

级联畴反转结构大角度电光偏转器的设计与仿真

胡龙敢^{1,2}, 万玲玉^{1,2}, 廖洋^{1,2}

(1. 广西大学物理科学与工程技术学院, 南宁 530004; 2. 广西相对论天体物理重点实验室, 南宁 530004)

摘要: 针对大角度的高速光扫描, 利用三角形畴反转结构的电光偏转性质, 设计了一种大角度电光偏转器, 由1个抛物形和10个半抛物形畴反转结构偏转器级联组成。通过对抛物形和半抛物形偏转器的参数优化, 得到了该电光偏转器的优化结构, 设计完成的级联偏转器整体尺寸为130.0 mm × 16.0 mm × 0.5 mm (长 × 宽 × 高), 当施加电场为 ±10.09 V/μm 时, 偏转器扫描范围为 ±30.6°。利用光束传播法(BPM)对偏转器进行了性能仿真, 仿真表明在修正电压下, 偏转器很好地实现了大角度的电光偏转功能, 仿真结果与理论分析相符合。

关键词: 电光偏转器; 畴反转结构; 大角度扫描器; 光束传播法

中图分类号: TP211.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)03-0077-05

Design and Simulation of a Large-Angle Electro-Optic Laser Scanner with Cascaded Ferroelectric Domains

HU Long-gan^{1,2}, WAN Ling-yu^{1,2}, LIAO Yang^{1,2}

(1. College of Physics Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Key Laboratory for the Relativistic Astrophysics, Nanning 530004, China)

Abstract: Aiming at the optical scanning of wide field-view with high speed, a large angle electro-optic scanner was designed based on the deflecting property of the prism domains. It mainly consists of one parabola deflector and ten half-parabola deflectors with cascaded ferroelectric prism domains. By design optimization, the structure parameters of scanner were given and the overall size of scanner is 130.0 mm × 16.0 mm × 0.5 mm. When the applying electric field is ±10.09 V/μm, the deflecting range is ±30.6°. Using the beam propagation method (BPM), the capability of scanning was evaluated, and the simulation results show that the deflector has good deflecting properties. The simulation analysis is consistent with the theoretical calculation.

Key words: electro-optic deflector; domain inversion; large-angle scanner; beam propagation method

0 引言

光束偏转技术广泛应用于光通信、激光扫描、激光打印、激光技术等众多领域。相对于传统的机械扫描技术, 电光偏转具有体积小、灵敏度高、偏转速度快等优点, 其理论响应速度可达纳秒量级(100 GHz), 是一种高速响应的光束偏转技术, 但其具有偏转范围有限的缺点。目前, 基于晶体电光效应提出的电光偏转器主要有畴反转结构电光偏转器^[1-9]、电光晶体光学相控阵偏转

器^[10-15]、晶体开关阵列^[16]和特殊电极结构电光偏转器^[17-18]等。近年来, 随着铁电体制畴技术的日趋成熟, 可大范围偏转的畴反转结构电光偏转器逐渐受到重视, 在高速智能激光扫描、高速光开关、高速光信号处理和高速高分辨率成像等方面有重要应用。常规矩形畴反转结构电光偏转器的偏转角度较小, 为提高偏转范围, 文献[1]提出了梯形和喇叭形电光偏转器, 但单一结构的偏转器扫描范围仍然非常有限。文献[5]提出采用畴反转结构级联集成的方法来增大偏转角度, 其设计的两级畴反转结构电光偏转器可实现的偏转角度为 25.4°, 但其入射光束直径需小于 70 μm。理论上, 采用多个畴反转结构级联可以实现 0° ~ 180° 的电光偏转, 在现有的畴反转结构电光偏转器研究中, 大部分为单个偏转器^[2,4]及两个偏振器级联结构^[5], 偏转范围虽有所提高,

收稿日期: 2014-04-28

修回日期: 2014-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(61367004); 广西自然科学基金(2013GXNSFFA019001)

