

文章编号: 0253-2239(2010)12-3430-05

高速电光晶体开关阵列数字光束扫描器

职亚楠¹ 闫爱民¹ 舒 嵘² 孙建锋¹ 周 煜¹ 刘立人¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院空间激光通信及检验技术重点实验室, 上海 201800)
²中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要 研制了高速电光晶体开关阵列数字光束扫描器。光束扫描器由电光分束单元和偏转棱镜阵列构成。电光分束单元是通过铌酸锂电光开关与偏振分光棱镜的组合实现。电光分束单元按照多级级联和空间组合构成 3×3 矩形光束扫描阵列。光束扫描阵列后加棱镜阵列使光束产生需要的角度偏转, 可以实现远场大范围光束阵列扫描。同时可以实现激光光束扫描和跟踪的实时可编程控制。系统的实验研究表明光束扫描器的设计参数与实验测量结果吻合。

关键词 光通信; 电光晶体开关阵列; 数字光束扫描器; 电光分束单元; 偏转棱镜阵列; 扫描阵列

中图分类号 O734 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103012.3430

High-Speed Digital Beam Scanner Based on Electro-Optic Crystal Switch Array

Zhi Yanan¹ Yan Aimin¹ Shu Rong² Sun Jianfeng¹ Zhou Yu¹ Liu Liren¹

(¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
²Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract A high-speed digital beam scanner based on electro-optic crystal switch array is developed. The scanner is composed of electro-optic beam splitter unit and deflection prism array. The electro-optic beam splitter unit is combined by LiNbO₃ electro-optic switch and polarized beam splitter. The 3×3 rectangle beam scanning array is achieved by multistage cascade and space composition of electro-optic beam splitter units. The prism array behind beam scanning array can provide required angle deflection. The large-range far-field beam array scanning can be achieved. The beam scanning and tracking can be real-time controlled by programming. The systematical experiments confirm that the designed parameter of beam scanner agrees with the measured results.

Key words optical communication; electro-optic switch array; digital beam scanner; electro-optic beam splitter unit; deflection prism array; scanning array

1 引 言

激光光束扫描器在激光雷达、激光通信和激光显示等方面有着重要的应用, 其中在激光雷达和空间激光通信中, 需将激光束对特定探测空间进行有效的扫描, 以获取目标或终端的距离和方位信息, 实现对目标或终端进行捕获和跟踪。为了在远距离的

较大视场中快速的发现较小的目标, 需要扫描速度快和扫描精度高的光扫描器, 而为了能应用于星载和机载激光雷达和通信, 又要求易于集成的激光扫描器。现有的激光光束扫描器大致可分为机械式和非机械式两大类。通常的二维光束扫描器大多采用机械扫描原理, 可以实现宽范围内二维光束扫描, 缺

收稿日期: 2010-08-01; 收到修改稿日期: 2010-08-25

基金项目: 中国科学院支撑项目(61501010403), 国家自然科学基金委员会青年基金(60908029, 60907006)和上海市自然科学基金(09ZR1435300)资助课题。

作者简介: 职亚楠(1980—), 男, 助理研究员, 主要从事空间激光通信和扫描器等方面的研究。

E-mail: jackiezh@siom.ac.cn

点是受机械传动精度影响,扫描精度有限,扫描速度慢,而且扫描系统往往比较大,集成微小化程度低^[1]。非机械式的扫描器大致有液晶光栅数字光束扫描器^[2]、电光棱镜扫描器^[3,4]、光学相控阵光束扫描器^[5,6]和基于铁电畴工程的电光扫描器^[7,8]。液晶光栅数字光束扫描器受衍射效率的影响,偏转范围有限,并且抗光损伤性能差,在激光雷达和通信领域中的使用受到限制;要实现较大范围的高精度扫描,电光棱镜扫描器需级联很多的电光晶体棱镜,二维高速高精度扫描制作难度大,不易实现;采用衍射光学元件实现的相控阵光束扫描器通过控制各相控单元的相位实现光束偏转,是一种非机械的高精度扫描器,但是如要实现较大范围的高精度扫描,需要大量的移相器,而相控单元尺寸小,生产工艺难度大,成本高,扫描范围受限,更重要的是难以消除衍射所带来的光学问题,限制了这种设计在二维扫描中的应用。基于铁电畴工程的电光扫描器具有扫描速度快、精度高、无机械运动和集成度高的优点,可以实现二维扫描,很适合高精度的空间通信和跟踪使用,但现有的器件大多为单光束偏转设计,通光口径小,难以制作出大口径的扫描器。

