

法布里-珀罗谐振技术测量 PMNT 的电光系数及在衍射光栅中的应用

张学娇^{1,2} 叶青¹ 蔡海文¹ 瞿荣辉¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 阐述了一种用法布里-珀罗(FP)谐振技术来测量新型铌镁酸铅-钛酸铅(PMNT)透明电光陶瓷不同偏振光场矢量下二次电光系数的方法。PMNT 透明电光陶瓷具有较大的折射率, 非常容易形成 FP 谐振腔。根据陶瓷二次电光效应, PMNT 在 FP 谐振腔内的谐振波长随着外加电压的升高而移动。改变入射光光场矢量的偏振状态, 可以获得横电(TE)模式和横磁(TM)模式的二次电光系数 γ_{33} 和 γ_{13} 分别约为 $21.06 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 和 $-1.76 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$, 这明显不同于常规的线性电光晶体。利用这个特征, 在实验上设计了一个 PMNT 电控衍射光栅, 对不同 TE 模和 TM 模衍射图样进行了分析, 证实了研究结果的正确性。

关键词 物理光学; PMNT 透明电光陶瓷; 二次电光系数; 法布里-珀罗谐振腔

中图分类号 TN24 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0708004

Fabry-Perot Resonant Technique for Measuring the Electro-Optic Coefficients of PMNT Ceramic and Its Application in Diffraction Grating

Zhang Xuejiao^{1,2} Ye Qing¹ Cai Haiwen¹ Qu Ronghui¹

(¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A Fabry-Perot (FP) resonant technique is proposed to measure the quadratic electro-optic coefficients γ_{33} and γ_{13} of transparent lead magnesium niobate titanate (PMNT) ceramic for transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) modes. The resonant wavelength in the PMNT FP resonant cavity will shift with the increase of applied voltage due to the quadratic electro-optic effect. The quadratic electro-optic coefficients γ_{33} and γ_{13} for TE and TM modes are measured, and their values are about $21.06 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ and $-1.76 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$, respectively. Using the characteristic, a polarization-dependent PMNT electro-optic diffraction grating is designed and the diffraction patterns for different polarization light are also analyzed and compared in detail.

Key words physical optics; PMNT electro-optic ceramic; quadratic electric-optical coefficient; Fabry-Perot resonant cavity

OCIS codes 260.1180; 160.2100; 260.5740

1 引言

近年来, 基于铌酸锂晶体和液晶技术的电光器件已经广泛地应用在工业技术之中并取得了巨大的成功。但铌酸锂晶体具有低一次电光系数、低激光

损伤阈值和复杂的晶轴选择等缺点; 液晶技术的响应时间较慢, 热稳定性较差, 这些特点使它们不适合在高功率激光系统中获得应用。磷酸二氢钾(KDP)晶体^[1]是一种理想的高功率激光系统的调

收稿日期: 2013-02-23; 收到修改稿日期: 2013-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(61137004)和上海市自然科学基金(11JC1413500)

作者简介: 张学娇(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: zxjhope@126.com

导师简介: 蔡海文(1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光纤传感、光电子器件等方面的研究。

E-mail: hwcai@siom.ac.cn(通信联系人)

制器件,但是容易潮解的特性使系统对周围的环境条件要求较高。透明电光陶瓷掺镧钛酸铅^[2](PLZT)是另外一种选择,其电光系数在室温下为铌酸锂的10倍左右,并且具有高透射率(镀增透膜后每毫米的透射率大于95%)、宽的光谱响应特性(约400~10000 nm)、快速响应时间(约100 ns)、高激光损伤阈值(大于吉瓦每平方厘米量级)和大尺寸(成熟的热压工艺)等特点。但高的驱动电压(几百伏到上千伏)和电滞回线特性仍然是难以克服的问题。为了改善电光器件的性能,尤其在应用于大功率激光系统中时,近年来快速发展的铌镁酸铅-钛酸铅(PMNT)电光陶瓷是一个极好的选择^[3]。透明PMNT电光陶瓷是在PLZT的基础上发展起来的一种新材料,它除了具有PLZT电光陶瓷本身固有的优点外,二次电光系数较PLZT电光陶瓷有一个数量级的提高(达到 $10^{-15} \text{ m}^2/\text{V}^2$),并在常温的条件下基本克服了电滞回线的问题,因此在超快光电子器件领域^[4~7],尤其在高功率激光系统中有着广泛的应用前景。

