

# 利用超高阶导模测量 PMN-PT 透明陶瓷 二次电光系数

冉茂武<sup>1,2</sup> 陈险峰<sup>2</sup> 曹庄琪<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 铜仁学院物理与电子科学系, 贵州 铜仁 554300  
<sup>2</sup> 上海交通大学物理系区域光纤通信网和新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

**摘要** 以亚毫米尺度的铌镁酸铅-钛酸铅(PMN-PT)透明陶瓷片为导波层制备了对称金属包覆波导,并利用自由空间耦合技术激发了波导中的超高阶导模。根据衰减全反射(ATR)峰的移动,得到了在波导两侧所施加电压与光强反射率的关系,从而计算了 PMN-PT 透明陶瓷片的二次电光系数。

**关键词** 光学器件; 铌镁酸铅-钛酸铅; 二次电光系数; 衰减全反射; 灵敏度

**中图分类号** TM286; TN252; O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1012002

## Measurement of Quadratic Electro-Optic Coefficient of PMN-PT Transparent Ceramics Based on Ultrahigh-Order Guide Modes

Ran Maowu<sup>1,2</sup> Chen Xianfeng<sup>2</sup> Cao Zhuangqi<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics and Electronic Science, Tongren University, Tongren, Guizhou 554300, China  
<sup>2</sup> State Key Laboratory on Fiber Optic Local Area Communication Networks and Advanced Optical Communication Systems, Department of Physics, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract** Ultrahigh-order guide modes are excited by employing the free-space coupling technique in a symmetrical metal-cladding optical waveguide fabricated with a submillimeter-scale transparent PMN-PT ceramics. The voltage-dependent variation of the reflectivity of the light intensity is obtained according to the shift of the attenuated total reflection (ATR) resonance dip and the quadratic electro-optic coefficient of the transparent PMN-PT ceramics is then calculated.

**Key words** optical devices; PMN-PT; quadratic electro-optic coefficient; attenuated total reflection; sensitivity

**OCIS codes** 120.1880; 160.1190; 160.2100

## 1 引 言

电光效应是指对晶体施加电场时,晶体折射率发生变化的效应。有些晶体内部由于自发极化存在着固有电偶极矩,当对这种晶体施加电场时,外电场使晶体中的固有偶极矩的取向倾向于一致或某种优势取向,即外电场使晶体的光率体发生变化,从而改变晶体的折射率<sup>[1~3]</sup>。在光通信系统中,电-光调制器就是利用电场使晶体的折射率改变这一原理制成的。

光学陶瓷是透明电光陶瓷材料中一种,它的晶

状结构与钙钛矿相同,目前已经是广泛用于生产设备、医疗、军事、激光以及电子行业的新型无机材料,它们是很好的压电换能材料、铁电材料、电光材料、非线性光学材料及表面波基质材料<sup>[4~6]</sup>等,还可以作为电光材料在光通信中起到光调制作用。光学陶瓷种类较多,其中铌镁酸铅-钛酸铅(PMN-PT)透明陶瓷具有特有性质<sup>[7~9]</sup>。但是,过去主要是研究它的压电特性,而对它的电光特性研究在国内外只有少量以专利形式出现的报道<sup>[10,11]</sup>,为了进一步认识 PMN-PT 透明陶瓷的电光特性,这里介绍一种利

**收稿日期**: 2011-03-04; **收到修改稿日期**: 2011-05-04

**基金项目**: 国家自然科学基金(60677029,10874119,10874121)、“西部之光”访问学者计划基金项目和贵州省教育厅自然科学基金(黔教科 2008098)资助课题。

**作者简介**: 冉茂武(1971—),男,副教授,主要从事生物传感器方面的研究。E-mail: trxyrmw@163.com

用对称金属包覆波导超高阶导模<sup>[12,13]</sup>测量 PMN-PT 透明陶瓷二次电光系数的方法。这种方法具有样品制备简单、实验操作方便,且灵敏度高的优点。

## 2 测量原理

待测样品结构如图 1 所示,从上到下折射率依次为  $n_0, n_1, n_2$  和  $n_1$  的空气、上银膜、电光陶瓷和下银膜,  $h_1, h_2$  和  $h_3$  分别为上银膜、电光陶瓷和下银膜的厚度,上下银膜和电光陶瓷构成对称金属包覆波导。当一束经准直的偏振光直接入射于上银膜表面,设入射角为  $\theta$ ;通过角度扫描测量反射率的方法,可以得到如图 2 所示(粗线)表征一个超高阶导模的衰减全反射(ATR)谱。对称金属包覆波导中的超高阶导模是一种有效折射率趋于零的模式,具有特别高的灵敏度<sup>[13]</sup>。由于这种方法不需要棱镜和光栅等耦合元件<sup>[14~17]</sup>,称之为自由空间耦合技术<sup>[18]</sup>。容易看出,ATR 吸收峰的上升或下降沿具有很好的线性,若选取工作角于线性较好的吸收峰下降沿的中点附近,当作为待测样品折射率灵敏函数的吸收峰位置发生变化时,可测得反射率的明显变化。设初始工作角为  $\theta_1$ ,对应的反射率为  $R_1$ ,当波导上施加一定的电场  $E(E = U/h_2)$  时,待测样品的折射率因电光效应而产生  $\Delta n_2$  的变化,从而引起如图 2 中细线所示的 ATR 吸收峰位置的移动  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ ,这时,反射率变化为  $\Delta R = R_2 - R_1$ 。