本文研制了一种高速电光晶体开关阵列数字光束扫描器,可以实现 3×3 矩形光束阵列扫描,其后加棱镜阵列使光束产生要求的角度偏转,实现远场大范围光束阵列扫描,同时可以实现激光光束扫描和跟踪的实时可编程控制。同以往光束扫描器相比,具有响应速度快、扫描速度快、无惯性运动部件、空间扫描方式灵活以及扫描范围大的特点,并且可以实现集成设计,未来可以适用于激光雷达和空间激光通信领域。

2 设计原理

高速电光晶体开关阵列数字光束扫描器是由多级电光分束单元组成阵列数字光束扫描器。双折射电光晶体平板的光轴方向平行于光的传播方向,电光晶体的 x_1 或 x_2 轴应平行于晶体光轴与晶体法线所组成的平面,金属电极加在双折射电光晶体侧面以构成横向电光调制,电光晶体开关与偏振分光棱镜的组合构成一个电光分束单元,多个电光分束单元按照多级级联和空间组合构成近场光束扫描阵列。该多级级联近场光束扫描阵列的构成规律是:第一级近场扫描子系统由一个近场扫描单元构成,形成两个扫描位置,入射的线偏振光随电光晶体上加与不加半波电压而分别占据两个地址之一,分别代表“0”和“1”状态;第二级近场扫描子系统由2个近场扫描单元构成,形成4个扫描位置,第三级近场扫描子系统由4个近场扫描单元构成,形成8个扫描位置,依次类推,第 m 级近场扫描子系统由 2^{m-1} 个近场扫描单元构成,形成 2^m 个扫描位置。在该 m 级近场光扫描子系统的 2^m 处扫描位置后对应地设置 2^m 个棱镜单元构成的棱镜阵列, m 为构成近场光扫描阵列的级数。要使可控扫描位置分布在二维方向上,只要将两个彼此垂直的 m 级扫描器空间组合起来就可以实现,得到 $2^m \times 2^m$ 个扫描位置。本文设计的光束扫描器系统结构示意图如图1所示, $S1 \sim S8$ 为电光晶体开关,PBS1~PBS8为偏振分束棱镜,在设计中,通过在PBS7后增加一级电光分束单元($S8 + PBS8$),通过多级级联和空间组合就可以实现 3×3 矩形光束阵列扫描。

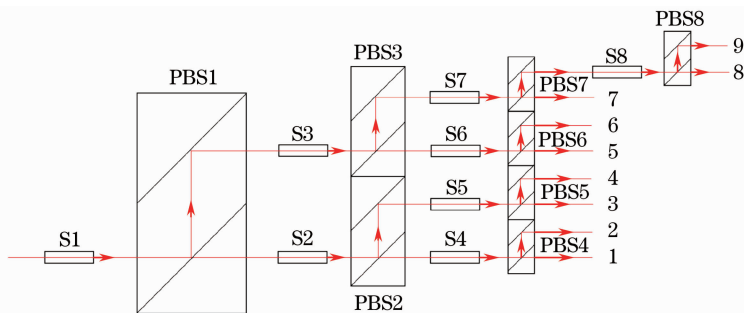


图1 光束扫描器系统结构示意图, $S1 \sim S8$ 为电光开关,PBS1~PBS8为偏振分束棱镜

Fig. 1 Structure schematic diagram of beam scanner, $S1 \sim S8$ are electro-optic crystal switches,

PBS1~PBS8 are polarized beam splitters

电光分束单元结构原理如图2所示。电光分束单元设计分为两部分,第一部分为铌酸锂电光开关,第二部分偏振分光棱镜。晶体的光轴 x_3 平行于 z 方向,电场施加在铌酸锂晶体的 x_1 轴方向,光沿 x_3

