

文章编号：0253-2239(2005)10-1339-4

# 光纤马赫-曾德尔干涉法测量极化聚合物的电光系数<sup>\*</sup>

王义平 陈建平 李新碗 洪建勋 张晓红 周俊鹤 叶爱伦

(上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200030)

**摘要：**报道了用光纤马赫-曾德尔干涉法测量极化聚合物电光系数的方法和原理。该方法不仅可以测量聚合物薄膜的电光系数而且可以测量聚合物波导的电光系数，并且该方法可以同时测量聚合物的电光系数张量元  $r_{13}$  和  $r_{33}$ 。该方法最突出的优点是不必在聚合物薄膜的表面制备第二个电极，因此尤其适合于在电光聚合物试制阶段测试聚合物的电光系数。干涉仪的输出被反馈到参考臂中控制相位偏置点的压电陶瓷，从而实现对干涉仪相位偏置点的闭环控制，因此降低了对环境稳定性的要求并且提高了测量精度。实际测试了极化聚合物薄膜 PMMA-DR1 的电光系数张量，其测量值  $r_{13} = 8.3 \text{ pm/V}$ ,  $r_{33} = 25.7 \text{ pm/V}$ 。

**关键词：**光纤通信；光电子器件；极化聚合物；电光系数；马赫-曾德尔干涉仪

中图分类号：TN256 文献标识码：A

## Testing Electro-Optic Coefficients of Poled Polymers by Fiber-Optic Mach-Zehnder Interferometer

Wang Yiping Chen Jianping Li Xinwan Hong Jianxun Zhang Xiaohong Zhou Junhe Ye Ailun  
(State Key Lab of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

**Abstract:** It is proposed and demonstrated that the fiber-optic Mach-Zehnder (M-Z) interferometer measures accurately the electro-optic (EO) coefficients of, not only the polymer thin film, but also the polymer waveguide. Furthermore, the tensor components,  $r_{13}$  and  $r_{33}$ , of EO coefficient can be measured simultaneously. In contrast with the free space M-Z interferometer, the fiber-optic M-Z interferometer has some advantages, such as compact devices, simple experimental configuration, easy operation, and good stability. The outstanding advantage is that the second electrode need not be fabricated on the top of the polymer thin film. So, the measurement system is especially suitable to measure EO coefficients of the polymer samples on trial. In the measurement system, the interference output is fed back and controls the phase bias of the interferometer to decrease the requirement of the environmental stability and increase the measurement precision. The EO coefficient measurements of the PMMA-DR1 sample are  $r_{13} = 8.3 \text{ pm/V}$  and  $r_{33} = 25.7 \text{ pm/V}$ .

**Key words:** optical communication; poled polymer; electro-optic coefficient; fiber-optic Mach-Zehnder interferometer

## 1 引言

许多具有电光效应的材料在光纤通信及其相关领域已获得了广泛的应用。某些聚合物材料通过极化可使其具有较高的电光系数<sup>[1~3]</sup>。极化聚合物具有较高电光系数的特性使其可用于制备多种可实现高速调谐的光通信器件，比如电光调制器、光开关、

波长转换器和波导光栅等<sup>[1,4]</sup>。利用极化聚合物制备光电器件的一个首要工作是必须准确测试极化聚合物的电光系数，以便判断极化效率的大小。目前测试电光系数的常用方法是简单反射法<sup>[5]</sup>。该方法只能用于测试极化聚合物薄膜的电光系数，对于具有上、下包层的聚合物波导无能为力。此外，该方法

\* 国家自然科学基金(90204006, 60377013)、中国博士后科学基金(2003034258)、教育部博士点基金(20030248035)和上海市科委(036105009)资助课题。

作者简介：王义平(1971~)，男，重庆人，上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室博士后，主要从事光纤光栅、电光聚合物波导器件、波导光栅、光开关、调制器等光有源无源器件的研究。E-mail: ypwang@china.com

收稿日期：2004-09-29；收到修改稿日期：2005-02-21

只能测试电光系数张量元  $r_{33}$  不能测试  $r_{13}$ , 并且测量精度一般较低。Norwood 和 K. D. Singer 等<sup>[6,7]</sup>报道了用空间马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉法测试聚合物电光系数<sup>[6,7]</sup>, 该方法可以同时测试极化聚合物的电光系数张量元  $r_{13}$  和  $r_{33}$ 。