当前,很多方法已经被应用于电光材料的电光系数的测量,包括椭球测量法^[8,9]、干涉仪测量法^[10,11]、法布里-珀罗(FP)测量法^[12]、全反射测量法^[13]、古斯-亨兴位移法等^[14]。文献[7,15]报道,PMNT的有效电光系数的测量值在 $20 \times 10^{-16} \sim 60 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 范围内。然而,PMNT电光陶瓷在通常状态下是一种各向同性的多晶陶瓷材料,没有晶轴选择。当外界施加一个电场时,陶瓷样品将会呈现明显二次双折射的单晶特性,这一点和常规的电光晶体存在着很大的差别。不同的光场矢量传输条件下[如横电(TE)模和横磁(TM)模],其体现出来的二次电光系数有着很大的差异。为了充分分析新型PMNT电光陶瓷的二次电光性能,本文提出了一种基于法布里-珀罗(FP)谐振技术的新型PMNT透明电光陶瓷在不同光场传输矢量条件下二次电光系数的测量方法。通过对不同电压下谐振腔谐振波长的移动的测量,得到两个偏振模式条件下二次电光系数 γ_{33} 和 γ_{13} 的测量值分别为 $21.06 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 和 $-1.76 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$,可以看出符号是相反的。此方法相对于全反射法等方法而言理论简单,所需实验装备容易实现,对于材料的制备要求也较低。因材料折射率高,极易形成FP谐振腔,相对于古斯-亨兴位移法^[14]精度更高。为了验证偏振相关特征,在实验上搭建了一个PMNT电控衍射光栅实验装置,分别对入射光场为TE模

和TM模时光栅的衍射图样进行了分析,证实了研究结果的正确性。

2 二次电光系数测量的理论分析

二次电光材料的折射率椭球通常可以表示为^[16]

$$\begin{cases} n_x = n_o - \frac{1}{2}n_o^3\gamma_{33}E^2 \\ n_y = n_o - \frac{1}{2}n_o^3\gamma_{33}E^2, \\ n_z = n_o - \frac{1}{2}n_o^3\gamma_{13}E^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 E 为外加电场,沿 z 轴方向。 γ_{33} 和 γ_{13} 是TM模和TE模对应测量的电光系数,横电模和横磁模分别平行和垂直于电场方向。 n_o 是PMNT在无外加电压下的折射率(即 o 光传输对应的材料折射率)。此时,PMNT光电陶瓷中传输两个模式的特征折射率可表示为

$$n_o = n_x = n_y, \quad (2)$$

$$n_e = n_z, \quad (3)$$

因此其有效折射率为

$$\Delta n = -\frac{1}{2}n_o^3\gamma_{i3}E^2, \quad (4)$$

式中 $i=3$ 和 $i=1$ 分别对应TE模和TM模的入射光。PMNT电光陶瓷的有效折射率为 $n_o \approx 2.45$ 。当陶瓷薄片切割成一个立方体时很容易形成一个FP谐振腔,谐振波长为

$$\lambda_q = \frac{2n_o l}{q}, \quad (5)$$

式中 l 为谐振腔的长度。在陶瓷样品上沿 z 轴方向施加电场,就会形成如图1所示的动态电光FP腔。运用FP谐振技术,可以计算得到PMNT陶瓷样品的电光系数

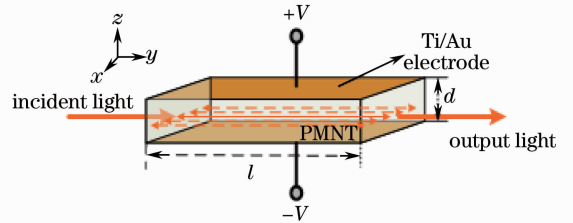


图1 PMNT陶瓷片的动态电光FP腔技术示意图(样品上下表面镀金极)