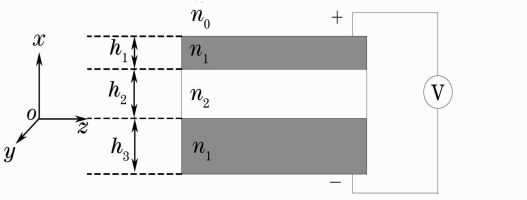


图 1 待测样品结构图

Fig. 1 Sample structure for measurement

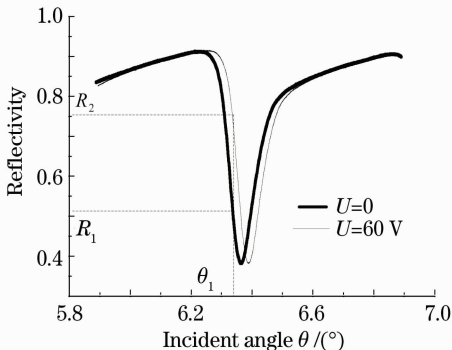


图 2 ATR 谱移与电压关系

Fig. 2 Relation of ATR spectral shift with voltage

二次电光系数张量的形式<sup>[19,20]</sup>为

$$\gamma_{i,j} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{12} & \gamma_{11} & \gamma_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{12} & \gamma_{12} & \gamma_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{44} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $\gamma_{44} = (\gamma_{11} - \gamma_{12})/2$ ,待测样品在电场  $E$  作用下折射率变化为

$$\Delta n_2 = -\frac{1}{2}\gamma_{1j}n_2^3E^2, \quad (2)$$

折射率变化  $\Delta n_2$  与反射率变化  $\Delta R$  的关系为<sup>[21]</sup>

$$\Delta R = \frac{k}{n_0 \cos \theta} \Delta n_2, \quad (3)$$

式中  $k = \Delta R/\Delta\theta$ ( $\Delta\theta$  为工作角移动的变化量,也等于同步角移动的变化量)为下降沿的中点附近的斜率,由(2)与(3)式可以得到

$$\gamma_{ij} = -\frac{2n_0 \cos \theta}{kn_2^3 E^2} \Delta R, \quad (4)$$

把  $E = U/h_2$  代入(4)式并化简得

$$\gamma_{ij} = -\frac{2n_0 h_2^2 \cos \theta}{n_2^3 U^2} \Delta R, \quad (5)$$

式中  $i = 1, j = 1, 2$  分别对应 TM 和 TE 模式。其中  $n_0, n_2, h_2$  是已知量, $\theta, U, \Delta\theta$  可以从实验测量,因此,可以求出待测样品的二次电光系数。

## 3 实验与结果

如图 3 所示,波导材料采用 PMN-PT 透明陶瓷(Boston Applied Technology Inc.),陶瓷片的面积为  $15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,厚度为  $622 \mu\text{m}$ ,通过磁控溅射在陶瓷片上下两面分别镀厚度约为 30 和 200 nm 的银膜,构成上银膜-PMN-PT-下银膜对称金属包覆波导。上下银膜既是波导的包覆层,又可作为透明陶瓷的一对电极。

测量 PMN-PT 透明陶瓷二次电光系数的实验装置如图 4 所示,样品放置在计算机控制的  $\theta/2\theta$  角



图 3 PMN-PT 透明陶瓷

Fig. 3 PMN-PT transparent ceramics

度扫描仪上,用波长为 860 nm(TM 模式)的激光二极管(LD)激光直接入射到波导的上银膜,反射光有一光电探测器测量,并经过模/数(A/D)转换后输入计算机。

