

气压驱动的 $N \times N$ 微流控光开关阵列

万静*, 郭明瑞, 张伟, 蒙列, 俞廷杰

南京邮电大学电子与光学工程学院, 江苏 南京 210023

摘要 提出以一种 2×2 微流控光开关为单元的 $N \times N$ 光开关阵列, 采用波导结构, 利用微流控气压驱动技术和压电陶瓷阀来控制各个微流道内气体和液体的相对位置, 实现开关阵列的光路选择和开关功能。同时给出 $N \times N$ 光开关阵列的部分阻塞型和完全无阻塞型两种拓扑结构, 研究和讨论了 $N \times N$ 光开关阵列的最优路径和光传输特性, 并进行结构优化。研究表明 $N \times N$ 光开关阵列的插入损耗和串扰远小于一般光开关阵列。对于 1550 nm 波长, 其中 4×4 光开关阵列的插入损耗为 0.28 dB~0.54 dB, 最大串扰为 -43.5 dB~-23.2 dB。该研究实现了微流控光开关阵列, 解决了一般光开关阵列中普遍存在的插入损耗和串扰大的问题, 具有阵列可控性好、偏振相关性损耗可忽略、宽波段(从可见光到近红外波段)的优点。

关键词 集成光学; 微流控光学; 光开关阵列; 气压驱动; 压电陶瓷阀

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2213001

 $N \times N$ Optofluidic Switch Array with Pneumatic Actuation

Wan Jing*, Guo Mingrui, Zhang Wei, Meng Lie, Yu Tingjie

College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China

Abstract An $N \times N$ optical switch array, which uses a 2×2 optofluidic switch as the switch unit, is proposed in this paper. This switch array adopts a waveguide structure and utilizes the microfluidic pneumatic actuation and piezoelectric ceramic valves to control the relative positions of gas and liquid in each microchannel and thus achieve the optical path selection and switching function. Meanwhile, two topologies of partial blocking and complete non-blocking optical $N \times N$ switch arrays are also presented. The optimal path and optical transmission characteristics of the $N \times N$ optical switch array are researched and discussed, and the structure is optimized. The research results reveal that the insertion loss and crosstalk are much lower than those of general optical switch arrays. For the wavelength of 1550 nm, the insertion loss of the 4×4 optical switch array is 0.28 dB-0.54 dB, and the maximum crosstalk is -43.5 dB-23.2 dB. This paper implements the optofluidic switch array and solves the common problems of large insertion loss and crosstalk in general optical switch arrays. Moreover, the proposed array has the advantages of good array controllability, negligible polarization-dependent loss, and a broad band (from visible light to near-infrared bands).

Key words integrated optics; optofluidics; optical switch array; pneumatic actuation; piezoelectric ceramic valve

1 引言

光开关阵列在云计算、数据中心、深度学习和可编程处理器等领域具有广泛的应用^[1-3]。光开关具有多种形式的物理结构, 其中波导型光开关以其可集成度高、尺寸小和光学性能优异等特点引起了人们的极大兴趣^[4], 是目前构建光开关阵列中最具前景的一种。

常见的光开关阵列有电光开关^[5]、热光开关^[6]、磁

光开关^[7]、MEMS (microelectromechanical system) 光开关^[8]及干涉型光开关。近年来, 这些类型的光开关报道中, Nakamura等^[9]报道的基于波导光栅的 $1 \times M$ 光开关阵列中的 1×2 光开关具有 10.9 dB 的插入损耗和 29.6 dB 的消光比。Ueda等^[10]提出的基于级联马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的 4×4 电光开关阵列有 18.6 dB 的插入损耗和 -20 dB 的串扰。孙健等^[11]也报道了一种 MZI 热光开关, 它有 9.5 dB 的插入损耗。Xing等^[12]

收稿日期: 2022-03-11; 修回日期: 2022-05-15; 录用日期: 2022-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(61574080)、自然学科横向科研发展基金(HJ1060319960015)

通信作者: *wanj@njupt.edu.cn

演示了一种波导型 4×4 电光开关阵列, 具有 22 dB 的插入损耗和 -12 dB 的串扰。Song 等^[13]报道的 2×2 聚合物热光开关具有 10.6 dB 的插入损耗和 15.34 dB 的消光比。这些光开关及光开关阵列通常对偏振敏感, 需温度补偿, 插入损耗和串扰大。MEMS 开关解决了偏振相关性损耗等问题, 但插入损耗和串扰仍然很大, 且结构复杂。此外, 光路切换型光开关阵列由于光路链接多, 普遍存在插入损耗大、串扰大的问题。

通过控制液体的流动或改变液体成分, 微流控光学为灵活可调的光学系统提供了多种可能性^[14], 并在微分析芯片和液体透镜领域被广泛研究^[15]。微流控光学也被应用于光开关。Yuan 等^[16]报道的基于介质上电润湿效应和液滴的 1×2 微流控光开关具有 0.35 dB 的吸收损耗。Murade 等^[17]提出基于双液体介质上电润湿效应的微流控光开关。姚黎晓等^[18]报道了一种基于液体棱镜的光开关。陈陶等^[19]提出一种基于电润湿效应的微流控光开关阵列。然而, 已报道的微流控光开关很少给出诸如插入损耗和串扰等重要的开关性能指标, 而且, 这些微流控光开关的结构和微流控驱动模式大多不适合阵列式开关设计, 因而很少有微流控光开关阵列的报道。