作者简介: 胡龙敢(1988—), 男, 江西上饶人, 硕士生, 研究方向为高速电光器件。

但还不能达到真正意义上的大角度偏转。本文采用1个抛物形和10个半抛物形周期性畴反转电光偏转器^[9,16],通过上下对称集成,设计了一种入射光束直径小于500 μm时可实现±30.6°大范围扫描的级联电光偏转器,并利用光束传播法(BPM)对设计的优化结构进行了性能仿真,仿真结果与理论计算结果基本一致。

1 结构设计

大角度电光偏转器的畴反转结构示意图如图1所示,采用级联对称设计,在一片铁电体晶体上分别集成1个抛物形电光偏转器和10个结构相同的半抛物形电光偏转器。其中,O是抛物形电光偏转器,A,B,C,D,E,P,Q,R,S,T是半抛物形电光偏转器,它们具有相同的几何结构。通过在电光偏转器的±Z表面镀上电极可对偏转器施加电场,使入射光束在偏转器内发生偏转,通过合理放置偏转器位置,使上一个偏转器在最大使用电场时出射光垂直入射到下一个偏转器的入口端。依此类推,从而实现大范围的高速高精度偏转。

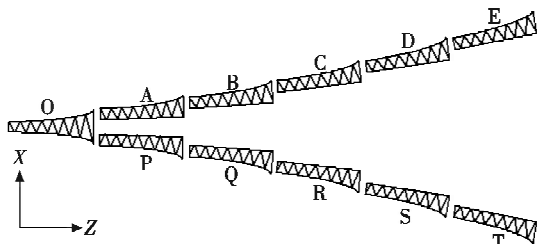


图1 畴反转级联结构大角度电光偏转器示意图

Fig. 1 A large-angle electro-optic laser scanner with cascaded ferroelectric domains

1.1 设计原理

周期性畴反转电光偏转器主要由一系列相邻畴结构极化方向相反的三角形畴级联而成,沿平行晶体的极化方向施加电场,由于晶体的电光效应,畴壁两侧的折射率发生变化,使入射光线产生偏转。对于非常偏振光e光,相邻畴反转区域的折射率差为

$$\Delta n = n_e^3 \gamma_{33} \frac{U}{d} \quad (1)$$

式中: n_e 为非常偏振光e光的折射率; γ_{33} 为晶体的电光系数; U 为在极化方向上施加的电压; d 为晶体厚度。

光束偏离电光偏转器光轴的轨迹方程 $x(z)$ 可表示为^[11]

$$\frac{d^2 x}{dz^2} = \frac{d\theta}{dz} = \frac{1}{n_e} \frac{\Delta n}{W(z)} \quad (2)$$

式中: z 为入射光线的方向; x 为光线相对于入射方向的偏离位置; $W(z)$ 为电光偏转器的宽度函数。

抛物形和半抛物形电光偏转器^[9,16]的宽度函数可表示为

$$W(z) = W_0 + kz^2 \quad (3)$$

式中: $k = (W_i - W_0)/L^2$,为曲率系数; W_0 为入口宽度; W_i 为出口宽度; L 为单个偏转器的长度。

光线在抛物形和半抛物形电光偏转器出口位置($z=L$)的偏转角度和偏转位移为^[19]

$$\theta(L) = \frac{\Delta n}{n_e} \frac{L}{\sqrt{W_0(W_i - W_0)}} \arctan\left(\sqrt{\frac{W_i - W_0}{W_0}}\right) \quad (4)$$

$$x(L) = \frac{\Delta n}{n_e} \frac{L}{\sqrt{W_0(W_i - W_0)}} \left[L \arctan\left(\sqrt{\frac{W_i - W_0}{W_0}}\right) - \frac{L}{2\sqrt{W_0}} \ln\left(\frac{W_i}{W_0}\right) \right] \quad (5)$$

根据式(4)和式(5)可知,偏转角度和偏转位移与偏转器的长度 L 、入口宽度 W_0 、出口宽度 W_i 以及施加电场等因素有关。在长度和入口宽度一定的情况下,出口宽度取决于曲率系数 k ,在给定的入口宽度、偏转器长度和施加电场下,使光束刚好偏转出偏转器边界的曲率系数 k 称为优化的曲率系数,在该曲率系数下设计得到的偏转器结构为优化结构。因此,在设计中,联立式(3)和式(5)以及考虑激光光斑大小,得到抛物形和半抛物形偏转器的优化曲率系数 k_1, k_2 ,再由式(3)分别算出它们的出口宽度 W_1, W_2 ,从而得到优化设计。

