

用古斯-亨兴位移研究 PMN-PT 电光陶瓷的电光效应

冉茂武^{1,2} 曹庄琪² 陈险峰² 陈 凡³

¹铜仁学院物理与电子科学系, 贵州 铜仁 554300

²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

³菲尼萨光电通讯有限公司, 上海 201201

摘要 根据对称金属包覆电光波导中本征损耗与古斯-亨兴(Goos-Hänchen)位移的理论公式, 导出了古斯-亨兴位移与作用于波导两侧电压的二次关系公式。用 622 μm 厚度的四方相铌镁酸铅-钛酸铅(PMN-PT)透明电光陶瓷片作为导波层制备了对称金属包覆波导, 测量了古斯-亨兴位移与作用于波导两侧电压的关系曲线, 计算了所用透明电光陶瓷片的二次电光系数。实验结果与理论分析一致。

关键词 非线性光学; 古斯-亨兴位移; 光波导; 四方相铌镁酸铅-钛酸铅

中图分类号 O437.4; TM286; TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0906001

Study on Electro-Optic Effect of PMN-PT Ceramics Using Goos-Hänchen Shift

Ran Maowu^{1,2} Cao Zhuangqi² Chen Xianfeng² Chen Fan³

¹Department of Physics and Electronic Science, Tongren University, Tongren, Guizhou 554300, China

²The State Key Laboratory on Fiber Optic Local Area Communication Networks and Advanced Optical Communication Systems, Department of Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

³Finisar Shanghai Incorporation, Shanghai 201201, China

Abstract The Goos-Hänchen shift at both sides of the waveguide is conducted, which gives rise to a quadric-curve relation between Goos-Hänchen shift and the applied voltage, based on the theoretical analysis of the intrinsic loss in a symmetrical metal-cladding electro-optic waveguide. A symmetrical metal-cladding waveguide is fabricated with a 622 μm -thick $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)\text{-PbTiO}_3$ (PMN-PT) transparent ceramic which serves as the guiding layer of the waveguide. Measurements of the relation between Goos-Hänchen shift and the applied voltage are carried out and the quadratic electro-optic coefficient of the PMN-PT ceramic is obtained. Experimental results are agreed well with the numerical simulations.

Key words nonlinear optics; Goos-Hänchen shift; optical waveguide; $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)\text{-PbTiO}_3$

OCIS codes 120.1880; 160.1190; 160.2100

1 引 言

由于优异的光学性能, 铌酸锂晶体在光通信领域得到了广泛的应用, 利用其制备的各种光耦合器、波导和调制器等在市场上层出不穷。但是铌酸锂晶体生长技术长期以来一直得不到突破, 制约了它的进一步发展。寻找性能更加优越、价格更加便宜的新材料来替代铌酸锂晶体已成为新世纪信息科学领域的一项重要任务^[1~4]。透明铁电陶瓷自 1970 年

问世以来就引起科研工作者的重视。其中, 锆钛酸铅镧(PLZT)和四方相铌镁酸铅-钛酸铅(PMN-PT)是两种得到广泛研究的材料。但 PLZT 透明电光陶瓷具有显著的场诱导效应、偏振依赖损失和高滞后现象, 使得该类透明电光陶瓷的应用受到限制^[5~8]。1996 年中国科学院上海硅酸盐研究所率先采用 Bridgman 方法生长 PMN-PT 单晶并获得初步成功; 最近 Jiang 等^[9]成功制备了 PMN-PT 透明

收稿日期: 2011-04-11; 收到修改稿日期: 2011-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(60677029, 10874119 和 10874121)和“西部之光”访问学者计划基金项目资助课题。

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

电光陶瓷,由于该材料介电常数高、介电损耗小、应变量大,有相对低的弥散相变和频率色散^[10],所以在电子技术、激光技术和全息存储等领域有广泛的应用前景。过去对 PMN-PT 透明电光陶瓷主要针对其压电特性的研究^[11,12]。本文提出一种利用产生于波导表面的超大古斯-亨兴(Goos-Hänchen)位移^[13~15]来研究 PMN-PT 透明电光陶瓷电光效应的新方法。结果表明,这种方法不仅具有样品制备简单、实验操作方便和灵敏度高等优点,而且具有抑制激光光强涨落噪声的功能。

