

doi: 10.3788/gzxb20124107.0794

畴反转结构片状集成 4×4 电光开关的设计与仿真

卢智勇, 万玲玉, 超亮芳

(广西大学 物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 基于铁电体畴反转结构的电光偏转特性, 设计了一种片状集成的 4×4 电光开关, 其由四个结构相同的半抛物和四个抛物形微小偏转器集成构成. 通过优化抛物形偏转器结构, 给出了电光开关的设计参量, 电光开关性能通过光束传播法进行仿真模拟, 仿真结果表明该开关切实可行. 实际应用中, 系统误差可以通过电场调节补偿, 使光路准确交换. 该片状电光开关的整体尺寸为 $48 \text{ mm} \times 2.2 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高), 最大使用电场约 $13.73 \text{ V}/\mu\text{m}$, 适用于高速交换的光互连系统.

关键词: 集成光学; 光开关; 电光偏转; 畴反转; 光束传播法

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)07-0794-6

0 引言

随着物联网和高速光交换网的发展, 高调制速率多通道光开关的需求日益强烈, 现有光开关类型可分为机械式光开关和非机械式光开关两大类^[1], 机械式光开关技术相当成熟, 但响应速度慢(毫秒级)、体积较大, 非机械式光开关有电光开关^[2-4]、热光开关^[5-6]、声光开关^[7]等, 其中热光开关对波长敏感, 声光开关窜扰问题不易解决, 而电光开关响应速度最快, 为亚纳秒量级, 理论极限调制速率达 100 GHz , 对于高速光交换系统具有强大吸引力. 近年来, 随着铁电畴周期极化工艺技术的日渐成熟, 基于周期性畴反转电光偏转的光开关逐渐受到人们的重视^[8-10], 喇叭和抛物结构的畴反转 1×2 ^[11], 2×2 ^[12], 3×3 和 $1 \times N$ ^[13] 的电光开关概念器件相继被提出, 本文在优化分析的基础上, 进一步减小尺寸、增大角度和增加开关数目, 采用半抛物和抛物电光偏转器优化结构, 设计了基于铁电体畴反转偏转特性的片状集成 4×4 电光开关, 其中, 优化抛物形结构偏转器在入射光束小于入口宽度时, 在相同几何结构和电场条件下, 偏转特性比现有喇叭结构^[12-13]更好^[14]. 最后, 文中给出了系统设计参量并采用光束传播法(BPM)进行了仿真模拟, 仿真结果和理论分析相符. 设计完成的电光开关尺寸为 $48 \text{ mm} \times 2.2 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高), 系统小型集成化, 在高速调制的光交换系统中有潜在应用.

1 器件设计

1.1 结构设计

畴反转结构 4×4 片状电光开关如图 1 所示, 在一片铁电体晶片上分别集成 4 个结构相同的半抛物和 4 个抛物形畴反转电光偏转器, 在每个电光偏转器的 $\pm z$ 表面镀上电极, 可通过电极对偏转器施加电场, 图中 A, B, C, D 为 4 个输入端口, P, Q, R, S 为 4 个输出端口, 采用对称结构设计, 端口 A, D, P, S 对应的偏转器结构相同, 端口 B, C, Q, R 对应的偏转器结构相同, 每个偏转器的入口宽度和出口宽度都相同, 在合理的设计下, 通过在偏转器上施加电场使输入光束偏转到输出端相应的偏转器上, 再对该偏转器施加相应的电场就可以使光束重新偏转, 最后从输出端水平射出, 实现光路的开关交换.

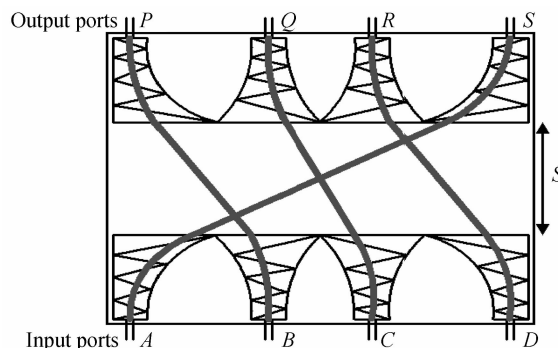


图 1 畴反转结构 4×4 片状电光开关结构
Fig. 1 Schematic of a 4×4 planar electro-optic switch based ferroelectric inverted domains

