

文章编号: 0253-2239(2006)01-0107-4

# 基于光纤环形镜的偏振无关的掺镧锆钛酸铅电光开关

刘 峰<sup>1,2</sup> 叶 青<sup>1,2</sup> 瞿荣辉<sup>1</sup> 方祖捷<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)  
(<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 利用掺镧锆钛酸铅(PLZT)陶瓷二次电光效应结合光纤环形镜结构的优势构成偏振无关高速电光开关。采用琼斯矩阵方法分析了光纤环形镜的输出特性,给出了开关消光比同器件结构参量之间的关系。测量掺镧锆钛酸铅电光开关具有输入偏振无关特性,光开关消光比达到 25 dB,响应时间小于 3  $\mu\text{s}$ 。此外利用此开关装置测量获得了实验用掺镧锆钛酸铅陶瓷的克尔系数为  $\kappa \sim 1.1 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 。理论分析和实验结果表明,利用环形镜结构稳定优势和掺镧锆钛酸铅优良的电光特性结合设计的高速光开关具有良好的应前景。本工作对掺镧锆钛酸铅电光材料的应用推广和高速光开关研究提供了有益的理论 and 实验参考。

**关键词:** 光纤光学; 光开关; 掺镧锆钛酸铅; 光纤环形镜

中图分类号: O435.1 文献标识码: A

## Polarization Independent Lanthanum-Doped Lead Zirconium Titanate Electro-Optical Switch Based on Fiber Loop Mirror

Liu Feng<sup>1,2</sup> Ye Qing<sup>1,2</sup> Qu Ronghui<sup>1</sup> Fang Zujie<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)  
(<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** A polarization independent high speed electro-optical switch by using quadratic electro-optic effect of lanthanum-doped lead zirconium titanate (PLZT) ceramic incorporated in a Sagnac loop is described. Analysis by Jones matrix method shows the output property of the fiber loop mirror and the relation of its extinction ratio and parameters of the configuration. Experiments show its typical performances of 25 dB extinction ratio and less than 3  $\mu\text{s}$  response time, and give Kerr coefficient of the lanthanum-doped lead zirconium titanate  $\kappa \sim 1.1 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ . Experiments also show good stability of the device without any special measures, which is attributed to the mutual optical paths in the fiber loop for the two beams of interferometer, and is regarded superior than other structures like Mach-Zehnder interferometer.

**Key words:** fiber optics; optical switch; lanthanum-doped lead zirconium titanate; fiber loop mirror

## 1 引 言

随着光纤技术的发展和波分复用、密集波分复用系统的不断推广,建立高速率、大容量的全光网络(AON)成为通信技术发展的必然趋势<sup>[1,2]</sup>。光开关作为最基本的功能单元之一在光网络中发挥着不可缺少的作用。近年来光传输技术的发展,特别是光分组交换业务的提出,对光开关容量、速度等指标提出了更高要求,从而使高速光开关研究成为当前光通信器件研究的一个热点。目前开发研究的光开关

器件种类繁多<sup>[3]</sup>,其中电光开关具有响应速度快,工艺成熟,易于与控制电路相结合等优势,具有极好的应用前景。掺镧锆钛酸铅(PLZT)陶瓷材料通过在锆钛酸铅材料中掺入镧元素实现获得了较好的透明性。作为一种高效的电光材料,具有易于生长,克尔系数大,损耗小等优点,近年来在新型高速电光开关、调制器的相关研究中备受瞩目<sup>[4~6]</sup>。光纤环形镜作为一种简单灵活的光纤干涉结构,最初被设计应用于多种光纤回路,如全光纤激光器、双向通信

作者简介: 刘 峰(1978~),男,河北人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事光通信及光纤器件方面的研究。E-mail: liufeng@siom.ac.cn