本文提出用光纤马赫-曾德尔干涉法测试极化聚合物的电光系数, 克服了简单反射法只能测量一个电光系数张量元  $r_{33}$  且测量精度较低的不足。该方法不仅可以测量聚合物薄膜的电光系数而且可以测量聚合物波导的电光系数, 并且可以同时测量聚合物的电光系数张量元  $r_{13}$  和  $r_{33}$ 。

## 2 测量原理

马赫-曾德尔干涉仪的输出强度可表示为<sup>[6~8]</sup>

$$I = \frac{1}{2} [E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}\cos(\phi + A\cos\Omega t)], \quad (1)$$

其中  $\Omega$  表示一个臂的调制频率,  $A$  表示相位调制幅度,  $E_{01}$  和  $E_{02}$  表示干涉仪每个臂中光场电场分量的幅度,  $\phi$  表示干涉仪的相位偏置点, 即没有调制时的相位差。对于小信号调制, 输出调制幅度可表示为

$$I_d = E_{01}E_{02}A|\sin\phi|. \quad (2)$$

图 1 表示干涉仪输出调制强度(实线)和干涉强度(虚线)与相位偏置点的关系。由图 1 和(2)式可知, 当  $\phi = \pi/2$  时调制灵敏度最高并且调制输出和调制信号具有较好的线性关系。当  $\phi$  为 0 和  $\pi$  时, 干涉仪的输出分别为最大值  $I_{\max}$  和最小值  $I_{\min}$ 。因此,  $E_{01}E_{02}$  可表示为

$$E_{01}E_{02} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2}. \quad (3)$$

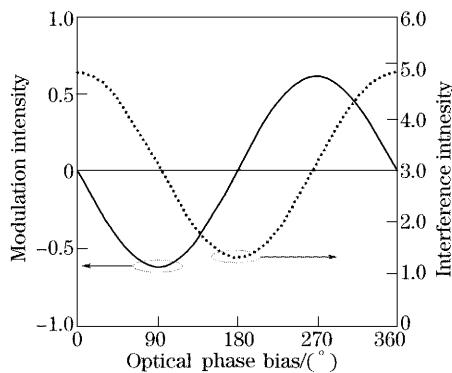


图 1 马赫-曾德尔干涉仪调制强度(实线)和干涉强度(虚线)与相位偏置点的关系

Fig. 1 The modulation intensity (solid curve) and the interference intensity (dotted curve) depend on the optical phase bias  $\phi$

根据菲涅耳定律, 极化聚合物中偏振角为  $\theta$  的入射光对应的折射率  $n_\theta$  和电光系数张量  $r_\theta$  可表示为<sup>[6,9]</sup>

$$1/n_\theta^2 = \cos^2\theta/n_e^2 + \sin^2\theta/n_o^2, \quad (4)$$

$$r_\theta = r_{33}\cos^2\theta + r_{13}\sin^2\theta, \quad (5)$$

式中  $n_e$  和  $n_o$  分别表示对应 e 光和 o 光的折射率,  $r_{13}$  和  $r_{33}$  分别表示极化聚合物的电光系数张量元。如果极化聚合物表面有一对平行板电极并施加调制电压, 则(1)式和(2)式中的相位调制幅度  $A$  可表示为

$$A = \pi r_\theta n_\theta^3 V_{\text{rms}}/\lambda, \quad (6)$$

式中  $V_{\text{rms}}$  表示均方根调制电压。由(2)式、(3)式和(6)式可知, 当  $\phi = \pi/2$  时, 极化聚合物电光系数  $r_\theta$  可表示为

$$r_\theta = \frac{2\lambda I_{\text{sig}}}{\pi n_\theta^3 V_{\text{rms}}(I_{\max} - I_{\min})}, \quad (7)$$

式中  $I_{\text{sig}}$  表示测得的极化聚合物的调制输出。由(5)式和(7)式可知, 通过改变入射光的偏振角  $\theta$ , 可以得到聚合物电光系数张量元  $r_{13}$  和  $r_{33}$ 。即当  $\theta = 0$  时测得的电光系数张量元  $r_\theta = r_{33}$ ; 当  $\theta = \pi/2$  时测得的电光系数张量元  $r_\theta = r_{13}$ 。

## 3 实验

如图 2 所示, 极化聚合物电光系数的测试系统由光纤马赫-曾德尔干涉仪和外围电路组成。其中光纤马赫-曾德尔干涉仪由光源(Laser)、偏振控制器(PC)、压电陶瓷(PZT)、三个耦合器(CO1, CO2, CO3), 一对准直器(COL)以及被测样品(Sample)组成。光纤马赫-曾德尔干涉仪的测试臂中的偏振控制器用于改变输入光的偏振态, 被测样品被插入准