基金项目: 国家自然科学基金(No. 10964001)和广西区研究生教育创新计划(No. 105931003085)资助

第一作者: 卢智勇(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为晶体光学和电光扫描器. Email: luzhiyong15@126.com

导师(通讯作者): 万玲玉(1975-), 女, 教授, 主要研究方向为衍射光学、晶体光学和空间光通讯. Email: wanlingyu75@126.com

收稿日期: 2011-11-16; 修回日期: 2011-11-28

1.2 设计原理

畴反转电光偏转的原理基于相邻反转畴的电光效应,将主轴相反的三角晶体棱镜级联,沿平行晶体自发极化方向施加电场,180°畴壁两侧的折射率发生变化,当非常光 e 光通过不同折射率的三角区域时,在界面发生折射,使光线产生偏转,通过控制电场可以控制偏转范围,偏转特性和施加电场、级联数目、偏转器几何结构密切相关^[8]. 对于 e 偏振光,相邻畴反转区域的折射率差 $\Delta n^{[13]}$ 为

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

式中 n_e 是 e 光的折射率, γ_{33} 是晶体的电光系数, U 是施加在极化方向上的电压, d 是晶体的厚度.

当三角棱镜级联数目足够多(大于 20)时,光线在周期性畴反转电光偏转器的传输轨迹方程^[8]可近似表示为

$$\frac{d^2 x}{dz^2} = \frac{d\theta}{dz} = \frac{1}{n_0} \frac{\Delta n}{W(z)} \quad (2)$$

式中, z 是入射光束的方向, x 为偏离入射方向的位置. $W(z)$ 是偏转器的宽度函数. 当 $W(z)$ 为常量时,偏转器为常规矩形偏转器,当 $W(z)$ 是 z 的函数时,为非矩形偏转器,目前提出的非矩形偏转器主要有梯形、喇叭形、抛物线形等. 矩形偏转器虽然结构简单,但偏转范围非常有限,对偏转范围要求稍大的系统不适用;非矩形偏转器的偏转特性根据 $W(z)$ 的不同而不同,在三种非矩形偏转器中,喇叭形偏转器的综合性能最优,抛物线形次之,梯形最后^[15],但喇叭形偏转器的边界是一条拟合的曲线,需要在确定最大施加电场的情况下通过模拟给出结构参量,且在光束口径小于入口宽度时,偏转角度不一定优于其他的非矩形偏转器^[14]. 抛物线形偏转器在优化设计下可实现较佳的偏转范围和偏转灵敏度,在光束口径小于入口宽度时,存在一个最佳的曲率系数和长度,使得抛物线形电光偏转器在最大电场下获得比喇叭形更大的偏转角度,因此本文采用最佳曲率的抛物线形电光偏转器进行电光开关的设计.

图 2(a)、(b)为半抛物形和抛物形电光偏转器,其宽度函数均可表示为

$$W(z) = W_0 + \frac{W_1 - W_0}{L^2} z^2 \quad (3)$$

式中 W_0 为入口宽度, W_1 为出口宽度, L 为偏转器的长度, $k = \frac{W_1 - W_0}{L^2}$ 是抛物形偏转器的曲率系数.

将式(3)代入式(2),可得光线在偏转器内的偏转角度和偏转位移分别为

$$\theta(z) = \frac{\Delta n}{n_0} \frac{L}{\sqrt{W_0(W_1 - W_0)}} \arctan \left(\sqrt{\frac{W_1 - W_0}{W_0 L^2}} z \right) \quad (4)$$