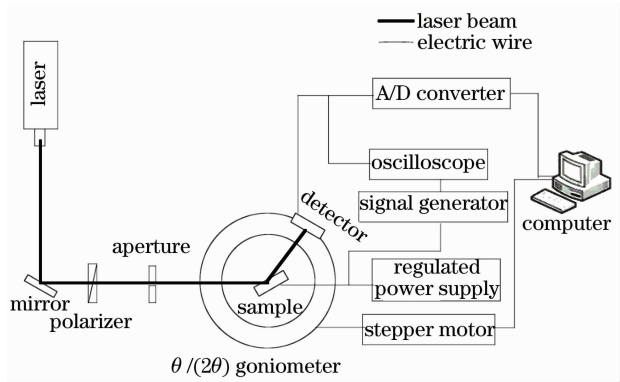


图 4 实验测量装置

Fig. 4 Experimental setup for the measurement

实验过程中,如图 5(C2 通道)所示,在波导上下两电极上施加由信号发生器(Lecroy WR 6200)输出的施加峰值为 43.05 V,频率为 5.0371 Hz 的三角波,并进行角度扫描。反射率的变化  $\Delta R$  在示波器上的波形如图 5 所示(C3 通道)。

由图中波形可以看出,反射光强随外加电场变化的曲线是一条抛物线,因此可以推断出 PMN-PT 透明陶瓷的光强反射率变化与外加电场的场强二次方成正比<sup>[21]</sup>,所以 PMN-PT 透明陶瓷具有二次电光效应。如图 6 所示,粗线是没有施加电压时的衰减全反射(ATR)谱,施加 50 V 的稳恒电压后,得到图中细线所示的 ATR 谱。根据(5)式,可以算出 PMN-PT 透明陶瓷的二次电光系数  $\gamma_{11}$ 。同理利用

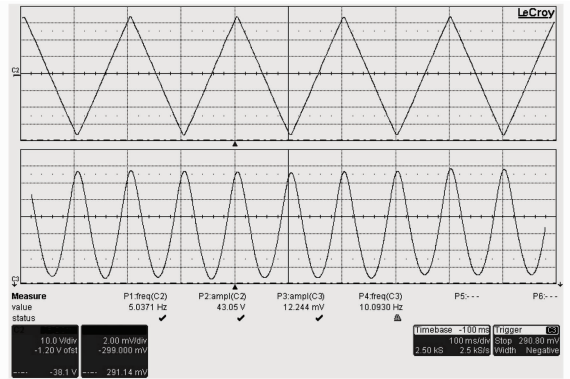


图 5 三角波电压(C2)与反射光强波形(C3)

Fig. 5 Waveforms of triangular voltage (C2) and reflected light intensity (C3)

TE 模的 ATR 谱,可以测量  $\gamma_{12}$ ,所得结果由表 1 所示。与锆钛酸铅钽(PLZT) ( $3.0 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ ) 和聚合物( $4.0 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{V}^2$ ) 等材料相比,PMN-PT 透明陶瓷具有较大的二次电光系数,是一种很好的电光材料,可以用来制作可变光衰减器、偏振控制器、多层电容、梳状滤波器和 Q 开关等。

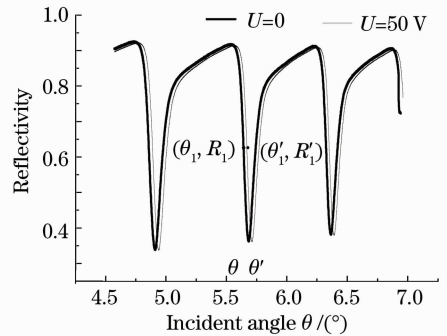


图 6 ATR 谱实验曲线(TM 模)

Fig. 6 Experimental curve ATR spectra (TM mode)

表 1 测量结果

Table 1 Results of measurement

Sample	$n_0$	$n_2$	Thickness $h_2/\mu\text{m}$	Synchronism angle(TM)		Voltage $U/V$	Electro-optic coefficient	
				$\theta_0/(\text{^\circ})$	$\theta'_0/(\text{^\circ})$		$\gamma_{11}/(\text{m}^2/\text{V}^2)$	$\gamma_{12}/(\text{m}^2/\text{V}^2)$
PMN-PT	1.00027	1.8299	622	5.4591	5.5180	50	$5.1683 \times 10^{-14}$	$6.106 \times 10^{-14}$

## 4 结 论

根据各向同性材料的二次电光系数张量的形式,得到了二次电光系数与电压的关系。实验中利用对称金属包覆波导中的超高阶导模测量了 PMN-PT 透明陶瓷的二次电光系数,该方法具有待测样品容易制备、灵敏度高等优点。

## 参 考 文 献

1 Jiang Minhua. Crystal Physics [M]. Jinan: Shandong Science

and Technology Press, 1982. 349~366  
江民华. 晶体物理 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1982. 349~366  
2 Chen Gang, Liao Liji. Crystal Physics [M]. Beijing: Science Press, 1992. 320~474  
陈 刚, 廖立季. 晶体物理学基础 [M]. 北京: 北京科学出版社, 1992. 320~474  
3 Yin Xin, Wang Jiyang, Zhang Shaojun *et al.*. The study of the electrooptic effect of the optical active crystals in polarized light interometric experiment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1484~1488  
尹 鑫, 王继扬, 张少军等. 旋光晶体在偏光干涉实验中电光效应的研究 [J]. 光学学报, 2003, **23**(12): 1484~1488