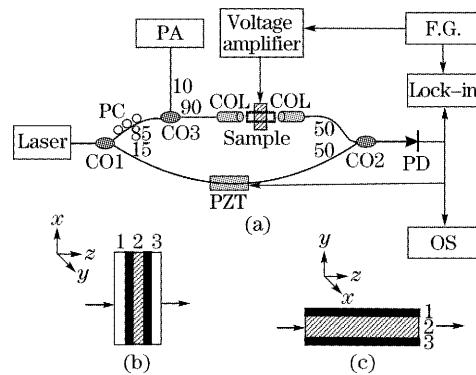


图 2 (a) 光纤马赫-曾德尔干涉测试系统,(b)聚合物薄膜样品,(c)聚合物波导样品

Fig. 2 (a) Fiber-optic Mach-Zehnder interference measurement system, (b) polymer thin film sample, (c) polymer waveguide sample

直器中。偏振控制器的输出被接到一个分光比为 10:90 的  $1\times 2$  耦合器 CO3。该耦合器的一个输出端(分光比 90%)接准直器,另一个输出端(分光比 10%)接偏振分析仪(PA)。该偏振分析仪用于监测偏振控制器输出光的偏振态,从而保证偏振控制器输出具有合适偏振态的偏振光。光纤马赫-曾德尔干涉仪的参考臂的一部分光纤被粘贴于压电陶瓷上,通过改变压电陶瓷上的电压可以改变干涉仪的相位偏置点  $\phi$ 。为了防止光纤松弛,光纤被粘贴于压电陶瓷前应剥除涂覆层。由光纤马赫-曾德尔干涉仪的干涉原理可知,干涉仪的灵敏度和测量精度与两个干涉臂的光程差和能量差密切相关<sup>[8]</sup>。即两个干涉臂的光程差越小,干涉条纹的间距越宽;两干涉臂中的能量差越小,干涉图案的条纹可见度越高。因此,设计光纤马赫-曾德尔干涉仪时应使两干涉臂的光程差和能量差都尽可能小。被测样品和准直器的插入损耗以及耦合器 CO3 的分光作用可能导致两干涉臂中的能量  $E_{01}$  和  $E_{02}$  相差较大,从而使干涉图案的条纹可见度降低。为了解决这一问题,测试方案中输入端选用耦合比为 85:15(测试臂 85,参考臂 15)的耦合器,输出端选用 50:50 的耦合器,从而使得在第二个耦合器处两干涉臂中的能量尽可能一致,从而提高干涉图案的条纹可见度。当用放大自发辐射(ASE)宽带光源输入时,由光谱仪(Anritsu MS9710B)测得的第二个耦合器输出端的干涉图案如图 3 所示,干涉条纹的可见度较高,因此该装置的测试精度较高。

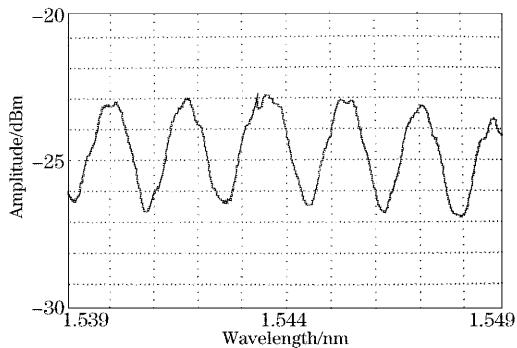


图 3 光谱仪测得的光纤马赫-曾德尔干涉仪的干涉谱图  
Fig. 3 Interference spectrum of fiber-optic Mach-Zehnder interferometer measured by optical spectrum analyzer

外围电路由光电探测器(PD)、锁相放大器(Lock-in, 型号: EG&G Model 5101)、示波器(OS, 型号: HP 54610A)、函数发生器(F. G., 型号: DF1640)和放大器(Voltage amplifier)组成。函数发生器输出的高频调制信号分为两路,一路经放大

