}, \quad (11)$$

对于光栅 1

$$\chi_{\text{eff}} = r_{51} n_o^2 n_e^2 (\sin \beta \sin \theta_3 + \cos \beta \cos \theta_3) E, \quad (12)$$

对于光栅 2

$$\chi_{\text{eff}} = -r_{51} n_o^2 n_e^2 (\sin \beta \sin \theta_3 - \cos \beta \cos \theta_3) E, \quad (13)$$

其中  $\beta = (\theta_2 - \theta_1)/2$  是光栅矢量的方向;  $E = A[\sin(\theta_2 + \theta_1)]/2$  是空间电荷场的大小,其中  $A = 15 \text{ kVcm}^{-1}$  是比例常数<sup>[8]</sup>。结果得到调制度  $m$  和衍射角的关系曲线如图 6 所示。

综上所述,可以得到如下结论:通过选择合适的记录角度  $\theta'_1$ 、 $\theta'_2$ ,从图 3 就可确定衍射角  $\theta'_3$ 。而后从图 6 选择最佳的光强调制度  $m$ ,从  $m$  与输入光强比  $m_0$  的关系  $m = \sqrt{m_0} / (1 + m_0)$  就可确定记录时的最佳记录光强比  $m_0$  的大小,从而保证最佳的衍射效率。

结论 基于光折变 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的各向异性衍射特性,本文提出实现全光的 2×2 光折变光开关的方案。所建立的光开关具有垂直的输入/输出和小型化的特性。基于 Kogelnik<sup>[6]</sup>衍射效率公式,分析了为得到最佳的衍射效率所需采用的入射光强比和写入角之间的关系。

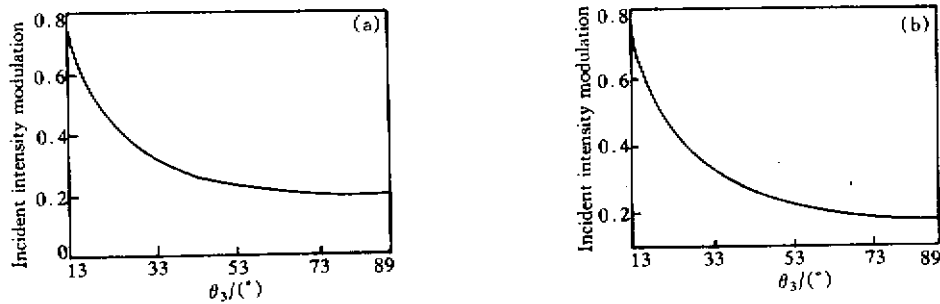


Fig. 6 The relation between the incident intensity modulation  $m$  and the diffraction angle  $\theta_3$  for holograms : (a) No. 1 ; (b) No. 2

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Birks T A , Culverhouse D O , Farwell S G .  $2 \times 2$  single fiber routing switch. *Opt. Lett.* , 1996 , **21**( 10 ) : 722 ~ 724
- [ 2 ] Mcadams L R , Meruer R N , Goodman J W . Liquid crystal optical routing switch. *Appl. Opt.* , 1990 , **29**( 9 ) : 1304 ~ 1306
- [ 3 ] Wang N , Liu L . Cantor network , control algorithm , two dimensional compact structure and its optical implementation. *Appl. Opt.* , 1995 , **20**( 10 ) : 1430 ~ 1436
- [ 4 ] 阎晓娜 , 刘立人 . 偏振控制的光折变光开关. *光学学报* , 1999 , **19**( 7 ) : 1003 ~ 1005
- [ 5 ] Temple D A , Warde C . Anisotropic scattering in photorefractive. *J. Opt. Soc. Am. ( B )* , 1986 , **3**( 2 ) : 337 ~ 340
- [ 6 ] Kogelnik H . Coupled wave theory for thick hologram gratings. *The Bell syst. Tech.* , 1969 , **48**( 9 ) : 2909 ~ 2947
- [ 7 ] Liu B , Liu L . Local thermal fixing of photorefractive  $\text{LiNbO}_3$  hologram by  $\text{CO}_2$  laser. *Appl. Opt.* , 1998 , **37**( 8 ) : 1342 ~ 1349
- [ 8 ] Zhao F , Zhou H , Wu Z *et al.* . Temperature dependence of light-induced scattering in a  $\text{Ce} : \text{Fe} : \text{LiNbO}_3$  photorefractive crystal. *Opt. Engng.* , 1996 , **35**( 7 ) : 1985 ~ 1992

## Theory of Anisotropic-Diffraction Based Photorefractive Switch

Yan Xiaona<sup>1)</sup> Liu Liren<sup>2)</sup>

( 1 ) , Department of physics , Shanghai University , Shanghai 200436  
 ( 2 ) , Information Optics Laboratory , Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics ,  
 The Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800

( Received 23 March 2000 ; revised 19 September 2000 )

**Abstract :** A scheme using anisotropic diffraction to implement the  $2 \times 2$  switching element in a one-block  $\text{Fe} : \text{LiNbO}_3$  photorefractive crystal is suggested. To decrease the crosstalk among the four individual photorefractive holograms , a thermal fixing scheme by a  $\text{CO}_2$  laser is quoted. Based on Kogelnik diffraction efficiency equation , the relation between the optimal incident intensity ratio and the writing angles is analyzed. It is shown that the switch proposed has the properties of normal input , output and miniaturization.

**Key words :** anisotropic diffraction ; bypass-exchange switch ; diffraction efficiency ; local thermal fixing