Fig. 1 Dynamic electro-optic FP cavity technology based on the PMNT ceramic wafer (Ti/Au electrodes are sputtered onto top and bottom surfaces of PMNT sample)

$$\gamma_{i3} = \frac{d^2}{|V|^2 n_0^3 l} \cdot \left(\frac{\lambda'_{q+1} \lambda'_q}{\Delta \lambda'} - \frac{\lambda_{q+1} \lambda_q}{\Delta \lambda} \right), \quad (6)$$

式中 d 为 PMNT 陶瓷片的厚度, V 为施加电压。通过对不同光场模式下的测量, 可以计算得出 PMNT 电光陶瓷的二次电光系数 γ_{i3} ($i=1, 3$)。

基于上述理论分析, 实验搭建了一个测量不同偏振入射光场矢量的二次电光系数的测试装置, 如图 2 所示。一个放大自发辐射(ASE)宽带光源所发出的光通过偏振分束器(PBS)形成偏振光, 然后由一个偏振控制器(PC)来调节光的偏振方向。得到的光经由一对准直器, 使得通过 PMNT 陶瓷样品的光准直入射并且准直接接收。在测量之前, 先在两准直器之间放入一个检偏器来保证入射到 PMNT 陶

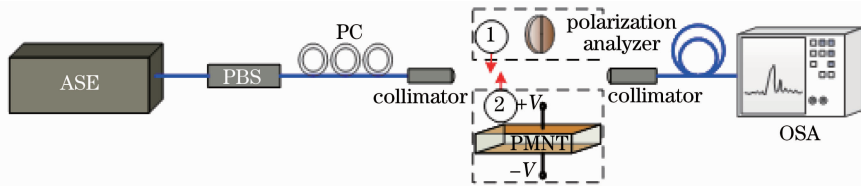


图 2 实验框图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

3 实验分析

图 3 所示为入射光为 TE 模式时, 不同电压下 PMNT 陶瓷谐振腔内谐振波长的改变。当不施加电压时, 取两个谐振波峰处对应的波长分别为 $\lambda_q = 1550.692$ nm 和 $\lambda_{q+1} = 1550.156$ nm。当施加直流电压到 271 V 时, 相应的谐振波向短波方向移动, 两处波峰值分别变为 $\lambda'_q = 1550.656$ nm 和 $\lambda'_{q+1} = 1550.122$ nm。外加电压为 388 V 时, 两处波峰值分别为 $\lambda''_q = 1550.628$ nm 和 $\lambda''_{q+1} = 1550.096$ nm。继续调整电压至 480 V, 相应的谐振波继续向短波方向移

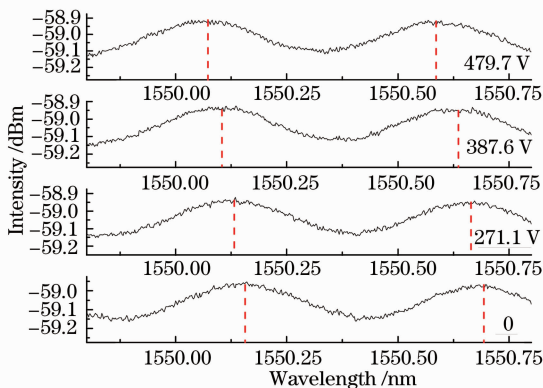


图 3 TE 模式下, 不同电压下谐振波长的变化

Fig. 3 Change of resonant wavelength with different applied voltages for TE mode

瓷样品上的光的偏振方向。首先, 调整入射光为 TE 模式, 即入射光偏振方向平行于电场施加方向。其次, 将 PMNT 陶瓷样品置入实验光路中, 再用光谱仪(OSA, ANDO 6317C)记录不同电压下的出射谐振光谱。光谱仪的分辨率为 0.1 nm。接着, 调节偏振控制器改变入射光为 TM 模式, 即入射光的偏振方向垂直于 PMNT 的外加电场方向。放入 PMNT 陶瓷样品, 再次记录其不同电压下的谐振光谱。实验中, PMNT 透明陶瓷样品的尺寸为 $3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ (即 $d=3 \text{ mm}$, $l=1 \text{ mm}$), 如图 1 所示。采用溅射沉积法在陶瓷上下表面镀 Ti/Au 金属电极。