2 理论分析

对称金属包覆电光波导如图 1 所示,从上到下介电常数依次为 $\epsilon_0, \epsilon_2, \epsilon_1$ 和 ϵ_2 的空气、上银膜、电光透明陶瓷和下银膜, h_2, h_1 和 h'_2 依次为上银膜、电光陶瓷和下银膜的厚度, θ 为共振匹配角, S 为古斯-亨兴位移量。当导波层厚度达到亚毫米量级时,波导中可以容纳上千个导模,其中的超高阶导模具有有效折射率 N 趋近于 0 的特性。在上层金属膜的厚度为几十纳米时,这种特性使得光可以直接从自由空间耦合进入波导层^[16]。

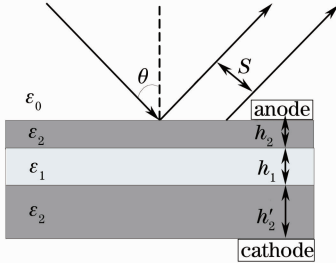


图 1 对称金属包覆电光波导

Fig. 1 Symmetrical metal-cladding electro-optical waveguide

本课题组前期的工作表明^[17~19]:在亚毫米尺度对称金属包覆波导表面可产生巨大的古斯-亨兴位移,该位移 S 与波导参数有如下关系

$$S = -\frac{2\text{Im} \Delta\beta^L}{(\text{Im} \beta^o)^2 - (\text{Im} \Delta\beta^L)^2} \cos \theta, \quad (1)$$

式中 $\text{Im} \Delta\beta^L$ 为波导辐射损耗, $\text{Im} \beta^o$ 为波导本征损耗。波导本征损耗可表示为^[20]

$$\text{Im} \beta^o = \epsilon_{i2} \frac{k_0^2 \mathbf{\kappa}_1^2}{2\alpha_2 \beta h_{\text{eff}} (\mathbf{\kappa}_1^2 + \alpha_2^2)}, \quad (\text{TE polarization}) \quad (2)$$

$$\text{Im} \beta^o = \epsilon_{i2} \frac{2\alpha_2^2 + k_0^2 \epsilon_{r2}}{2\alpha_2} \cdot \frac{\epsilon_1 \mathbf{\kappa}_1^2}{\beta h_{\text{eff}} (\epsilon_{r2}^2 \mathbf{\kappa}_1^2 + \epsilon_1^2 \alpha_2^2)}, \quad (\text{TM polarization}) \quad (3)$$

式中导波层中的横向波矢 $\mathbf{\kappa}_1$ 和金属中的衰减系数 α_2 可分别表示为

$$\begin{cases} \mathbf{\kappa}_1 = (k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2} \\ \alpha_2 = (\beta^2 - k_0^2 \epsilon_2)^{1/2} \end{cases}, \quad (4)$$

而 ϵ_{r2} 和 ϵ_{i2} 分别为银膜的介电常数 ϵ_2 的实部和虚部, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为入射光在空气中的波数, λ 为入射光波长, $\beta = k_0 N$ 为传播常数, $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$ 为导波层的折射率, $h_{1\text{eff}}$ 为导波层的有效厚度:

$$h_{1\text{eff}} = h_1 + \frac{2}{\alpha_2}, \quad (\text{TE polarization}) \quad (5)$$

$$h_{1\text{eff}} = h_1 + \frac{2\epsilon_1 \epsilon_{r2} (\mathbf{\kappa}_1^2 + \alpha_2^2)}{\alpha_2 (\epsilon_{r2}^2 \mathbf{\kappa}_1^2 + \epsilon_1^2 \alpha_2^2)}. \quad (\text{TM polarization}) \quad (6)$$

由于 PMN-PT 透明电光陶瓷是一种具有复合钙钛矿结构的弛豫型、固溶体单晶,它在室温条件下为三方相结构,具有强烈的各向异性^[21,22]。当施加电压 U 时,由于介质在电场 E 作用下极化导致折射率变化为^[23,24]

$$\Delta n_1 = -\frac{1}{2} \gamma_{1j} n_1^3 E^2, \quad (7)$$

式中 $E = U/h_1$, γ_{1j} 为待测二次电光系数。由于波导辐射损耗主要由上金属层的厚度决定,因此当在导波层两端施加电场时,由于导波层折射率的改变而使波导本征损耗产生变化,而波导辐射损耗的变化可忽略不计,在此假设下,根据(1)~(7)式,应用一阶微扰近似,可导出古斯-亨兴位移与电压的关系为

$$S = S_0 - \delta_{1j} U^2, \quad (8)$$

式中 S_0 是电压为零时的古斯-亨兴位移,即可利用(1)式得到, δ_{1j} 是与材料电光效应和波导结构参数有关的系数, $j = 1, 2$ 分别对应 TE 偏振和 TM 偏振,可表示为

$$\delta_{1j} = S_0^2 \frac{(\text{Im} \beta^o)^2 n_1^4 k_0^2 \alpha_2^2}{\text{Im}(\Delta\beta^L) \mathbf{\kappa}_1^2 (\mathbf{\kappa}_1^2 + \alpha_2^2) h_1^2 \cos^2 \theta} \gamma_{1j}^2. \quad (9)$$