- 4 Ji Yaming, Jiang Danyu, Feng Tao *et al.*. Fabrication and developments of transparent ceramics [J]. *J. Inorganic Materials*, 2004, **19**(2): 275~282  
吉亚明, 蒋丹宇, 冯涛等. 透明陶瓷材料现状与发展 [J]. 无机材料学报, 2004, **19**(2): 275~282
- 5 Jiang Dongliang. Transparent ceramics-on of the most important field of research and development of inorganic materials [J]. *J. Inorganic Materials*, 2009, **24**(5): 873~881  
江东亮. 透明陶瓷—无机材料研究与发展重要方向之一 [J]. 无机材料学报, 2009, **24**(5): 873~881
- 6 Li Weidong, Cao Ying, Fang Minghao *et al.*. Developmental trend of transparent ceramics [J]. *J. Synthetic Crystals*, 2007, **36**(2): 102~105  
李卫东, 曹瑛, 房明浩等. 透明陶瓷的研究进展 [J]. 人工晶体学报, 2007, **36**(2): 102~105
- 7 Pawan Kuitiar, Chandra Prakashb. Dielectric, ferroelectric and pyroelectric kproperties of PMNT ceramics [J]. *Physica B*, 2006, **371**(2): 313~316
- 8 Lappalainen, J. Hiltunen, V. Lantto. Characterization of optical properties of nanocrystalline doped PZT thin film [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2005, **25**(12): 2273~2276
- 9 Jiang Desheng, Liu Zhongming, Tong Xinglin *et al.*. Characteristic and fabrication technology of transparent electrooptic PMN-PT ceramic material [M]. *Materials Review*, 2007, **21**: 289~292  
姜德生, 刘忠明, 童杏林等. PMN-PT 透明光电陶瓷材料的特性及制备技术 [J]. 材料导报, 2007, **21**: 289~292
- 10 K. K. Li. Electro-optic ceramic material and device [P]. US Patent Application 10/139857, 2005
- 11 K. K. Li. Electro-optic ceramic material and device [P]. US Patent Number 6746618, 2004
- 12 Cao Zhuangqi. Guided Wave Optics [M]. Beijing: Science Press, 2007. 157~165  
曹庄琪. 导波光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007. 157~165
- 13 Lu Haifeng, Cao Zhuangqi, Li Honggen *et al.*. Study of ultrahigh-order modes in a symmetrical metal-cladding optical waveguide[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(20): 4579~4581
- 14 Ge Guoku, Li Chunfan, Duan Tao *et al.*. Enhancement of Goos-Hänchen shift in prism-film coupling configuration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 768~772  
葛国库, 李春芳, 段 煦等. 棱镜—薄膜耦合结构中光束 Goos-Hänchen 位移的增强 [J]. 光学学报, 2008, **28**(4): 768~772
- 15 Wang Dazheng, Wang Yonggang, Liu Suping *et al.*. New reflecting side-pumped method of double clad fiber laser by micro-prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 974~979  
王大拯, 王勇刚, 刘素平等. 双包层光纤激光器微棱镜反射式侧面耦合的新技术 [J]. 光学学报, 2009, **29**(4): 974~979
- 16 Pei Li, Zhao Ruifeng, Ning Tigang *et al.*. Wavelength-division femultiplexer based on FBG coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 308~311  
裴 丽, 赵瑞峰, 宁提纲等. 基于光纤光栅辅助耦合的 WDM 下话路研究 [J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 308~311
- 17 Hong Jianxun, Xu Kai, Zhou Limin *et al.*. Tapers in electro-optic polymer waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2686~2691  
洪建勋, 徐 凯, 周立民等. 电光聚合物波导中的锥形结构 [J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2686~2691
- 18 Li Honggen, Cao Zhuangqi, Lu Haifeng *et al.*. Free-space coupling of a light beam into a symmetrical metal-cladding optical waveguide[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(14): 2757~2759
- 19 A. Yariv, P. Yeeh. Optical Waves in Crystals[M]. Hoboken: Wiley Press, 1984
- 20 Zhu Kun, Deng Xiaoxu, Cao Zhuangqi *et al.*. Measurement of the quadratic electro-optic coefficient of organic polymer based on attenuated-total-reflection technique [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(1): 76~79  
朱 琨, 邓晓旭, 曹庄琪等. 基于 ATR 技术的有机聚合物二次电光系数的测量 [J]. 光电工程, 2008, **35**(1): 76~79
- 21 Zhou Jianhong, Deng Xiaoxui, Cao Zhuangqi *et al.*. Determination of Kerr coefficients of polymer films with prism optical waveguide configuration[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(2): 021106