收稿日期: 2005-01-04;收到修改稿日期: 2005-04-20

等<sup>[7]</sup>。近年来利用其双折射敏感特性和非线性特性,人们对其波长选择性滤波器,非线性光开关等方面的应用进行了许多有益探索<sup>[8~10]</sup>。本文采用琼斯矩阵方法,分析了基于环形镜结构偏振无关光开关的原理及输出特性,并应用掺镧锆钛酸铅晶体作为电光调制器进行了高速电光开关实验,理论和实验获得了较好的符合。

## 2 原理分析

### 2.1 环形镜开关的偏振无关特性

在光纤环形镜中,经过耦合器的光信号被分为两束分别沿顺时针和逆时针方向在环中传播。当两束光再次在耦合器中相遇时,将发生干涉并决定其输出特性。在忽略非线性效应和损耗的情况下,环内光束传播满足可逆性原理。由于光束在光纤中传播时偏振面将随光纤的弯曲而变化,如图1所示,为了便于讨论,文中采用光纤坐标系:以光纤中光波的传播方向为 $z$ 坐标的正方向,垂直光纤环平面的方向为 $y$ 方向, $x$ 方向平行于光纤环平面, $z$ 和 $x$ 方向将随光纤弯曲而改变。

使用琼斯矩阵方法分析光在环形镜中的传播。假设任意偏振光由耦合器一端入射,其场强可表示

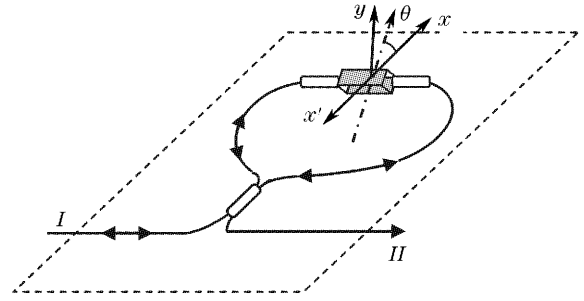


图1 光纤环形镜原理图

Fig. 1 Fiber loop reflector

为 $E_0(E_x E_y)^T$ 。假设 $2 \times 2$ 耦合器无偏振相关特性, $x$ 、 $y$ 方向具有相同传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} \sqrt{1-K} & -i\sqrt{K} \\ -i\sqrt{K} & \sqrt{1-K} \end{bmatrix}, K \text{ 为耦合器的分束比。通过}$$

耦合器后顺时针、逆时针方向传播的光场分别为 $E_C = \sqrt{1-K}(E_x E_y)^T$ ,  $E_{CC} = -i\sqrt{K}(E_x E_y)^T$ 。

由于正反方向传播的光信号在环中共用光路,产生相同的相位延迟将相互抵消,因此在不考虑损耗和随机双折射情况下,光纤的传输矩阵可以看作一个单位矩阵,推导过程中不再考虑。假设在光纤环中插入一个可控双折射相位延迟器其光轴方向对于顺时针和逆时针光夹角分别为 $\theta$ ,  $-\theta$ 。其传输矩阵对于顺时针和逆时针光波的可以分别写为

$$T_C = \begin{bmatrix} \cos^2\theta + \exp(-i\delta)\sin^2\theta & \sin\theta\cos\theta[1 - \exp(-i\delta)] \\ \sin\theta\cos\theta[1 - \exp(-i\delta)] & \exp(-i\delta)\cos^2\theta + \sin^2\theta \end{bmatrix}, \quad (1a)$$

$$T_{CC} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta + \exp(-i\delta)\sin^2\theta & -\sin\theta\cos\theta[1 - \exp(-i\delta)] \\ -\sin\theta\cos\theta[1 - \exp(-i\delta)] & \exp(-i\delta)\cos^2\theta + \sin^2\theta \end{bmatrix}, \quad (1b)$$