3 实 验

实验中使用的样品是一块上下两面由银膜包覆的 PMN-PT 透明电光陶瓷片(菲尼萨光电通讯有限公司提供),陶瓷片的面积为 $15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,厚度为 $622 \mu\text{m}$ 。由热蒸发镀制的上下两层银膜的厚度分别为 30 nm 和 200 nm 左右,银膜的介电常数为 $\epsilon_2 = -34 + i1.17$ ($\lambda = 860 \text{ nm}$),上层银膜的厚度和介电常数由双波长法测量^[25]。上下两层银膜既是波导的覆盖层,又可作为电光波导的两个电极。实

实验装置如图 2 所示,从可调谐半导体激光器 (Topical Photonic, DL100, $\lambda = 860 \text{ nm}$) 输出的激光 (TE 偏振),先通过直径为 2 mm 、相距为 0.5 m 的两个小孔以限制光束的发散,两小孔中间的分束镜对光进行分束,部分反射光进入波长计,而透射光入射到置于计算机控制 $\theta/(2\theta)$ 角度扫描仪转台上的样品前。启动转台电机进行角谱扫描,就得到如图 3 所示的衰减全反射 (ATR) 谱。

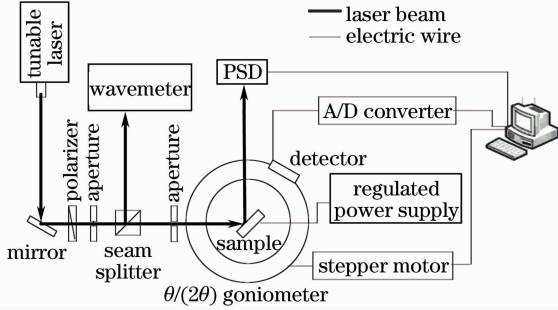


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for the measurement

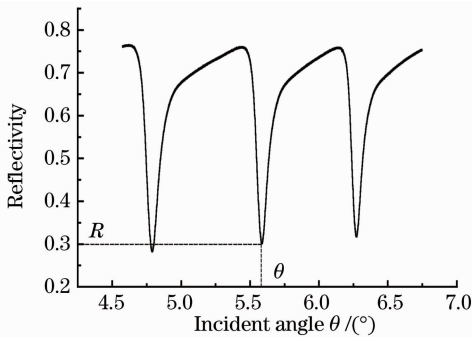


图 3 衰减全反射谱

Fig. 3 Attenuated total reflection spectrum

由于最小反射率对应的入射角也是波导本征损耗与辐射损耗最为接近的位置^[18],根据(1)式可知,该入射角对应所用波长下的最大古斯-亨兴位移。因此,选择共振匹配角 θ 为工作点,并让样品上的反射光垂直入射到位置探测器 (PSD)。这时,调节入射光的波长,同时测量古斯-亨兴位移 S ,则可以得到如图 4 所示的古斯-亨兴位移 S 随激光波长 λ 变化的实验曲线。由图可见,当 $\lambda = 859.778 \text{ nm}$ 时,古斯-亨兴位移达到极大 ($S_{\max} = 642 \mu\text{m}$)。

在此基础上,固定入射光波长不变,并在样品两侧电极上施加电压,每次增加 30 V ,可得到如图 5 所示的古斯-亨兴位移 S 与电压 U 的关系 (由黑点表示)。由图 5 可见,古斯-亨兴位移与电压成二次关系;并测得 TE 偏振对应的二次电光系数为 $\gamma_{11} = 2.092 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{V}^2$;用相同的方法测得 TM 偏振