方向传播,晶体由单轴晶变为双轴晶,光率体的主轴发生转动,垂直于 x_3 的光率体的截面由圆变为椭圆,椭圆方程为

$$\left(\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{22} E_2\right) x_1^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{22} E_2\right) x_2^2 - 2\gamma_{22} E_1 x_1 x_2 = 1, \quad (1)$$

设 θ 为 \mathbf{E} 与 x_1 的夹角, ϕ 为椭圆截面主轴转动的角度, 即 x'_1 与 x_1 的夹角, 经过主轴变换后可得

$$\tan 2\phi = E_1/E_2 = \cot \theta, \quad (2)$$

式中 E_1 和 E_2 分别为电场 \mathbf{E} 在 x_1 和 x_2 方向的分量, $E_1 = E \cos \theta, E_2 = E \sin \theta$.

$$\phi = \pi/4 - \theta/2, \quad (3)$$

因此, 新光率体的主轴 x'_1 是电场取向的函数。当 $\theta = 0 (E = E_1)$ 时, $\phi = \pi/4$ 。电场施加在铌酸锂晶体的 x 轴方向, 沿 z 向产生的相位调制为

$$\Gamma = \frac{2\pi l}{\lambda} (n'_2 - n'_1) = \frac{2\pi l V}{\lambda d} n_o^3 \gamma_{22}, \quad (4)$$

式中 l/d 为晶体的长径比, 如果沿着铌酸锂晶体 x_1 方向施加横向半波电压 U_π , 产生 π 的相位调制, 就可以将入射光的偏振方向旋转 90° 。

电光开关分束单元工作过程如下: 波长为 λ 、振动方向平行于坐标 y 方向的信号光 I_{in} 沿着晶体光轴方向进入电光开关, 如果在金属电极部分施加横向半波电压, 则光信号 I_{in} 到达偏振分光棱镜振动方向不变, 因而直接通过偏振分光棱镜沿着原方向出射, 出射光记为 I_{out1} 这对应电光分束单元的“直通”状态; 如果在金属电极部分对铌酸锂晶体加横向半波电压(沿 x 方向), 由于铌酸锂晶体的横向电光效应而使得其感应主轴绕 z 轴转动了 45° , 由于 π 相位的引入光信号到达偏振分光棱镜时振动方向变为平行于坐标 x 方向, 在偏振分光棱镜分光面发生全反射, 然后再经过一次全反射沿同原方向平行的方向出射, 出射光记为 I_{out2} 这对应电光分束单元的“分光”状态。电光开关分束原理如图 2 所示。

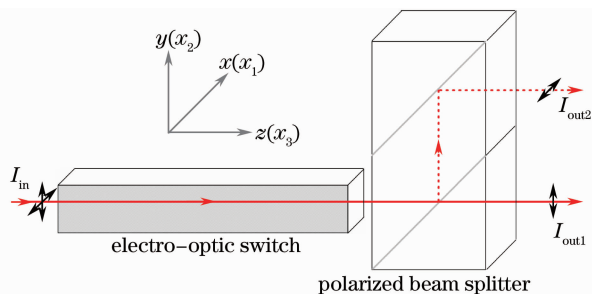


图 2 电光分束单元示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electro-optic beam splitter unit

光束扫描器设计中采用楔形棱镜实现扫描阵列出射光束的偏转, 从而在远场得到确定的二维光场分布。通过改变出射面 α 倾角的设置, 就可以实现

某个单元发射角度的改变。棱镜楔角 α 与光束偏转角度 θ 满足关系式:

$$\tan \alpha = \frac{\sin \theta}{n - \cos \theta}. \quad (5)$$

3 实验装置和实验结果

从一块生长晶体中切割出的 9 块纯净铌酸锂晶体同时进行抛光, 然后在入射端面镀 $1.55 \mu\text{m}$ 波长的增透膜。金属电极对称地加在铌酸锂晶体平行于坐标面 $y-z$ 的两个相对侧面上, 金属电极为溅射制作的 Au/Cr 薄层, 厚度为 $0.1 \mu\text{m}$ 。铌酸锂电光开关的长径比约为 $7.7:1$, 通光口径 5 mm ; 偏振分束棱镜采用 K9 玻璃制作, 通光面镀 $1.55 \mu\text{m}$ 波长的增透膜, 胶合面镀 PBS 膜。将 8 级电光开关分束单元按图 3 所示的结构进行多级级联和空间组合, $S1 \sim S8$ 为铌酸锂电光开关, $\text{PBS}1 \sim \text{PBS}8$ 为偏振分束棱镜, 系统最后一级为棱镜阵列, 实现扫描阵列出射光束的一定角度偏转, 从而在远场得到确定的光场分布。同时为了保证 9 路出射光束的偏振态保持一致, 在棱镜阵列中集成了波片阵列, 使得出射光的偏振态均保持为水平偏振。