动, 波峰分别变为 $\lambda'''_q = 1550.592$ nm 和 $\lambda'''_{q+1} = 1550.062$ nm。实验发现随着二次电光效应的增加, FP 腔的有效长度会减小, 这一点与常见的线性电光效应(如铌酸锂的电光效应)是不同的。由(4)式可以计算得出, PMNT 陶瓷样品的二次电光系数 $\gamma_{33} \approx 21.06 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 。同理, 调整入射光的偏振方向, 使其变为 TM 模, 不同电压下的响应谐振波长如图 4 所示, 计算得 $\gamma_{13} \approx -1.76 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 。 γ_{13} 值较小, 采用多次测量, 取其统计平均值。对比由 TE 模式和 TM 模式测得的二次电

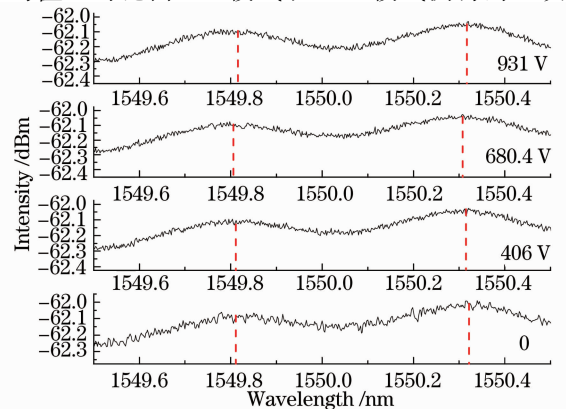


图 4 TM 模式下, 不同电压下谐振波长的变化

Fig. 4 Change of resonant wavelength with different applied voltages for TM mode

光系数,前者很大,并且两者符号相反。这是立方晶系陶瓷的独特特征(此类材料还有 PLZT 电光陶瓷^[16]等)。PMNT 整个电光系数的测量对于材料在电光器件中的应用有着至关重要的作用,电光效应的大小在很大程度上取决于电场方向及入射光偏振方向的选择^[15]。

4 PMNT 电控偏振相关性在电光衍射光栅中的应用

为了验证上述理论分析和实验测试的结果,设计了一种电控衍射光栅对不同偏振条件下入射光场矢量的衍射特性进行分析,如图 5(a)和(b)所示。图 5(b)为通过预先制作掩模板在电光陶瓷上表面

溅射一层 Ti/Au 金属叉指电极的 CCD 显微实物图。透明 PMNT 陶瓷片的尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$,光栅周期为 $d=200\text{ }\mu\text{m}$ (其中狭缝宽度为 $a=100\text{ }\mu\text{m}$),实验所用的光源为波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器,入射光经由格兰棱镜形成偏振光,并且其偏振方向可以由格兰棱镜调节,首先选择 TE 模式的偏振光倾斜入射到 PMNT 衍射光栅。采用一个直流(DC)稳压电源来改变所加的正负极电压。其远场衍射图样由一个光屏接收。用一个 CCD 连入计算机来观测并储存远场衍射图样。同理可测得 TM 模式偏振光斜入射到 PMNT 电控衍射光栅的远场衍射图样。