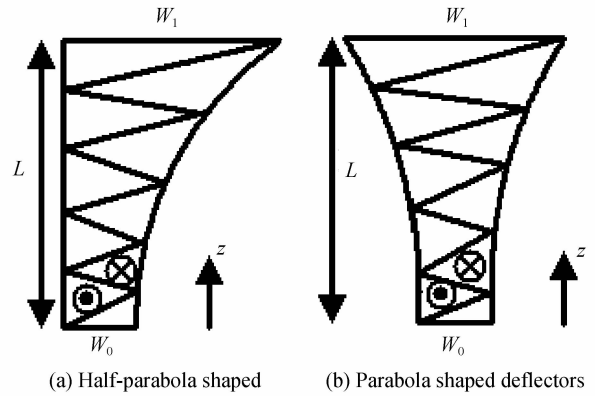


图 2 半抛物形与抛物形偏转器

Fig. 2 Half-parabola shaped and parabola shaped deflectors

$$\begin{aligned} x(z) = & \frac{\Delta n}{n_0} \frac{L}{\sqrt{W_0(W_1 - W_0)}} z \arctan \left(\sqrt{\frac{W_1 - W_0}{W_0 L^2}} z \right) - \\ & \frac{\Delta n}{n_0} \frac{L}{\sqrt{W_0(W_1 - W_0)}} \sqrt{\frac{W_0 L^2}{4(W_1 - W_0)}} \cdot \\ & \ln \left(\frac{W_0 L^2}{W_1 - W_0} + z^2 \right) + \frac{\Delta n}{n_0} \frac{L}{\sqrt{W_0(W_1 - W_0)}} \cdot \\ & \sqrt{\frac{W_0 L^2}{4(W_1 - W_0)}} \cdot \ln \left(\frac{W_0 L^2}{W_1 - W_0} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

算得在出口位置的偏转角和出口位置的偏离位移分别为

$$\theta(L) = \frac{\Delta n}{n_0} \frac{L}{\sqrt{W_0(W_1 - W_0)}} \arctan \left(\sqrt{\frac{W_1 - W_0}{W_0}} \right) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} x(L) = & \frac{\Delta n}{n_0} \frac{L}{\sqrt{W_0(W_1 - W_0)}} \left[L \arctan \left(\sqrt{\frac{W_1 - W_0}{W_0}} \right) - \right. \\ & \left. \frac{L}{2\sqrt{W_1 - W_0}} \ln \left(\frac{W_1}{W_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

若半抛物形和抛物形的入口、出口宽度和长度一样,施加电场相同时,偏转角和偏移量相同,其中抛物形偏转器可沿上下两个方向偏转,半抛物形只沿曲边方向偏转,其可偏转的角度比抛物形大,因为可施加的最大电场比抛物形大,进而有更大的偏转角度,最大可施加电场指在固定的长度、入口与出口宽度下,使光束刚好打到出口边界上的施加电场,如该电场继续增大光束会在中途偏出边界,因此为最大可施加电场,利用该特点,采用 4 个半抛物形和 4 个抛物形偏转器构成如图 1 所示的 4×4 的电光开关. 当这 8 个偏转器的结构参量确定后,对输入偏转器施加电场,使输入光束偏转到相应的输出偏转器,对输出偏转器也施加相应的电场,光束将从从输出端口水平射出,通过施加电场的控制,实现对光路的交换控制.

1.3 光路交换

若光束从 A 端的半抛物形偏转器的中央入射,

不施加电场时,折射率不变化,光束不偏转直接通过半抛物形偏转器,同时 P 输出端的半抛物形偏转器也不施加电场,光路直接从 A 端通到 P 端.

当光路要在 $A-Q$ 间交换时,对 A 端偏转器施加电压 U_{AQ} , Q 端施加电压 U_{QA} ,有 $\theta \approx \left. \frac{dx}{dz} \right|_{z=L} = \tan \theta$,要使光束刚好在 Q 端水平射出,需满足

$$s \cdot \theta_{AQ} = \frac{3W_1}{2} - \frac{W_0}{2} - (x_{AQ} + x_{QA}) \quad (8)$$

$$\theta_{AQ} = \theta_{QA} \quad (9)$$

式中所有偏转器的出、入口宽度都一致, s 是输入端偏转器的出射面到输出端偏转器的入射面的距离, θ_{AQ} 、 θ_{QA} 分别是 A 输入端偏转器的出射角、 Q 输出端偏转器的入射角, x_{AQ} 、 x_{QA} 分别是 A 输入端偏转器的出射偏移量、 Q 输出端偏转器的入射偏移量.由式(1)、(6)~(9)联立可求得所需的 U_{AQ} 、 U_{QA} .