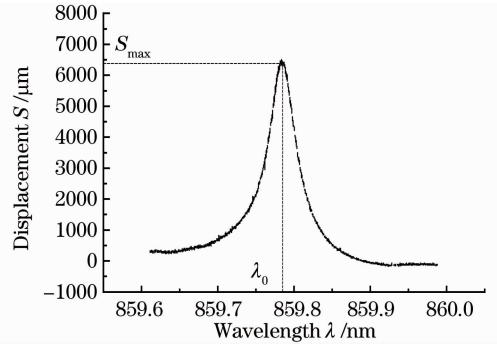


图 4 古斯-亨兴位移与波长的关系

Fig. 4 Goos-Hänchen shift versus the light wavelength

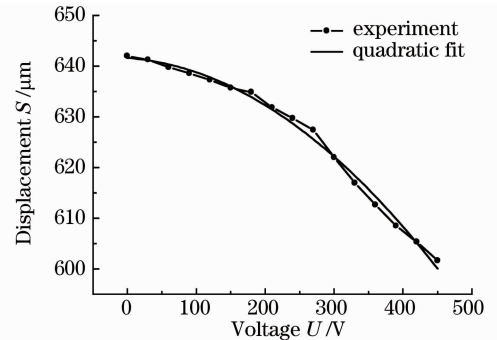


图 5 古斯-亨兴位移与作用电压的关系

Fig. 5 Goos-Hänchen shift versus applied voltage

对应的二次电光系数为 $\gamma_{12} = 1.984 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 。又利用(8)和(9)式进行了理论计算,所得结果由图中粗黑线表示,实验结果与理论计算符合得很好。

在以激光光强为探测信号的测量方法中,激光光强的涨落通常成为难以消除的噪声。本文利用古斯-亨兴位移为探针测量陶瓷玻璃的电光系数,而古斯-亨兴位移与激光光强的涨落无直接关系,因此,光强涨落引起的噪声在此方法中是完全被抑制的。

4 结 论

提出利用古斯-亨兴位移研究 PMN-PT 透明陶瓷的电光效应,结果表明 PMN-PT 透明陶瓷显示二次电光效应,实验结果与理论分析符合得很好。由于实验得到的古斯-亨兴位移超过了 0.6 mm ,而所使用的一维位置敏感探测器的分辨率为微米量级,当导波层折射率变化为 1×10^{-4} 时,即可测出古斯-亨兴位移的变化,说明灵敏度较高。另外,由于这种技术利用位移而不是用光强为探针,具有抑制光强涨落噪声的功能。除此之外,该方法还有样品制备简单、设备要求低等优点。