由于抛物形偏转器沿上下两个方向偏转,半抛物形偏转器只沿曲边方向偏转,在相同长度、入口宽度和施加电场时,当光束刚好由边界射出时,半抛物形单方向可偏转角度比抛物形大。因此,采用1个抛物形和10个结构相同的半抛物形偏转器构成一个上下对称的大角度电光偏转器。当11个偏转器的结构参数确定后,对偏转器逐一施加电场,可以实现大范围的角度偏转。

1.2 光路设计

假设光束从抛物形偏转器O的入口中心水平入射,当不施加电压时,晶体不发生电光效应,折射率不变,光束不发生偏转,直接通过抛物形偏转器,整个结构的偏转角为零。

偏转器O和偏转器A的几何关系如图2所示。

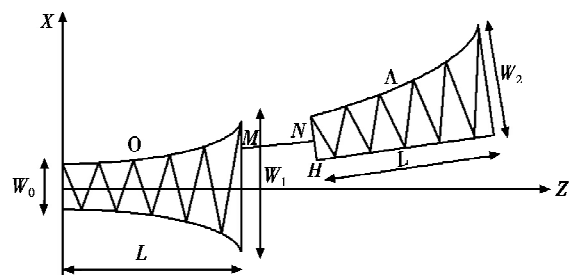


图2 光从偏转器O进入偏转器A的几何关系图

Fig. 2 Geometric diagram of the light from the deflector O to the deflector A

若对偏转器 O 施加电压为 U_{0A} , 要使光束从抛物形偏转器 O 偏转到半抛物形偏转器 A, 则需满足几何关系

$$h_1 = s \cdot \sin \theta_{0A} \quad (6)$$

$$s_1 = s \cdot \cos \theta_{0A} \quad (7)$$

$$\Delta h_1 = \frac{W_0}{2} \cdot \cos \theta_{0A} \quad (8)$$

$$\Delta s_1 = \frac{W_0}{2} \cdot \sin \theta_{0A} \quad (9)$$

$$\Delta h_1' = \Delta h_1 - h_1 \quad (10)$$

$$\Delta h_1'' = X_0 - \Delta h_1' \quad (11)$$

$$S_1' = L \cdot \cos \theta_{0A} \quad (12)$$

$$X_1 = L \cdot \sin \theta_{0A} \quad (13)$$

$$X_1' = X_A \cdot \cos \theta_{0A} \quad (14)$$

$$X_1'' = W_2 \cdot \cos \theta_{0A} \quad (15)$$

式中: 抛物形偏转器 O 和半抛物形偏转器 A 具有相同的入口宽度 W_0 和长度 L , 抛物形偏转器的出口宽度是 W_1 ; 半抛物形偏转器的出口宽度是 W_2 ; θ_{0A} 是光线通过偏转器 O 的偏转角, 点 M 和点 T 分别是光线经过偏转器 O 和偏转器 A 时的出射点; N 是偏转器 A 入口端的中点; H, P 分别是偏转器 A 左下和右下端点; s 是光线从 M 点垂直入射到 N 点的距离; s_1 是光线从偏转器 O 的出射点 M 垂直入射到偏转器 A 的入射端中点 N 的距离; s_1, h_1 分别是 M 点到 N 点的水平距离和垂直距离; $\Delta s_1, \Delta h_1$ 是 N 点到 H 点的水平距离和垂直距离; $\Delta h_1'$ 是 M 点到 H 点的垂直距离; X_0 和 X_A 分别是光线通过偏转器 O 和偏转器 A 时的偏转距离; $\Delta h_1''$ 和 X_1 分别是点 H 和点 P 到 $z=0$ 轴的垂直距离; X_1' 是 T 点到 P 点的垂直距离; X_1'' 是偏转器 A 出射端两个端点间的垂直距离。在给出 s 和偏转器相关参数的情况下, 联立式(6)~式(15), 可以计算出偏转器 A 的起始点 H 的坐标, 继而可得到偏转器 A 的整体位置, 依此类推, 其他半抛物形偏转器的位置也可相继得出。