当光路要在 $A-R$ 间交换时,在 A 端施加电压 U_{AR} , R 端施加电压 U_{RA} ,需满足

$$s \cdot \theta_{AR} = \frac{5W_1}{2} - \frac{W_0}{2} - (x_{AR} + x_{RA}) \quad (10)$$

$$\theta_{AR} = \theta_{RA} \quad (11)$$

联立式(1)、(6)、(7)、(10)、(11)可求得所需的 U_{AR} 、 U_{RA} .

光路要变为 $A-S$ 时, A 端施加电压 U_{AS} , S 端施加电压 U_{SA} ,需满足

$$s \cdot \theta_{AS} = 4W_1 + W_0 - (x_{AS} + x_{SA}) \quad (12)$$

$$\theta_{AS} = \theta_{SA} \quad (13)$$

联立式(1)、(6)、(7)、(12)、(13)可求得所需的 U_{AS} 、 U_{SA} .

光路要变为 $B-R$ 时, B 端施加电压 U_{BR} , R 端施加电压 U_{RB} ,需满足

$$s \cdot \tan \theta_{BR} = W_1 - (x_{BR} + x_{RB}) \quad (14)$$

$$\theta_{BR} = \theta_{RB} \quad (15)$$

联立式(1)、(6)、(7)、(14)、(15)可求得所需的 U_{BR} 、 U_{RB} .得到以上四个光路的施加电压后,其它光路可以根据对称性写出.在具体设计中,只要使光路 $A-S$ 、 $B-S$ 交换所施加的电压不超过半抛物形、抛物形的最大可施加电压,该电光开关便可以实现.若要降低施加电压,可以通过减小晶体厚度、增长距离 s 、长度 L 等方法,但又要考虑光束大小和器件尺寸等因素,因此需要合理的设计综合选择晶体尺寸和距离 s .

2 结构参量选取与仿真

鉴于 LiTaO_3 晶体具有高损伤阈值和高电光系数的优点,选择其作为电光开关的基底材料,如图 1

所示在其上制得 4 个半抛物和 4 个抛物形周期性畴反转电光偏转器.设使用的激光波长为 $1.55 \mu\text{m}$,采用 e 线偏振光,折射率为 $n_e = 2.1224$,电光系数 $\gamma_{33} = 27.4 \times 10^{-9} \text{ mm/V}$,偏转器厚度 $d = 0.5 \text{ mm}$,入口宽度为 $W_0 = 0.25 \text{ mm}$.首先对偏转器进行优化,确定偏转器的宽度和长度,即确定抛物形偏转器的曲率系数 $k = \frac{W_1 - W_0}{L^2}$.图 3 给出了高斯光束输入时,不同曲率系数下,最大电场为 14 kV/mm 时(不能超过晶体的阈值电场 20.1 kV/mm)偏转器的偏转特性曲线,图中,光束偏转出边界后的数据不再画图,意为该曲率系数下的偏转角受限.对于高斯光束,光束半径为

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_0 (z - z_0)}{\pi \omega_0^2 n_0} \right)^2} \quad (16)$$

式中, $2\omega_0 = 200 \mu\text{m}$ 为光束束腰直径, z_0 是光束的束腰位置, λ_0 是自由空间的光波长.

从图 3 可看出,在最大可施加电场下 (14 kV/mm),系数 k 的微小变化使得偏转受限范围变化较大,存在一临界值 k_m ,当 $k > k_m$ 时,在 $l > l_m$ 之后,边界随长度的变化率大于光线偏转变化率,偏转角不