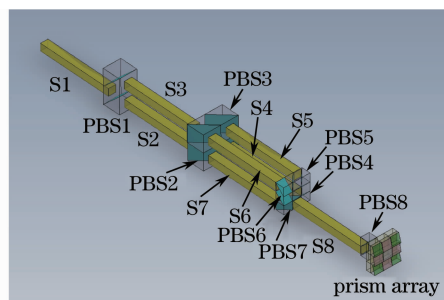


图 3 电光分束单元按照多级级联和空间组合构成 3×3 矩形光束阵列扫描

Fig. 3 3×3 rectangle beam array scanning is achieved by multi-level cascade and space composition of electro-optic beam splitter units

光束扫描器的控制系统结构框图如图 4 所示。光束扫描器采用计算机控制驱动高压电源实现对 8 通道电光开关的控制, 总体设计分为以下三个部分: 1) 手动调节高压直流数显电源, 用于给 8 个电光开关供电, 可手工调节面板上的旋钮, 实现电压的调谐, 电光开关上加的电压幅度决定于该直流电压值, 直流电压数值在面板上的数显表头上有显示; 2) 16 个独立的高压开关 ($K1 \sim K16$), 高压开关采用绝缘栅双极型晶体管实现, 每个电光晶体两端各加一个高压开关, 用于双开关切换, 共 8 组, 实现对 8 个电光晶体的控制, 高压脉冲的上升沿为 $10 \mu\text{s}$ 量级, 下

降沿为 $1 \mu\text{s}$ 量级;3)8 通道计算机控制时序发生器,接受远程控制器指令,实现“扫描方式”、“跟踪方式”的切换扫描方式下,控制器接受本地计算机控制,可以在本地计算机上编程扫描持续时间 T_1 和扫描间隔时间 T_2 宽度,可以在本地计算机上编程扫描顺序,可以在本地计算机上监控电光开关扫描运行状态,可以给远程控制器提供同步信号以及扫描状态信号(硬接口)。跟踪方式下,控制器接受远程控制器控制,根据远程控制器给的状态来实现对某一状态的跟踪和状态之间的切换(硬接口),并且可以在本地计算机上编程跟踪持续时间宽度。

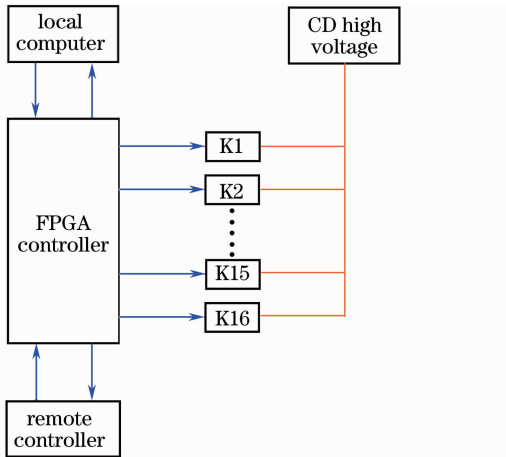


图 4 光束扫描器的控制系统结构框图, K1~K16 为 16 个独立的高压开关

Fig. 4 Structure block diagram of control system of beam scanner, K1 ~ K16 are 16 independent high-voltage switches