顺时针和逆时针方向传播的光波经过相位延迟器后,再次通过耦合器发生干涉,由入射端口反射和从输出端口出射的光信号场强可以分别表示为:

$$E_1 = -i2\sqrt{K}\sqrt{1-K} \begin{bmatrix} [\cos^2\theta + \exp(-i\delta)\sin^2\theta]E_x \\ [\exp(-i\delta)\cos^2\theta + \sin^2\theta]E_y \end{bmatrix}, \quad (2a)$$

$$E_2 = \begin{bmatrix} (1-2K)[\cos^2\theta + \exp(-i\delta)\sin^2\theta]E_x + \sin\theta\cos\theta[1 - \exp(-i\delta)]E_y \\ \sin\theta\cos\theta[1 - \exp(-i\delta)]E_x + (1-2K)[\exp(-i\delta)\cos^2\theta + \sin^2\theta]E_y \end{bmatrix}, \quad (2b)$$

由此可得相应的光功率为

$$I_1 = 4K(1-K)[1 - \sin 2\theta\sin^2(\delta/2)](|E_x|^2 + |E_y|^2), \quad (3a)$$

$$I_2 = \{1 - 4K(1-K)[1 - \sin 2\theta\sin^2(\delta/2)]\}(|E_x|^2 + |E_y|^2), \quad (3b)$$

由(3)式,两路输出信号强度都正比于入射光的功率,功率分配只与耦合器分光比和相位延迟器参量有关。

当耦合器的分束比为 $1:1$ 时,即 $K = 0.5$ , (3)式可进一步简化为

$$I_1 = [1 - \sin 2\theta\sin^2(\delta/2)](|E_x|^2 + |E_y|^2), \quad (4a)$$

$$I_2 = \sin 2\theta\sin^2(\delta/2)(|E_x|^2 + |E_y|^2), \quad (4b)$$

由(4)式可知,当 $\theta=0, \pi/2$ 及其倍数时,无论相位延迟器延迟如何环形镜将呈现完全反射特性。而当 $\theta=\pi/4$ 时,通过调整 $\delta$ 从0到 $\pi$ 变化,可实现输入功率在两输出端的完全切换,并且输出控制与输入偏振态完全无关。利用这一特性环形镜结构可以用于光开关、可变耦合器等应用领域。

## 2.2 掺镧锆钛酸铅陶瓷的二次电光效应

如利用电光材料的快速响应特性,以电光材料作为可变相位延迟器,以上分析光纤环形镜结构很容易构造高速电光开关。作为陶瓷电光材料,掺镧锆钛酸铅在未加电场时呈现各向同性,而在外场作用下将呈现负单轴折射率椭球特性,其轴向只与外电场方向相关,克服了铌酸锂等单晶材料在应用中对加工的苛刻要求,使其应用更加灵活。细回线型掺镧锆钛酸铅陶瓷材料具有立方晶系结构,只存在二次光电效应,具有很大的克尔系数,电场导致的折射率变化为二次指数形式<sup>[11]</sup>, $\Delta n = \kappa n_0^3 E_0^2 / 2$ ,式中 $\kappa, n_0, E_0$ 分别为克尔系数、材料折射率和外加电场强度。可以推导掺镧锆钛酸铅相位延迟与控制电压关系为

$$\delta = 2\pi\kappa n_0^3 U^2 L / (\lambda d^2), \quad (5)$$

式中 $L$ 为材料通光长度, $\lambda$ 为入射光波长, $d$ 为掺镧锆钛酸铅电极间距。

## 3 实验及讨论

实验掺镧锆钛酸铅电光开关装置如图2所示。以环形器端口1作为开关输入端口(Input),端口2连接光纤环形镜,端口3作为开关的输出端口Output I;耦合器的端口2作为开关输出端口Output II。实验中采用中科院硅酸盐所研制的9.5/65/35掺镧锆钛酸铅陶瓷材料,厚度选定为1 mm,通光长度为10 mm,在垂直传播方向加均匀电场,采用光腰直径为0.5 mm标准光纤准直器实