2 结构参数设计

选取 LiTaO_3 晶体作为电光偏转器的基底材料, 在其上制成抛物形和半抛物形电光偏转器, 如图 1 所示。设使用的激光波长为 $0.6328 \mu\text{m}$, LiTaO_3 晶体在该波长下 e 光折射率 $n_e = 2.1818$, 电光系数 $\gamma_{33} = 30.5 \text{ pm/V}$, 在仿真中, 对抛物形和半抛物形电光偏转器取相同的长度、厚度和入口宽度, 经过优化设计, 得到优化曲率系数, 得出偏转器几何结构。

在最大预设电场 (10 kV/mm) 下, 设选取的 LiTaO_3 晶体长度 $L = 20 \text{ mm}$, 厚度 $d = 0.5 \text{ mm}$, 抛物形和半抛物形电光偏转器的入口宽度都为 $W_0 = 0.6 \text{ mm}$, 激光光斑半径为 $\omega = 0.25 \text{ mm}$, 联立式(3)和式(5), 得到抛

形和半抛物形电光偏转器的优化曲率系数分别为 $k_1 = 0.00182, k_2 = 0.00098$, 此时, 最大偏转光线刚好从偏转器边缘射出。

图 3 给出了以平行光入射、最大预设电场为 10 kV/mm 时, 抛物形和半抛物形偏转器在对应优化曲率系数和大于或者小于该曲率系数时, 偏转角随晶体长度变化的关系图。图中, 光线偏出偏转器边界后的数据不再画出, 表示在该曲率系数下光线在偏转器中的偏转受到限制。由图 3 可以看出, 在最大使用电场下, 光线在 $k_1 = 0.00182$ 时, 偏转角随 L 增大的斜率为最大, 当 $L = 20 \text{ mm}$ 时偏转角最大, 当曲率系数小于优化曲率系数时, 光线偏转受限, 未到达出口就已偏出偏转器; 当选用的曲率系数大于优化曲率系数时, 在相同长度上的偏转角减小, 不能达到优化设计的目的。因此, 若从理论角度来讲, 在设计偏转器时应选用最优曲率系数, 以达到获得最大偏转角的目的。在实际应用中, 考虑到偏转器的整体结构以及晶体切割误差等其他因素, 一般取稍大于最优曲率系数的值。本文中, 考虑到偏转器的整体结构, 曲率系数分别取 $k_1 = 0.002$ 和 $k_2 = 0.001$, 此时, 实际最大施加电压也将有所改变, 计算得到实际最大施加电压变为 $U_{\text{parabola}} = 5.4759 \text{ kV}, U_{\text{half-parabola}} = 5.1035 \text{ kV}$ 。

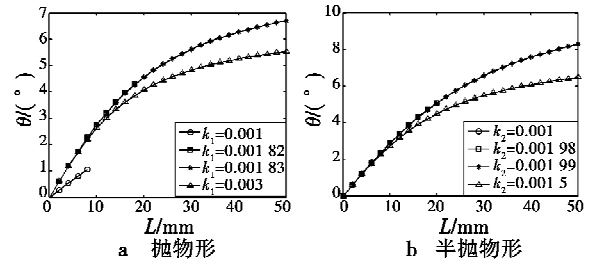


图3 最大电场为 10 kV/mm 时, 不同曲率系数下偏转角随长度的变化情况

Fig. 3 Deflection angles vs the lengths for different k when the maximum applied electric field is 10 kV/mm