衡量电光开关性能的重要指标是晶体的消光比。消光比的高低主要取决于晶体折射率的均匀性。这里消光比的定义为:在平行偏光镜下,晶体未加电压时最大通光强度和加电压时的最小通光强度之比。图 5 为实验测得的铌酸锂电光开关消光曲线图。随着电压的增强,通光强度逐渐下降,最终测得消光比约为 500,半波电压约为 1950 V。实验测得偏振分束棱镜的分束比可以达到 $1000:1$ 。因此单级电光开关分束单元的消光比可以达到 500。采用红外 CCD 观察扫描过程,扫描顺序为 $1\sim 9$ 单元,扫描持续时间为 100 ms,扫描间隔时间为 50 ms,扫描将过程截图拼成图 6,可以看到 9 路出射光斑的空间位置成 3×3 矩形分布,设计扫描顺序与实验测试结果准确吻合,并且证实可以准确实现激光光束扫描与跟踪的实时可编程控制。为了测试系统扫描速度,采用光电探测器接收其中的一路信号,在示波器上观察,在本地计算机上编程设定每通道扫描持续

时间为 10 ms,扫描间隔时间 10 ms,则 9 通道扫描周期应为 180 ms 占空比为 11.1%。实验测得信号周期为 180 ms,设计扫描速度也与实验测试结果准确吻合。扫描速度实验测试结果的示波器截图如图 7 所示。通过平行光管测量可以得到光束扫描器的扫描范围是 $1.5^\circ\times 1.5^\circ$ 。

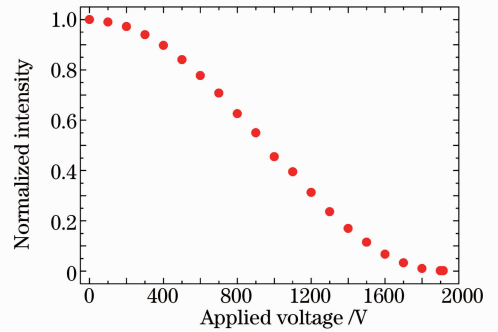


图 5 实验测得的铌酸锂电光开关消光曲线图
Fig. 5 Measured extinction curve of LiNbO_3 electro-optic switch

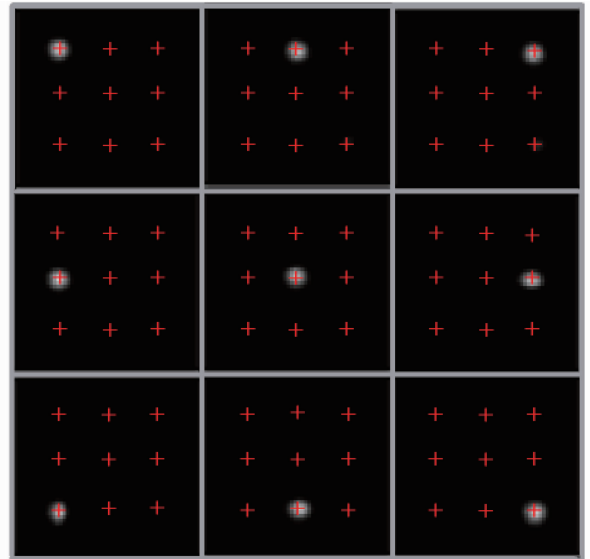


图 6 采用红外 CCD 观察扫描过程中输出光束位置变化
Fig. 6 Position changes of output beam during scanning are measured by infrared CCD

4 讨 论

设计制作了电光晶体开关阵列数字光束扫描器,由电光分束单元和偏转棱镜阵列构成,电光分束单元按照多级级联和空间组合构成 3×3 矩形光束扫描阵列,其后加棱镜阵列使光束产生相应的角度偏转,构成远场大范围光束扫描阵列,扫描范围 $1.5^\circ\times 1.5^\circ$,通光孔径 5 mm,可以实现激光光束扫描和跟踪的实时可编程控制。但是与实际应用的要求还有大的距离。本文的工作意义在于提出了一种

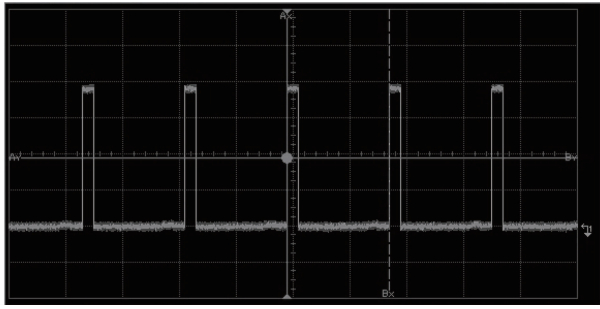


图7 测量光束扫描器扫描速率的示波器信号
Fig. 7 Oscilloscope trace during measuring the scanning rate of beam scanner