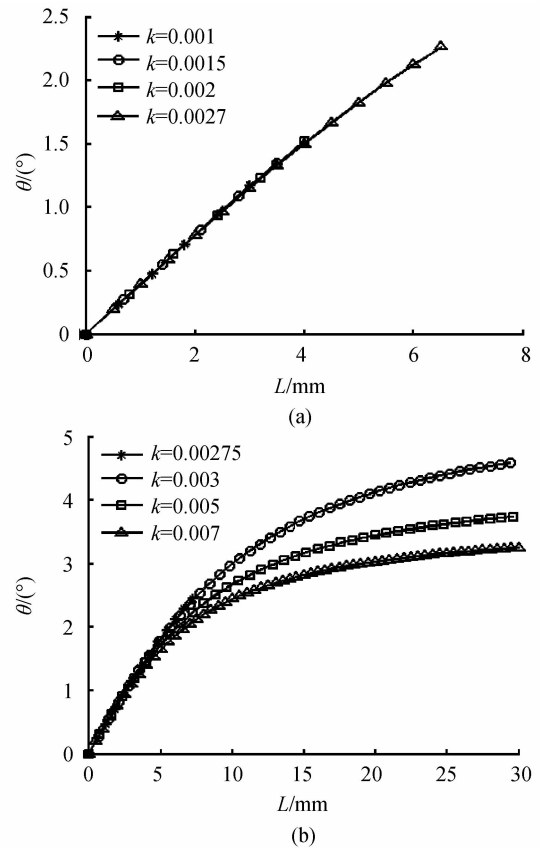


图 3 不同曲率系数下,最大电场为 14 kV/mm 的偏转角随长度的变化情况

Fig. 3 Relationship of the deflection angles and the lengths for different k on condition of the maximum applied electric field is 14 kV/mm

受限,随偏转器长度增加可不断增大,但 k 越大,偏转角随长度增加的增长率则越小,因此需要结合应用目标进行优化选择. 根据常规 LiTaO_3 晶体的使用长度,设计偏转器长度约 $10 \sim 15 \text{ mm}$,通过运算可知曲率系数为 $k=0.00278$ 时,在 $L=8.54 \text{ mm}$ 处受限,当曲率系数为 $k \geq 0.0028$ 后,偏转器不受限. 为了使结构适中,晶体切割方便,选取 $k=0.003$,此时,系数大于该预设最大电压下的受限系数,因此,实际的最大可施加电压比预设最大电压大,可计算得 $U_{\max \text{ half-parabola}}=7.5918 \text{ kV}$,和 $U_{\max \text{ parabola}}=4.0589 \text{ kV}$; L 应在受限长度附近,此时角度增加率最大,晶体长度利用率最佳,为方便计算,选取 $L=10 \text{ mm}$,有 $W_1=W_0+kL^2=0.55 \text{ mm}$. 其次,确定输入端偏转器出射面到输出端偏转器入射面的距离 s . 预设电光开关的最大偏转使用电压为 7 kV 时,联立式(1)、(6)~(7)、(12)~(13)求得所需的最小距离 $s=25.857 \text{ mm}$,若采用比该距离小的间距,则电光开关的最大使用电压将超过 7 kV ,为了获得更多的补偿电压,这里取 $s=28 \text{ mm}$.

这样,电光开关的具体参量为:8个偏转器入口宽度 $W_0=0.25 \text{ mm}$,出口宽度 $W_1=0.55 \text{ mm}$,长度 $L=10 \text{ mm}$,输入偏转器和输出偏转器间距 $s=28 \text{ mm}$,整体尺寸为 $48 \text{ mm} \times 2.2 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高),计算出各光路交换所需的电压为: $U_{AQ}=U_{QA}=2.3759 \text{ kV}$, $U_{AR}=U_{RA}=3.7335 \text{ kV}$, $U_{AS}=U_{SA}=6.6186 \text{ kV}$, $U_{BR}=U_{RB}=1.8668 \text{ kV}$,其他的电压依据对称性可相继写出,如表1所示,表中光束向左偏转的电压为正,向右偏转的电压为负. 将它们与在抛物和半抛物偏转器中的最大使用电压比较,可得它们的最大补偿电压分别为: $U'_{AQ}=U'_{QA}=1.6830 \text{ kV}$, $U'_{AR}=U'_{RA}=0.3254 \text{ kV}$, $U'_{AS}=U'_{SA}=0.9732 \text{ kV}$, $U'_{BR}=U'_{RB}=2.1921 \text{ kV}$,同样,其他的补偿电压可根据对称性写出. 需要说明的是在计算应用电压时,未考虑光束大小和高斯光束的传播效应,实际应用时的电压需要修正.