优化曲率系数确定后, 即可计算出它们的具体几何形状和出口宽度。对抛物形偏转器有 $W_1 = W_0 + k_1 L^2 = 1.4 \text{ mm}$; 对半抛物形偏转器有 $W_2 = W_0 + k_2 L^2 = 1.0 \text{ mm}$ 。对抛物形偏转器 O, 取最大偏转角 $\theta_{0A} = 2.0^\circ$, 得到需施加电压为 $U_{0A} = 4.8587 \text{ kV}$; 对半抛物形偏转器, 取偏转器 A 到 B 的最大偏转角为 $\theta_{AB} = 2.3^\circ$, 对应施加电压为 $U_{AB} = 4.9455 \text{ kV}$ 。由于设计时采用上一个偏转器的最大出射光垂直入射到下一个偏转器的入口中心, 因此, 光线入射到半抛物形偏转器的初始入射角都为 0° , 只要施加电压相同, 偏转角就相同, 因此得到其他半抛物形偏转器的最大偏转角和电压也都分别为 2.3° 和 4.9455 kV 。取光线从上一个偏转器的出射点垂直入射到下一个偏转器的入口端中点

的距离 $s = 2 \text{ mm}$, 联立式(6) ~ 式(15)得到偏转器的整体尺寸为 $128.985 \text{ mm} \times 15.444 \text{ mm} \times 0.500 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高), 为了便于晶体切割, 适当地增加 LiTaO_3 晶体的长度和宽度, 最终选取的尺寸为 $130.0 \text{ mm} \times 16.0 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高)。光线从各级偏转器偏出的角度如表1所示, 表中, 光束向上偏转的角度为正, 向下偏转的角度为负, 可达到 $\pm 30.60^\circ$ 的扫描范围。

表1 各级偏转器的偏转角

Table 1 Deflection angles of the electro-optic deflector

光束路径	$\theta/(\circ)$	光束路径	$\theta/(\circ)$
O \rightarrow O	2.0	O \rightarrow O	-2.0
O \rightarrow A	4.3	O \rightarrow P	-4.3
O \rightarrow B	6.6	O \rightarrow Q	-6.6
O \rightarrow C	8.9	O \rightarrow R	-8.9
O \rightarrow D	11.2	O \rightarrow S	-11.2
O \rightarrow E	13.5	O \rightarrow T	-13.5
O \rightarrow 空气	30.6	O \rightarrow 空气	-30.6

3 仿真分析

为验证结构的可行性, 采用光束传播法(BPM)对设计完成的光电偏转器进行性能仿真。因偏转器为窄长型, 所有仿真结果图采用横纵比为2:1的比例给出。

图4是半抛物形和抛物形偏转器分别在最大施加电压4.9455 kV和4.8587 kV下的仿真图, 其中, 图4a和图4b分别为单个半抛物形和抛物形偏转器的BPM仿真图, 由图可看出, 光束很好地实现了偏转, 偏转结果与理论计算基本一致。图4c~图4f是在第一个抛物形光电偏转器的基础上, 分别级联1~4个半抛物形光电偏转器的BPM仿真图, 它的偏转角参数由表1给出。由图中可看出, 在级联1~4个半抛物形偏转器后, 随级联偏转器的增加偏转范围逐步提升, 且光线基本上能按理论设计光路进行偏转。

图5是整体结构单侧的BPM仿真图, 由图5a可见, 到第5个级联偏转器后, 光线没有按照理论设计光路从第5个偏转器完全入射到第6个偏转器中, 仿真值与理论值出现偏差。导致偏差的原因主要是计算方式的不同, 理论计算的电压值是在梯度折射率下, 采用抛物函数积分得到, 而BPM是沿着光束传播方向取一步长, 在初始光场和边界条件下计算出下一步长的光场, 依次递推, 最后得到整个结构的光场分布情况^[17]。当级联数量少, 偏转器长度不太长时, 二者之间的差别不大, 因此在前4个级联偏转器的仿真中未能体现出来, 但随着级联偏转器的增多, 偏转长度太大时, 计算方法不同引起的差异就表现出来了, 该偏差可以通过电压调节进行修正, 但修正后的电压值不能超过最大可施加电压。经计算可得, 抛物形偏转器修正后电压为5.0087 kV, 相对于修正前电压增大了0.15 kV。单个半抛物形偏转器修正