与文献报道不同的结构,理论分析和实验验证表明其具有合理性。通过多级级联和空间组合设计制作光束扫描阵列需要克服晶轴定向、反射损耗、高压阈值和消光性能等诸多难题,因此提高系统的扫描级数是非常困难的。通过提高晶体的长径比或者采用电光系数更高的晶体,有望进一步降低工作电压。值得指出的是,虽然单级电光开关分束单元可以达到500的消光比,但在系统组装之后,由于系统9个通道的消光比不均匀,造成输出光强不均匀,最大光强差可以达到10%,采取可微调设计可以进行修正。下一步将采用更理想的集成设计,提高系统的扫描级数,并且进一步提高系统的消光性能。

给晶体电光开关加上脉冲电压,由于晶体的电光系数可以跟得上每秒 10^{10} 次变化的电场,因此理论上晶体电光开关的速度可以达到 10^{10} s。但是由于体结构的晶体电光开关有比较大的电容,实验测得约为40 pF,因此高速扫描对高压开关电源要求比较高。在设计中,程序控制每个扫描单元最小扫描持续时间为10 ms,最小扫描间隔时间为10 ms,因此9单元扫描最小周期需要180 ms。可以进一步降低高压开关电源的脉宽,缩短上升沿和下降沿时间,提高扫描速度,将总扫描周期降至1 ms以下。

由于扫描器设计采用楔形棱镜实现扫描阵列出射光束的偏转,能在远场得到确定的扫描光场分布,但是由于每个通道的扫描角度即由楔形棱镜的倾角决定,一旦制作完成就无法改变。因此这种数字光束扫描器比较适合应用于大视场范围粗扫描。

5 结 论

本文设计制作了基于电光开关阵列的高速数字光束扫描器,由电光分束单元和偏转棱镜阵列构成。电光分束单元是通过铌酸锂电光开关与偏振分光棱镜的组合实现,通过多级级联和空间组合在约1900 V的工作电压下实现了 3×3 矩形近场光束扫描阵列,通光口径5 mm,其后加棱镜阵列使光束产生相应的角度偏转,构成远场大范围光束扫描阵列,扫描范围 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$,可以实现激光光束扫描和跟踪的实时可编程控制。系统的实验测试表明光束扫描器的设计参数与实验测量结果吻合,扫描和跟踪准确可控。同以往光束扫描器相比,具有响应速度快、扫描速度快、无惯性运动部件、空间扫描方式灵活以及扫描范围大的特点,并且可以实现集成设计,未来可以适用于激光雷达和空间激光通信领域。

参 考 文 献

- 1 Li Anhu, Sun Jianfeng, Liu Liren. Design principle of performance testing device for laser beam microradian pointing and tracking in intersatellite laser communications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 975~979
李安虎, 孙建锋, 刘立人. 星间激光通信光束微弧度跟踪性能测试装置的设计原理[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 975~979
- 2 Zhang Jian, Fang Yun, Wu Liying *et al.*. Liquid crystal beam steering technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 325~334
张健, 方运, 吴丽莹等. 液晶光束偏转技术[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 325~334
- 3 T. C. Lee, J. D. Zook. Light beam deflection with electrooptic prisms [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1968, **QE-4**(7): 442~454
- 4 J. C. Fang, M. J. Kwas, J. Zou *et al.*. Shape-optimized electrooptic beam scanners: Experiment [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1): 66~68
- 5 P. F. Mcmanamon, T. A. Dorschner, D. L. Corkum *et al.*. Optical phased array technology [J]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**(2): 268~298
- 6 P. F. Mcmanamon. An overview of optical phased array technology and status [J]. *Proc. IEEE*, 2005, **5947**: 594701
- 7 K. Gahagan, V. Gopalan, J. M. Robinson *et al.*. Integrated electro-optic lens/scanner in a LiTaO₃ single crystal [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(7): 1186~1190
- 8 D. A. Scrymgeour, Y. Barad, V. Gopalan *et al.*. Large-angle electro-optic laser scanner on LiTaO₃ fabricated by in situ monitoring of ferroelectric-domain micropatterning [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(34): 6236~6241