表1 4×4 电光开关光路交换电压编码表
Table 1 Encode table of applied voltage of 4×4 electro-optic switch

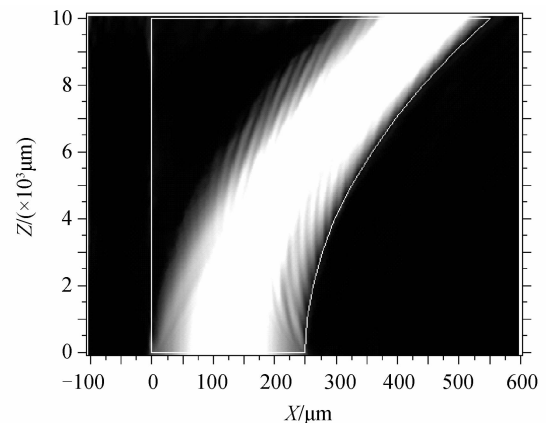
Ligh path	$(U_{\text{input}} U_{\text{output}})$ (kV)	Ligh path	$(U_{\text{input}} U_{\text{output}})$ (kV)
A \rightarrow P	(0, 0)	C \rightarrow P	(3.7335, -3.7335)
A \rightarrow Q	(-2.3759, 2.3759)	C \rightarrow Q	(2.3759, -2.3759)
A \rightarrow R	(-3.7335, 3.7335)	C \rightarrow R	(0, 0)
A \rightarrow S	(-6.6186, 6.6186)	C \rightarrow S	(-2.3759, 2.3759)
B \rightarrow P	(2.3759, -2.3759)	D \rightarrow P	(6.6186, -6.6186)
B \rightarrow Q	(0, 0)	D \rightarrow Q	(3.7335, -3.7335)
B \rightarrow R	(-1.8668, 1.8668)	D \rightarrow R	(2.3759, -2.3759)
B \rightarrow S	(-3.7335, 3.7335)	D \rightarrow S	(0, 0)

为了验证电控集成片状 4×4 电光开关的可行性,采用光束传播法(BPM)进行仿真. 将畴反转电光偏转器的折射率变化等效为一个线性梯度折射率,图4为最大可施加电压下半抛物形(7.5918 kV)和抛物形偏转器(4.0589 kV)的光路仿真图,图中可看出在最大可施加电场下,光束刚好偏转到边界,与理论相符. 图5(a)是采用表1的电压值对 4×4 光开关的光路进行仿真,由图5可看出,在理论电压下,每个光路都基本从入口位置偏转到指定的出口位置,但理论值和仿真值存在一点偏差,没偏转到指定的中央位置,其可能的原因有:

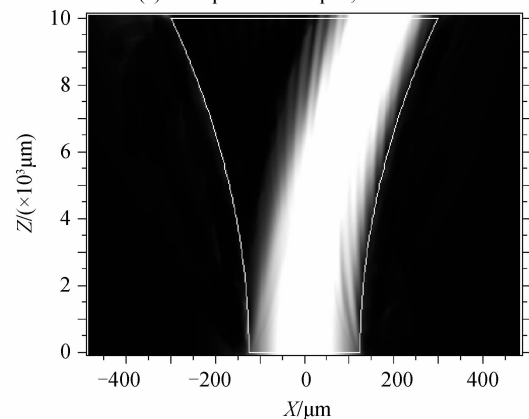
1)理论电压值是在梯度折射率下,采用特殊函数直接积分得到,而光束传播法是在初始光场和边界条件下,根据迭代计算传播路径,计算准确度和步长有关,两者的计算方法不同导致差异;

2)理论电压值由光线追迹方法求得,在传播的过程中忽略了光斑直径大小的变化,而BPM仿真则采用了高斯光束,随着传播距离的增大,其光斑直径变大,从而导致了差异.

理论值与仿真值之间的差异可以通过调节电压



(a) Half-parabola shaped, $U=7.5918 \text{ kV}$



(b) Parabola shaped, $U=4.0589 \text{ kV}$

图4 抛物形偏转器的BPM仿真

Fig. 4 Numerical simulation of the performance of the paraboloidal deflector using the BPM