后电压为5.0455 kV, 相对于修正前电压增大了0.1 kV, 它们都没超过各自的最大可施加电压, 符合设计要求。图5b是修正以后的光路仿真图, 由图可以看出, 修正后的光束能全部按照设计光路依次偏转。计算得到抛物形光电偏转器施加电压误差为3.08%, 半抛物形光电偏转器施加电压误差为2.02%。

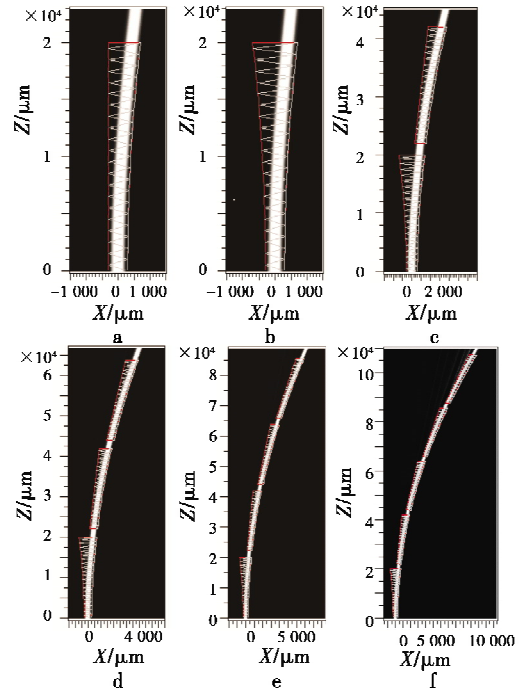


图4 一个抛物形偏转器级联4个半抛物形偏转器的BPM仿真图

Fig. 4 BPM simulation of a parabola deflector followed by four half-parabola deflectors

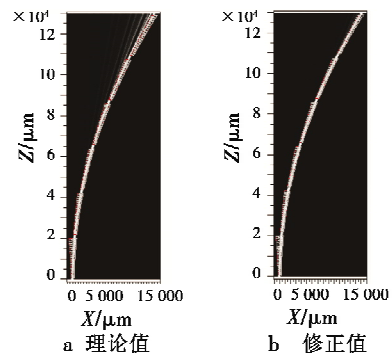


图5 一个抛物形偏转器级联5个半抛物形偏转器的BPM仿真图

Fig. 5 BPM simulation of a parabola deflector followed by five half-parabola deflectors

综上所述, 设计的大角度偏转器可以很好地实现其大范围高速偏转功能, 偏转误差可以通过控制电压的调节来进行补偿。此外, 根据式(1)和式(3), 还可通过改变晶体的厚度、长度或入口宽度来改变最大施加电压, 在具体应用时, 可根据需要合理选取晶体结构

参数,在优化设计下实现光束的大范围偏转。

4 结论

本文利用三角形畴反转结构的电光效应,设计了由1个抛物形电光偏转器和10个半抛物形电光偏转器级联构成的大角度电光扫描器,在优化设计下,该扫描器整体尺寸为130.0 mm × 16.0 mm × 0.5 mm(长 × 宽 × 高)。当分别给抛物形和半抛物形电光偏转器施加 ±5.008 7 kV 和 ±5.045 5 kV 的修正电压时,光束最大偏转角达到 ±30.60°,扫描范围达 61.2°,是目前设计的扫描角度最大的电光扫描器,可应用于各种智能化激光高速扫描以及高分辨率快速成像系统。根据 BPM 的仿真结果,该扫描器很好地实现了设计功能,偏转角度与理论分析结果相符合,由于加工误差、晶体材料系数误差等因素造成的实际偏转误差可以通过调整施加电压的方法进行补偿和修正。