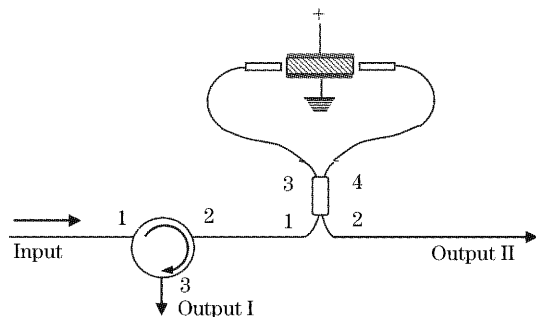


图2 实验装置示意图

Fig. 2 Experimental setup

现掺镧锆钛酸铅与光纤的耦合,并通过调整旋转耦合器方向实现对角的控制。由于掺镧锆钛酸铅材料的折射率很高,经测量在1550 nm波段为 $n_0 \approx 2.46$ ,端面的菲涅耳反射很大,为此实验在掺镧锆钛酸铅材料的入射和出射端面上蒸镀 $Al_2O_3$ 薄膜以降低反射损耗。测量表明,对于减小插入损耗效果明显,掺镧锆钛酸铅相位延迟器与两端的光纤准直器固定后的插入损耗的典型值小于2 dB。

实验采用掺铒光纤放大自发辐射(EDF-ASE)作为测试光源,由于自发辐射发光的本性,输出为一个非偏振光源。实验通过调节掺镧锆钛酸铅控制电压,获得了大于25 dB的消光比;进一步以不同方向线偏振光入射,获得开关的消光比波动小于1 dB,系统偏振相关损耗(PDL)小于1 dB,实验表明开关器件的确具有偏振无关特性。光开关的响应速度是决定其应用的一个重要技术指标,在测量中对掺镧锆钛酸铅施加方波脉冲,得到光信号的波形如图3所示。图中下面是控制电压曲线,上面是用响应速率155 Mb/s的PIN-FET接收到的光信号,实验测量开关的响应时间小于 $3 \mu s$ 。由于光信号的响应时间已经和控制信号达到同一个量级,很明显通过对控制信号改善开关的响应时间可以进一步提高。

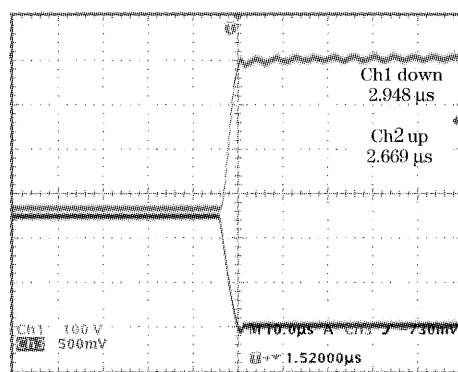


图3 掺镧锆钛酸铅光纤开关时间相应曲线

Fig. 3 Switching time of lanthanum-doped lead zirconium titanate switch

将实验系统固定,探测Output II输出功率随控制电压的变化。随着控制电压的升高,Output II输出功率出现周期性变化。根据前面的推导,输出功率每经过一个极值点,掺镧锆钛酸铅将产生双折射相位差,记录每次经过极值点时的控制电压,如图4。图中实线为根据(5)式拟合得到的双折射相位差随控制电压变化的曲线,拟合中以掺镧锆钛酸铅材料的克尔系数为 $\kappa$ 参量,得到 $\kappa \sim 1.1 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ ,与国外的报道比较吻合。注意到拟合曲线并不

通过原点,这是由于在实际光纤环的构成中残存双折射等因素引起的。

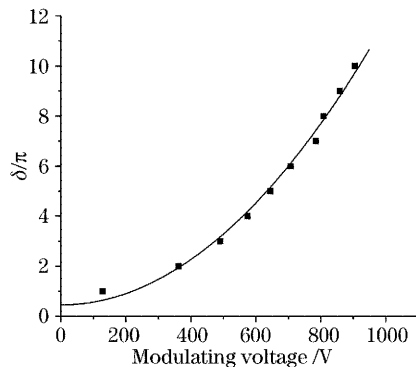


图 4 掺镧锆钛酸铅电致双折射变化

Fig. 4 lanthanum-doped lead zirconium titanate birefringence phase difference versus control voltage