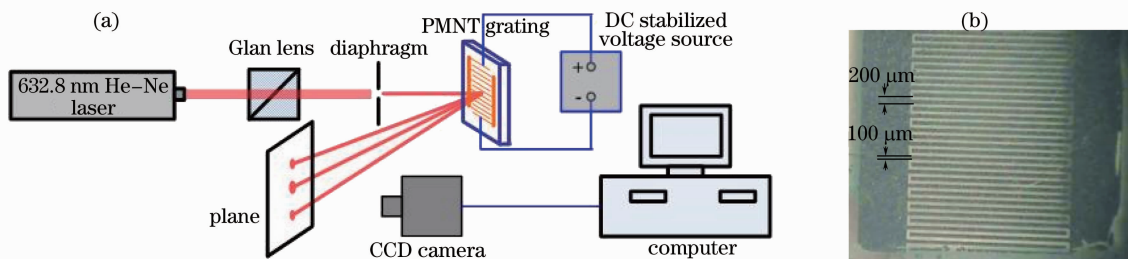


图 5 电控衍射光栅对不同入射光场矢量的测试分析。(a)示意图;(b)光栅显微实物图

Fig. 5 Effect of polarization beam for electrically tunable diffraction grating. (a) Schematic diagram; (b) micrograph of grating

图 6 为入射光分别为 TE 模式和 TM 模式时,PMNT 电控衍射光栅随外加电压变化的实验衍射图样。对于 TE 模式,外加电压为 0 时, $2n$ ($n=1,2,3,\dots$)阶衍射光在衍射图样中是消失的。这是因为光栅的周期设计尺寸为狭缝设计尺寸的 2 倍(即 $d=2a$)。当直流稳压可调电源约为 40 V 时,0 阶衍射光消失,光栅将入射光能量渐渐转移到其他衍射级上。将外加电压升高到 80 V 时,0 阶衍射光重新出现,并且

± 1 阶衍射光完全消失,如图 6(a)所示。如果继续升高外加电压,衍射光能量将继续向高阶衍射光转移。然而,当将入射光调节为 TM 模式时,PMNT 衍射光栅的衍射作用将会大大减弱,如图 6(b)所示。当外加电压加到 80 V 时,0 阶衍射光仍未消失。而此时 TE 模入射光能量的 ± 1 阶衍射已经受到了抑制。这是因为 PMNT 透明电光陶瓷对于不同偏振的光的二次电光系数有着很大的差异。

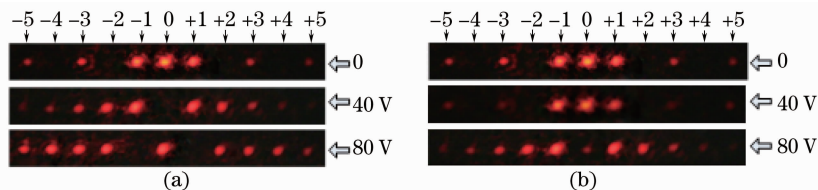


图 6 随电压升高不同偏振光的远场衍射图样。(a)TE 模式;(b)TM 模式

Fig. 6 Experimental measurement of diffraction pattern for different polarization beams with the applied voltage increasing. (a) TE mode; (b) TM mode

衍射光栅的电控特性在超快激光领域是十分有用的,如宽带可调谐外腔二极管激光器中的光束偏转装置。另一个重要的应用是内腔或外腔 Q 开关光强度调制器^[17]。例如选择 0 阶或 ± 1 阶衍射光形成激光振荡,其他级次的衍射光会损耗掉,然后通过

在电控衍射光栅上加一个电脉冲信号来调制输出脉冲激光。应当注意到由于电光陶瓷特性,PMNT 调 Q 开关光强调制器的激光损伤阈值非常高(大于吉瓦每平方厘米量级)、组件尺寸大等优势使得其在大功率激光系统的应用中有着极其诱人的前景。因材

料在厚度较大时每毫米的透过损耗较大,在材料的制备上仍需要深入的研究。

5 结 论

采用 FP 技术,利用不同的偏振光来测量 PMNT 的二次电光系数各个张量。对于不同的偏振光(TE 模和 TM 模),测量的电光系数有着很大的不同,并且两者符号相反,这跟其他材料(例如铌酸锂晶体)常见的线性电光效应是不同的。以电控衍射光栅为例,阐述并对比了此类材料制成的光电器件的偏振相关特性,其在高功率激光领域有着极好的应用前景。