器放大后施加在聚合物的电极上从而实现对聚合物的电光调制;另一路直接接到锁相放大器的参考端。光纤马赫-曾德尔干涉仪输出的光信号经光电探测器转换为含有调制信息的电信号。该电信号分为三路,一路接锁相放大器的输入端,经锁相放大后读出调制输出信号  $I_{\text{sig}}$ ;第二路由示波器读出,用于监测干涉仪的相位偏置点;第三路反馈回到压电陶瓷,实现对压电陶瓷的闭环控制,从而确保测试过程中干涉仪的相位偏置点一直稳定在最佳偏置点  $\phi=\pi/2$ ,降低测试系统对环境稳定性的要求。

被测样品既可以是如图 2(b)所示的带有一个透明电极的聚合物薄膜,也可以是如图 2(c)所示的带有一对平行板电极的聚合物波导。图 2(b)中的“1”、“2”、“3”分别表示镀有氧化铟锡(Indium tin oxide, ITO)电极的玻璃片、聚合物薄膜、镀有氧化铟锡电极的玻璃片,其中粗黑线表示氧化铟锡电极。图 2(c)中的“1”、“2”、“3”分别表示上电极、聚合物波导、下电极。若该测试系统用于测量聚合物薄膜的电光系数,则被测聚合物薄膜样品的准备过程如下:首先在玻璃基底上蒸镀透明电极氧化铟锡;然后用旋涂法把主客掺杂型聚合物 PMMA-DR1 旋涂在氧化铟锡电极的表面并进行固化处理;最后对聚合物薄膜进行电晕极化<sup>[10]</sup>,使其具有电光效应。测试时把极化后的聚合物薄膜插入干涉仪测试臂中的准直器之间,并使聚合物薄膜表面与准直器的光路垂直。把另一片镀有透明电极氧化铟锡的玻璃片紧贴在聚合物薄膜的表面,注意使氧化铟锡电极和聚合物薄膜直接接触,以便和聚合物薄膜基底上的电极一起构成一对平行板电极。若该测试系统用于测试已制备好电极的聚合物波导的电光系数,则直接把聚合物波导的尾纤接入干涉仪的测试臂,而不用测试臂中的准直器。此时,调制电场的方向垂直于光的传输方向。

电光系数的测试步骤如下:第一步,用可调谐激光器(Anritsu MG9638A)作为输入光源,输入波长为 1550 nm,调节测试臂上的偏振控制器使偏振光的偏振方向与图 2 所示的  $x$  轴成角  $\theta$ 。偏振控制器输出偏振光的偏振方向可由偏振分析仪监测。第二步,调节参考臂压电陶瓷上的直流偏置电压,使干涉仪的输出分别达到最大值  $I_{\text{max}}$  和最小值  $I_{\text{min}}$ ,再次调节压电陶瓷上的偏置电压使干涉仪输出为  $(I_{\text{max}} + I_{\text{min}})/2$ ,使干涉仪处于最佳相位偏置点。第三步:在被测样品的电极上施加频率为 50 kHz 的交流调制电压  $V_{\text{rms}}$ 。第四步,调制后的光信号经光

电探测器转换为电信号并经锁相放大器读出电光调制输出信号  $I_{\text{sig}}$ 。最后,根据测得的结果通过(7)式可计算出对应偏振角  $\theta$  的电光系数张量  $r_\theta$ 。

由多次实验得知,当调制频率低于 10 kHz 时电光调制输出中混杂着比较严重干扰信号。因此,为了提高测试系统的测量精度本实验采用 50 kHz 的高频调制信号。在偏振分析仪的监测下调节偏振控制器的手动旋钮使其输出光(被测样品的输入光)的偏振方向与图 2 所示的  $x$  轴之间的夹角  $\theta$  先后为 0 和  $\pi/2$ ,则可分别获得电光系数张量元  $r_{33}$  和  $r_{13}$ 。在偏振控制器输出光偏振角分别为 0 和  $\pi/2$  的情况下,先后施加不同的调制电压  $V_{\text{rms}} = 30 \text{ V}, 40 \text{ V}, 50 \text{ V}, 60 \text{ V}$ ,