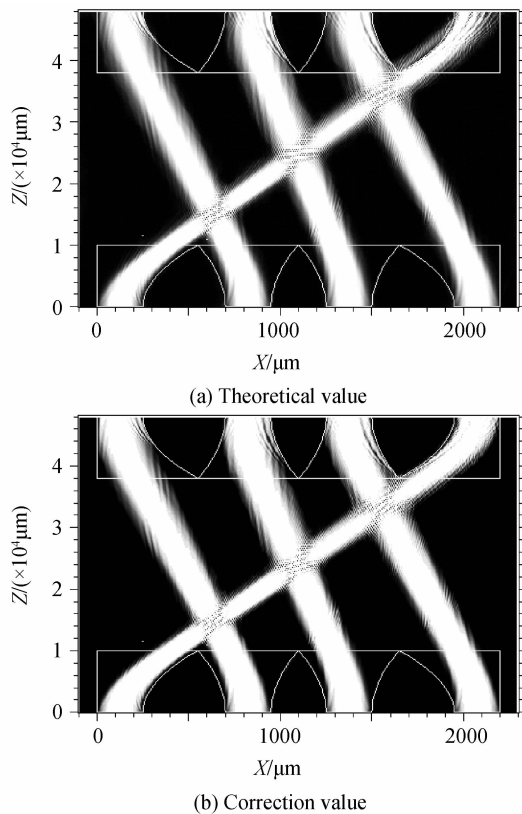


图5 畴反转结构片状 4×4 电光开关的BPM仿真
Fig. 5 Numerical simulation of the performance of the 4×4 planar electro-optic switch based ferroelectric inverted domains using the BPM

获得补偿,只要调节的电压不超过各自路径的最大补偿电压,则不管何种原因引起的偏转误差都可以得到补偿.经计算得电压修正如下: $U_{AQ} = U_{QA} = 2.4759\text{ kV}$, $U_{AR} = U_{RA} = 3.8335\text{ kV}$, $U_{AS} = U_{SA} = 6.8686\text{ kV}$, $U_{BR} = U_{RB} = 2.0168\text{ kV}$.图5(b)为施加电压修正后的BPM光路仿真,可见各个光路的传播全部由输入端准确地偏转到输出端,修正结果满足要求.修正值 U_{AS} 增大了 0.25 kV , U_{BR} 增大了 0.15 kV ,其他路径的电压各增大了 0.1 kV ,最大的误差为 3.8% .

综上所述,设计的畴反转结构 4×4 片状电光开关可通过电压的控制实现4路光之间的开关和交换,另外,还可通过减少晶体的厚度、增大距离 s 等方法来降低所需电压,在具体应用中可根据需要合理选择,优化设计电光开关.在实际的应用中,各种原因如振动、压力、晶体切割、畴结构制作误差等因素造成的光路偏转误差,都可以通过电压调节进行校正,使光路准确交换,另外,若将入射光束作准直处理,则光束的开关交换功能会比模拟结果要好.

3 结论

高响应速度和高调制速率的光开关在高速数据信息处理和高速传输等领域有重要应用,针对集成

微型化的高速光开关,采用优化的抛物形电光偏转器,提出了基于抛物形电光偏转器的片状集成 4×4 电光开关,该电光开关主体元件仅为一片晶片,其上合理集成4个半抛物和4个抛物型电光偏转器.采用 LiTaO_3 晶片作为基板,在优化抛物形偏转器的基础上设计了 4×4 电光开关的结构参量,总体尺寸为 $48\text{ mm}\times 2.2\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高).对设计完成的器件功能采用光束传播法进行了功能仿真,仿真结果和理论结果基本相符,在修正电场作用下,该电光开关可准确进行光路的开关和交换,实际应用中,若入射光束为准直光束,会获得比模拟结果更好的性能,该电光开关开关速度快、易于集成,可方便进行高速率调制.