参 考 文 献

- Zhou Yujie, Feng Liqun, Sun Junqiang. Etching characteristics of MgO doped lithium niobate in inductively coupled plasma[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0906001.
周钰杰, 冯力群, 孙军强. 掺镁铌酸锂晶体的 ICP 刻蚀性能[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0906001.
- D Goldring, Z Zalevsky, E Goldenberg, *et al.*. Optical characteristics of the compound PLZT[J]. Appl Opt, 2003, 42(32): 6536-6543.
- L Qiao, Q Ye, J L Gan, *et al.*. Optical characteristics of transparent PMNT ceramic and its application at high speed electro-optic switch[J]. Opt Commun, 2011, 284(16-17): 3886-3890.
- Q Ye, L Qiao, J L Gan, *et al.*. Fiber Sagnac π -shifted interferometer for polarization independent PMNT high speed electro-optic switch[J]. Opt Lett, 2010, 35(24): 4187-4189.
- K K Li, Y Lu, Q Wang, *et al.*. Electro-Optic Ceramics and Devices, PMNT[P]. US Patent, 6890874. [2005-5-10].
- J Y Cheng, Q S Chen. An ultrafast phase modulator for 3D imaging[C]. SPIE, 2006, 6068: 60680L.
- H Jiang, Y Zou, H Ming, *et al.*. Transparent electro-optic ceramics and devices[C]. SPIE, 2004, 5644: 380-394.
- F Wang, E Furman, G H Haertling. Electro-optic measurements of thin-film materials by means of reflection differential ellipsometry[J]. J Appl Phys, 1995, 78(1): 9-15.
- Chen Qizhen, Tian Hao, Zhou Zhongxiang, *et al.*. Electro-optic property and voltage-controlled diffraction property of Fe-doped potassium sodium tantalate niobate crystal[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0706002.
陈启珍, 田浩, 周忠祥, 等. 掺 Fe 的钽铌酸钾钠晶体的电光及电控衍射性能[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0706002.
- F Qiu, K Misawa, X Cheng, *et al.*. Determination of complex tensor components of electro-optic constants of dye-doped polymer film with a Mach-Zehnder interferometer[J]. Appl Phys Lett, 1994, 65(13): 1605-1607.
- Hong Jianxun, Chen Jianping, Li Xinwan, *et al.*. Performance improvement on the measurement of electro-optic coefficients of poled polymers using the optical fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(9): 1271-1274.
洪建勋, 陈建平, 李新碗, 等. 基于马赫-曾德尔干涉仪的聚合物电光系数测量方法的性能改善[J]. 中国激光, 2005, 32(9): 1271-1274.
- P Pretre, L M Wu, R A Hill, *et al.*. Characterization of electro-optic polymer films by use of decal-deposited reflection Fabry-Perot microcavities [J]. J Opt Soc Am B, 1998, 15(1): 379-392.
- Y Jiang, Z Q Cao, Q S Shen, *et al.*. Improved attenuated-total-reflection technique for measuring the electro-optic coefficients of nonlinear optical polymers[J]. J Opt Soc Am B, 2000, 17(5): 805-808.
- Ran Maowu, Cao Zhuangqi, Chen Xianfeng, *et al.*. Study on electro-optic effect of PMN-PT ceramics using Goos-Hanchen shift[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0906001.
冉茂武, 曹庄琪, 陈险峰, 等. 用古斯亨兴位移研究 PMN-PT 电光陶瓷的电光效应[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0906001.
- L S Kamzina, R Wei, G Li, *et al.*. Electro-optical properties of PMN-xPT compounds: single crystals and transparent ferroelectric ceramic[J]. Magnetism and Ferroelectricity, 2010, 52(10): 2142-2146.
- J A Thomas. Optical Phased Array Beam Deflection Using Lead Lanthanum Zirconate Titanate[M]. San Diego: University of California, 1998. 63-64.
- H Sato, K Toda. Reflection-type electrically controllable diffraction grating and its application to intracavity laser modulation[J]. Appl. Opt., 1977, 16(5): 1280-1288.

栏目编辑:何卓铭