表 1 由示波器和锁相放大器测得的聚合物薄膜电光调制数据

Table 1 Data measured by the oscilloscope and the lock-in amplifier

| Times | $\theta=0$                |                           |                        |                           |                           | $\theta=\pi/2$            |                           |                        |                           |                           |
|-------|---------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|
|       | $V_{\text{rms}}/\text{V}$ | $I_{\text{sig}}/\text{V}$ | $r_{33}/(\text{pm/V})$ | $I_{\text{max}}/\text{V}$ | $I_{\text{min}}/\text{V}$ | $V_{\text{rms}}/\text{V}$ | $I_{\text{sig}}/\text{V}$ | $r_{33}/(\text{pm/V})$ | $I_{\text{max}}/\text{V}$ | $I_{\text{min}}/\text{V}$ |
| 1     | 30                        | 15.2                      | 25.6                   |                           |                           | 30                        | 4.5                       | 8.4                    |                           |                           |
| 2     | 40                        | 20.4                      | 25.8                   |                           |                           | 40                        | 5.9                       | 8.3                    |                           |                           |
| 3     | 50                        | 25.5                      | 25.7                   | 6.236                     | 0.946                     | 50                        | 7.6                       | 8.5                    | 5.935                     | 1.152                     |
| 4     | 60                        | 30.3                      | 25.5                   |                           |                           | 60                        | 8.9                       | 8.3                    |                           |                           |

## 4 结 论

光纤马赫-曾德尔干涉法不仅可以测试极化聚合物薄膜的电光系数,而且可以测试极化聚合物波导的电光系数。此外,该方法能同时测量极化聚合物的电光系数张量元  $r_{13}$  和  $r_{33}$ ,且测量精度较高。该方法最突出的优点是极化聚合物薄膜的第二个电极可用一片镀有氧化铟锡电极的玻璃片临时构成,不必在聚合物薄膜表面制备第二个电极。因此,该方法尤其适合于在电光聚合物试制阶段多次反复测试电光系数,从而降低电光器件的研制成本。同时该方法也可用于波导制备阶段的电光系数的测试,即测试聚合物波导的电光系数。光纤马赫-曾德尔干涉仪的输出被反馈到参考臂中控制相位偏置点的压电陶瓷,从而实现对干涉仪相位偏置点的闭环控制,降低了测试系统对环境稳定性的要求并且提高了测量精度。该方法所表现出来的这些优点使其有望在极化聚合物电光系数的测量中获得广泛应用。

## 参 考 文 献

- Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua. Study of polymer-based electrooptic modulators using contact poling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(4): 422~425 (in Chinese)  
杨建义, 江晓清, 王明华. 采用接触式极化法研制有机聚合物电光波导调制器[J]. 光学学报, 2003, 23(4): 422~425
- Ren Quan, Lü Zhenghai, Ma Changbao et al.. Electro-optic properties and relaxation of nano-crystal and polymer composite thin film PbTiO<sub>3</sub>-PEK-c[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(7): 882~885 (in Chinese)  
任 诠, 吕增海, 马常宝等. 纳米晶聚合物复合薄膜 PbTiO<sub>3</sub>-PEK-c 的电光特性及其弛豫过程的研究[J]. 光学学报, 2002, 22(7): 882~885
- Xu Zhiling, Liu Liying, Liu Xiu et al.. Investigation on the electro-optic properties and the relaxation of electric poled dye doped polymer films[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, 27(8): 746~750 (in Chinese)  
徐志凌, 刘丽英, 刘 秀等. 掺杂型极化聚合物薄膜电光特性及弛豫过程研究[J]. 中国激光, 2000, 27(8): 746~750
- Oh M. C., Zhang H., Zhang C. et al.. Recent advances in electrooptic polymer modulators incorporating highly nonlinear chromophore[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 2001, 7(5): 826~835
- Teng C. C., Man H. T., Simple reflection technique for measuring the electro-optic coefficient of poled polymers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56(18): 1734~1736
- Norwood R. A., Kuzyk M. G., Keosian R. A.. Electra-optic tensor ratio determination of side-chain copolymers with electro-optic interferometry[J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, 75(4): 1869~1874
- Singer K. D., Kuzyk M. G., Holland W. R. et al.. Electro-optic phase modulation and optical second-harmonic generation in corona-poled polymer films [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, 53(19): 1800~1802
- Ahn J. T., Lee H. K., Kim K. H et al.. A stabilised fibre-optic Mach-Zehnder interferometer filter using an independent stabilisation light source[J]. *Opt. Commun.*, 1998, 157: 62~66
- Fusheng Qiu, Kazuhiko Misawa, Xiaoman Cheng et al.. Determination of complex tensor components of electro-optic constants of dye-doped polymer films with a Mach-Zehnder interferometer[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 65(13): 1605~1607
- Daoa P. T., Williams D. J., McKenna W. P et al.. Constant current corona charging as a technique for poling organic nonlinear optical thin films and the effect of ambient gas[J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, 73(5): 2043~2050