值得注意的是,干涉型光开关一般对外界扰动比较敏感。如目前干涉光开关中常用的光纤马赫-曾德尔干涉仪结构,如无特殊措施,很难保证输出的稳定。即使温度的微小改变也会引起开关特性的不稳定。但是采用环形镜结构,由于干涉的两束光共用同一条光路,外界的扰动对干涉两臂的影响相互抵消,相位差随外界扰动的变化大大减小。实验中在没有采取任何特殊措施的情况下,仍获得了稳定的输出。这对光开关在实际应用中的推广有着重要的意义。但是由于实验中采用的是光纤与掺镧锆钛酸铅块体材料使开关的控制电压很高,距实用仍有很大距离。近年来国外研究中掺镧锆钛酸铅薄膜波导器件受到了广泛重视,中国科学院上海硅酸盐研究所也已成功的实现了掺镧锆钛酸铅薄膜的制备。在进一步的工作中将尝试将开关移植为掺镧锆钛酸铅波导结构,以降低控制电压,并在此基础上尝试进行开关阵列的研究。

## 4 结 论

对环形镜结构偏振无关光开关的原理、输出特性及输出偏振相关特性进行了理论分析,并给出了输出的解析表达式。理论分析和实验表明,可以通过在环形镜结构中引入双折射实现偏振无关光输出

的切换。应用掺镧锆钛酸铅晶体作为电光调制器实现偏振无关高速电光开关功能,并以此装置测量了实验用掺镧锆钛酸铅材料的克尔系数为  $\kappa \sim 1.1 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 。光开关可以在无任何特殊措施情况下稳定工作,说明了基于环形镜结构的干涉开关结构较马赫-曾德尔结构,具有更好的抗外界的扰动能力。

**致谢** 感谢中国科学院上海硅酸盐研究所丁爱丽教授,上海亨通光电科技有限公司李苏明总工程师提供掺镧锆钛酸铅样品,并对实验进行有益的讨论。

## 参 考 文 献

- 1 Luo Duanbing, Yan Kun, She Weilong. All optical switch response time in millisecond magnitude based on Azo-doped polymer films[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(1): 92~96 (in Chinese)
- 2 Song Zhe, Liu Liren, Ren Haixia *et al.*. Integrated optical bypass-exchange switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 777~780
- 3 Xiaohua Ma, Geng-Sheng Kuo. Optical switching technology comparison: optical MEMS vs. other technologies [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **41**(11): S16~S23
- 4 Paul E. Shames, Pang Chen Sun, Yeshaiahu Fainman. Modeling of scattering and depolarizing electro-optic devices. I. Characterization of lanthanum-modified lead zirconate titanate [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(17): 3717~3725
- 5 Damian Goldring, Zeev Zalevsky, Efraim Goldenberg *et al.*. Optical characteristics of the compound PLZT[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(32): 6536~6543
- 6 Roshan Thapliya, Yasunori Okano, Shigetoshi Nakamura. Electro-optic characteristics of thin-film PLZT waveguide using ridge-type Mach-Zehnder modulator[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(8): 1820~1827
- 7 David B. Mortimore. Fiber loop reflectors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7): 1217~1224
- 8 Hao Zhao, Ronghui Qu, Zujie Fang. A new structure optical fiber wavelength-selective switch[C], *CLEO 99*, 1999. 525~526
- 9 Gautam Das, John W. Y. Lit. Wavelength switching of a fiber laser with a Sagnac loop reflector[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1): 60~62
- 10 O. Pottiez, E. A. Kuzin, B. Ibarra-Escamilla *et al.*. Easily tunable nonlinear optical loop mirror based on polarization asymmetry[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(6): 3874~3887
- 11 A. Yariv, P. Yeh. *Optical Waves in Crystals-Propagation and Control of Laser Radiation* [M]. John Wiley & Sons, Inc. 1984