参 考 文 献

1 Geng Hua, Yao Jianghong, Li Wenrun *et al.*. Study on optical

- properties of Er³⁺ doped near-stoichiometric LiNbO₃ crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(6): 1549~1553
- 耿 华, 姚江宏, 李文润 等. 近化学计量组分掺铒铌酸锂晶体光学特性研究[J]. *物理学报*, 2003, **52**(6): 1549~1553
- 2 Fu Bo, Zhang Guoquan, Liu Xiangming *et al.*. Influence of dopants on nonvolatile holographic storage in lithium niobate[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(5): 2946~2951
- 付 博, 张国权, 刘祥明 等. 掺杂对铌酸锂晶体非挥发全息存储性能的影响[J]. *物理学报*, 2008, **57**(5): 2946~2951
- 3 Wang Zhongmin. Study on development of lithium niobate crystal [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2002, **31**(2): 173~175
- 王忠敏. 铌酸锂晶体的发展简况[J]. *人工晶体学报*, 2002, **31**(2): 173~175
- 4 Peng Yuefeng, Xie Gang, Wang Weimin *et al.*. High efficiency periodically poled lithium niobate with MgO optical parametric oscillator 2.7 μm laser with 11.8 W output power[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2262~2265
- 彭跃峰, 谢 刚, 王卫民 等. 11.8 W 高效率掺氧化镁的周期极化铌酸锂晶体光参量振荡 2.7 μm 激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2262~2265
- 5 J. Lappalainen, J. Hiltunen, V. Lantto. Characterization of optical properties of nanocrystalline doped PZT thin films[J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2005, **25**(12): 2273~2276
- 6 Dong Zuoren, Ye Qing, Qu Ronghui *et al.*. Optical phased-array beam deflector based on lead lanthanum zirconate titanate electro-optic ceramic[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 373~377
- 董作人, 叶 青, 瞿荣辉 等. 基于掺镧钛酸铅电光材料的光学相控阵光束扫描器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 373~377
- 7 Xu Dangpeng, Li Mingzhong, Wang Jianjun *et al.*. All fiber single-mode Q-switched ytterbium-doped fiber laser based on PLZT switch[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1177~1180
- 许党朋, 李明中, 王建军 等. 基于 PLZT 开关的全光纤单模调 Q 掺 Yb³⁺ 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1177~1180
- 8 Qu Ronghui, Ye Qing, Dong Zuoren *et al.*. Progress of optical phased array technology based on electro-optic material [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1861~1867
- 瞿荣辉, 叶 青, 董作人 等. 基于电光材料的光学相控阵技术研究进展[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1861~1867
- 9 H. Jiang, Y. K. Zou, Q. Chen *et al.*. Transparent electro-optic ceramics and devices[C]. *SPIE*, 2005, **5644**: 380~394
- 10 Jiang Desheng, Liu Zhongming, Tong Xinglin *et al.*. Characteristic and fabrication technology of transparent electro-optic PMN-PT ceramic material [J]. *Materials Review*, 2007, **88**(z1): 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, **88**(z1): 289~292
- 11 Cao Linhong, Yao Xi, Xu Zhuo *et al.*. Dielectric and piezoelectric properties of PMN-PT ceramics near the morphotropic phase boundary[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2007, **28**(3): 1~5
- 曹林洪, 姚 熹, 徐 卓 等. 准同型相界附近 PMN-PT 陶瓷的介电与压电性能[J]. *材料热处理学报*, 2007, **28**(3): 1~5
- 12 Liu Tao, Yu Song, Shen Jing *et al.*. Bandwidth and gain of PPLN based optical parametric amplification with different noncollinear geometries[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 302~306
- 刘 涛, 喻 松, 申 静 等. PPLN 晶体中不同非共线结构光参量放大过程的带宽与增益特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 302~306
- 13 Zhu Qibiao, Li Chunfang, Chen Xi. Goos-Hänchen shift of the transmitted light beam in a two-prism configuration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 673~677
- 朱绮彪, 李春芳, 陈 玺. 双棱镜结构中透射光束的古斯汉欣位移[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 673~677
- 14 Duan Tao, Li Chunfang, Yang Xiaoyan *et al.*. Thin-film enhanced Goos-Hänchen shift in frustrated total reflection configuration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1744~1748
- 段 弢, 李春芳, 杨晓燕 等. 电介质膜对受抑全内反射结构中古斯-汉欣位移的增强[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1744~1748
- 15 Zhou Huijuan, Meng Zhou, Liao Yi. Frequency shift characteristics analysis of LiNbO₃ waveguide electro-optic intensity modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 901~905
- 周会娟, 孟 洲, 廖 毅. 铌酸锂波导电光强度调制器的移频特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 901~905
- 16 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
- 17 Ju Hao, Li Honggen, Cheng Yin *et al.*. 1.5 mm light beam shift arising from 1.4 pm variation of wavelength[J]. *J. Opt. Soc. Am., B.*, 2010, **27**(6): 1305~1308
- 18 Liu Xuanbin, Cao Zhuangqi, Zhu Pengfei *et al.*. Large positive and negative lateral optical beam shift in prism-waveguide coupling system[J]. *Phys. Rev. E*, 2006, **73**(1): 016615
- 19 Liu Xuanbin, Cao Zhuangqi, Zhu Pengfei *et al.*. Simultaneously large and opposite lateral beam shifts for TE and TM modes on a double metal-cladding slab[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(8): 2077~2079
- 20 Cao Zhuangqi. *Guided Wave Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2007. 155~157
- 曹庄琪. *导波光学*[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 155~157
- 21 Wang Pingchu, Luo Haosu, Li Donglin *et al.*. Characters of piezoelectricity and phase transition of PMN-PT single crystals and ceramics[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2001, **16**(1): 56~62
- 王评初, 罗豪甦, 李东林 等. PMN-PT 单晶与陶瓷在性能及相变方面的特点[J]. *无机材料学报*, 2001, **16**(1): 56~62
- 22 Wen Jing, Zuo Chunying. Fresnel formula of plane wave in anisotropic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 2000~2005
- 温 静, 左春英. 平面波在各向异性晶体中的菲涅耳公式[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 2000~2005
- 23 A. Yariv, P. Yeh. *Optical Waves in Crystals*[M]. USA: Wiley Press, 1984
- 24 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
- 25 W. P. Chen, J. M. Chen. Use of surface plasma waves for determination of the thickness and optical constants of thin metallic films[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(2): 189~191