参考文献

- [1] CHUI Y, ZHOU J, STANCIL D D, et al. Shape-optimized electro-optic beam scanner: Analysis, design, and simulation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(1):108-114.
- [2] FANG J C, KAWAS M J, ZOU J, et al. Shape-optimized electrooptic beam scanners: experiment [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(1):66-68.
- [3] EASON R W, BOYLAND A J, MAILIS S, et al. Electro-optically controlled beam deflection for grazing incidence geometry on a domain-engineered interface in LiNbO₃ [J]. *Optics Communications*, 2001, 197(1):201-207.
- [4] SCRYMGEOUR D A, BARAD Y, GOPALAN V, et al. Large-angle electro-optic laser scanner on LiTaO₃ fabricated by in situ monitoring of ferroelectric-domain micropatterning [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(34):6236-6241.
- [5] SCRYMGEOUR D A, SLIARAN A, GOPALAN V, et al. Cascaded electro-optic scanning of laser light over large angles using domain microengineered ferroelectrics [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(17):3140-3142.
- [6] ZUO Y, BAHAMIN B, LANGLOIS P, et al. Half-horn and parabola shaped electro-optic beam deflectors [C]//*Information Photonics Charlotte*; OSA, 2005: IWB4.
- [7] ZUO Y, MONY M, BAHAMIN B, et al. Bulk electro-optic deflector-based switches [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16):3323-3331.
- [8] KRISHNAMURTHI M, TIAN L, GOPALAN V. Design and simulation of planar electro-optic switches in ferroelectrics [J]. *Applied Physics Letters*, 2008(93):052912-1-052912-3.
- [9] 卢智勇,万玲玉,超亮芳.畴反转结构片状集成 4 × 4 电光开关的设计与仿真 [J]. *光子学报*, 2012, 41(7):794-799. (LU Z Y, WAN L Y, CHAO L F. Design and simulation of planar 4 × 4 electro-optic switches based ferroelectric inverted domains [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(7):794-799.)
- [10] SCRYMGEOUR D A, TIAN L, GOPALAN V, et al. Phased-array electro-optic steering of large aperture laser beams using ferroelectrics [J]. *Applied Physics Letters*, 2005(86):211113-1-211113-3.
- [11] THOMAS J A, LASHER M E, FAINMAN Y, et al. PLZT-based dynamic diffractive optical element for high speed, random access beam steering [C]//*Proc. of SPIE*, 1997, 3131:124-132.
- [12] 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. (QU R H, YE Q, DONG Z R, et al. Progress of optical phased array technology based on electro-optic material [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(12):1861-1867.)
- [13] 董作人,叶青,瞿荣辉,等.基于掺镧锆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. (DONG Z R, YE Q, QU R H, et al. Optical phased-array beam deflector based on lead lanthanum zirconate titanate electro-optic ceramic [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(3):373-377.)
- [14] 张华,刘鹏鹏,史晓丁,等.光学相控阵光束电扫描技术及仿真 [J]. *光学与光电技术*, 2012, 10(3):32-37. (ZHANG H, LIU P P, SHI X D, et al. Optical phased array electrical beam steering and simulation [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, 10(3):32-37.)
- [15] 闫舟,徐景.光束扫描技术研究进展 [J]. *光电技术应用*, 2013, 28(4):1-9. (YAN Z, XU J. Research development of beam scanning technology [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2013, 28(4):1-9.)
- [16] 职业楠,闫爱民,舒嵘,等.高速电光晶体开关阵列数字光束扫描器 [J]. *光学学报*, 2010, 30(12):2430-2434. (ZHI Y N, YAN A M, SHU R, et al. High-speed digital beam scanner based on electro-optic crystal switch array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12):2430-2434.)
- [17] 艾月霞,李景镇,龚向东.超越曲面电极结构电光偏转器研究 [J]. *光子学报*, 2006, 35(1):33-36. (AI Y X, LI J Z, GONG X D. Studies on electro-optic deflector with hypersurface electrode structure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(1):33-36.)
- [18] BOSCO A, BOOGERT S T, BOORMAN G E, et al. A large aperture electro-optic deflector [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(21):2011104-1-211104-3.
- [19] 卢智勇,万玲玉,马雪梅,等.不同几何结构电光偏转器比较研究 [J]. *激光技术*, 2011, 35(5):667-671. (LU Z Y, WAN L Y, MA X M, et al. Comparison of electro-optic deflectors of different geometric configuration [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(5):667-671.)