参考文献

- [1] LIANG Jin-tao, LIU Jun-hua, LI Xin, *et al.* A piezoresistive micro-cantilever for thermal infrared detector [J]. *Chinese Optics Letters*, 2006, **4**(3): 128-130.
- [2] REN Hai-xia, LIU Li-ren, SONG Zhe, *et al.* Double refraction and reflection of sequential interfaces in a crystal and application to integration of $1\times N$ optical switch [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 152-157.
任海霞,刘立人,宋哲,等.晶体的连续双折射双反射及其集成应用:1(N电光开关[J].光学学报,2004,**24**(2): 152-157.
- [3] ZHANG Rui-li, WEN Wen-long, ZHAO Bao-shen, *et al.* A high speed electro-optical switch with fiber optic array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2210-2213.
张蕊利,温文龙,赵宝升,等.一种基于光纤阵列的高速电光开关系统[J].光子学报,2009,**38**(9): 2210-2213.
- [4] WANG Q, YAO J P. A high speed 2×2 electro-optic switch using a polarization modulator [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(25): 16500-16505.
- [5] WANG Wei, SUN Xiao-qiang, WANG Xi-bin, *et al.* Low power consumption polymer thermo-optic switch with Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 610-613.
王微,孙小强,王希斌,等.低功耗聚合物 Mach-Zehnder 热光开关[J].光子学报,2010,**39**(4): 610-613.
- [6] YANG Jian-yi, JIAN Xiao-qing, YANG Fang-hui, *et al.* 2×2 Total-internal-reflection optical switch using thermo-optic effect of polymer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(2): 137-140.
杨建义,江晓清,杨方辉,等. 2×2 有机聚合物热的全内反射型热光光开关[J].中国激光,2003,**30**(2): 137-140.
- [7] LIU Guo-xiang, HU Li, YE Kun-zhen. The experimental study of the 2×2 all-optical fiber acousto-optic switch [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(1): 53-55.
刘国祥,胡力,叶昆珍. 2×2 全光纤声光开关的实验研究[J].激光技术,2006,**30**(1): 53-55.
- [8] CHUI Y, ZHOU Jie, STANCIL D D, *et al.* Shape-optimized electrooptic beam Scanner: analysis, design, and simulation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, **17**(1): 108-114.
- [9] SCRYMGEOUR D A, BARAD Y, GOPALAN V, *et al.* Large-angle electro-optic laser scanner on LiTaO_3 fabricated by *in situ* monitoring of ferroelectric-domain micropatterning [J]. *Applic Optics*, 2001, **40**(34): 6236-6241.
- [10] WAN Ling-yu, LU Zhi-yong, WANG Rong-cheng. Electro-optic laser scanner for arbitrary scanning in 8 rows [J].

- Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(2): 323-328.
万玲玉,卢智勇,王戎丞. 一种 8 行任意扫描的电光扫描器[J]. *应用光学*, 2011, **32**(2):323-328.
- [11] IODICE M, COPPOLA G, FERRARO P, *et al.* Electro-optically controlled switching and deflection in domain-engineered LiNbO₃[C]. *SPIE*, 2003, **4944**: 254-261.
- [12] ZUO Y, MONY M, BAHAMIN B, *et al.* Bulk electro-optic deflector-based switches[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(16): 3323-3331.
- [13] KRISHNAMURTHI M, TIAN Li-li, GOPALAN V. Design and simulation of planar electro-optic switches in ferroelectrics[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(5): 052912.
- [14] WAN Ling-yu, SHI Bao-shan, LU Zhi-yong, *et al.* Study on deflection characteristics of electro-optic scanners with special geometrical shapes[C]. *SPIE*, 2011, **8120**: 81201D1-8.
- [15] LU Zhi-yong, WAN Ling-yu, MA Xue-mei, *et al.* Comparison of electro-optic deflections of different geometric configurations[J]. *Laser Technology*, 2011, **35**(5): 667-671.
- 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.

Design and Simulation of Planar 4×4 Electro-optic Switches Based Ferroelectric Inverted Domains

LU Zhi-yong, WAN Ling-yu, CHAO Liang-fang

(College of Physics Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: An integrated 4×4 planar electro-optic switch is designed based on the electro-optic effect in ferroelectric inverted domains. It integrated four minute half-parabola shaped and four parabola shaped deflectors with the same configurations in a ferroelectric wafer. To optimize the design of the parabola shaped deflectors, an appropriate electro-optic switch is provided. Its properties of switch and exchange are analyzed using the beam propagation method (BPM). Simulation results show that the 4×4 planar electro-optic switch is feasible and the beam deflection errors can be compensated in practice by adjusting applied electric-field. The size of the optical switch is $48 \text{ mm} \times 2.2 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ and its maximum applied electric-field is about $13.73 \text{ V}/\mu\text{m}$. It has potential applications in high-speed optical exchange systems.

Key words: Integrated optics; Optical switch; Electro-optic deflection; Ferroelectric domain inversion; BPM