本文提出以一种 2×2 微流控光开关为开关单元的 $N \times N$ 微流控光开关阵列, 采用波导结构, 利用微流

控气压驱动技术和压电陶瓷阀来控制各个微流道内气体和液体的相对位置, 从而实现光开关阵列的光路选择和开关功能。同时给出部分阻塞型和完全无阻塞型两种开关阵列的拓扑结构。所提光开关阵列具有可控性好、结构简单、偏振相关性损耗可忽略、宽波段(从可见光到近红外波段)、无需温度补偿等优点。本文实现了微流控光开关阵列, 并解决了一般光开关阵列中普遍存在的插入损耗和串扰大的问题。

2 开关阵列的结构和工作原理

所提 $N \times N$ 光开关阵列采用如图 1(a) 所示的夹芯结构, 包括盖板、驱动层、波导层和衬底。盖板上预留通导线的小孔, 其由聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 制成。波导层内, 条形波导和微流道的四周由包层材料包围。条形波导以一定倾角相互交叉且具有半拉锥结构, 如图 1(b) 所示。微流道位于条形波导的交叉口处。微流道内通过聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 薄膜密封一段液体柱和空气。条形波导和液体具有相同或很接近的折射率, 比周围包层的折射率略高。驱动层和波导层的结构细节如图 1(c) 所示, 驱动层内的主气管和支路气管与波导层内微流道的气腔连接。驱动层镶嵌有压电陶瓷阀, 它由压电陶瓷和其下端粘接的一个小绝缘柱构成。压电陶瓷侧面的两个电导线通过盖板上小孔与外部电源连接, 衬底为硅片。

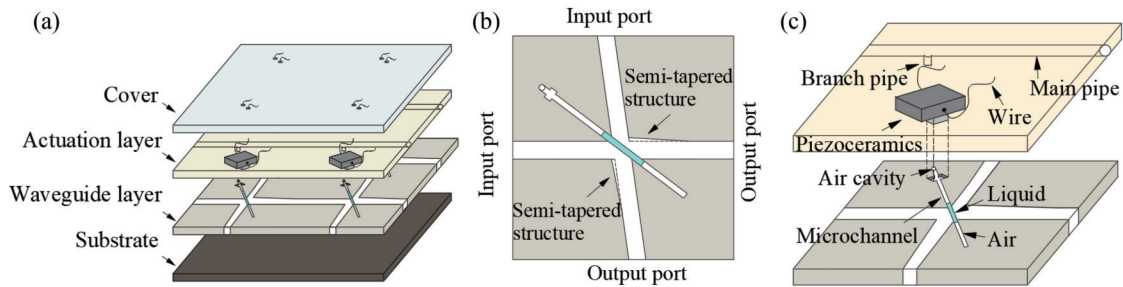


图 1 $N \times N$ 微流控光开关阵列结构。(a) 总体结构; (b) 开关单元波导层; (c) 驱动层和波导层结构

Fig. 1 Structure diagrams of $N \times N$ microfluidic optical switch array. (a) Overall structure; (b) waveguide layer of switch unit; (c) structures of actuation layer and waveguide layer

开关单元的工作原理如图 2 所示。假设微流道内液体柱的初始位置位于交叉波导中心处, 压电陶瓷不加电压, 阀开。通过微型气压泵抽离主气管内的空气, 使微流道内的液体柱随之移动到如图 2(a) 所示的位置。接着施加电压给压电陶瓷阀, 通过逆压电效应^[20]使压电陶瓷伸长, 从而堵塞微流道, 阀关。这时光在微流道表面遇到空气柱时发生全内反射^[21], 改变传播方向, 从端口 2 输出。若撤去压电陶瓷上的电压, 压电陶瓷收缩, 阀开。通过气管注入空气, 推动微流道内液体柱移动到图 2(b) 所示的位置, 然后关阀。由于条形波导和液体折射率相同, 光可透过液体沿直线传播, 从端口 1 输出。通过注入/抽离空气和压电陶瓷阀可以控制各个开关单元中微流道内气液的相对位置, 由此选择 $N \times N$ 光开关阵列的光路径和输出端口。

3 理论分析

如图 3 所示, 设输入、输出条形波导的夹角为 α , 则微流道与条形波导的夹角为 $(180^\circ - \alpha)/2$ 。设微流道的宽度为 d , 条形波导和微流道内流体的折射率分别为 n_1 和 n_2 , 光在微流道表面的入射角为 θ_1 、折射角为 θ_2 , S 为古斯-汉欣位移。

假设 $x-z$ 平面为入射面, 则入射波和透射波分别可表示为

$$E_1 = E_1 \exp[i(k_1 r - \omega_1 t)], \quad (1)$$

$$E_2 = E_2 \exp[i(k_2 r - \omega_2 t)], \quad (2)$$

式中: k_1 和 k_2 分别表示入射光和透射光的波矢; r 为矢径; ω_1 和 ω_2 分别表示入射光和透射光的角频率, 且 $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ 。根据折射定律, 折射角 θ_2 满足

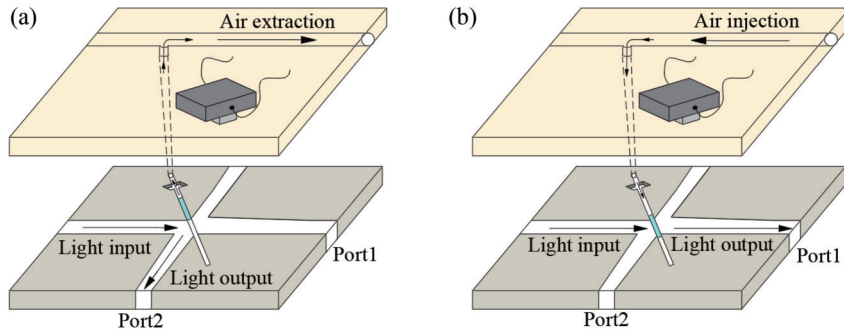


图 2 2×2光开关单元的工作原理图。(a)空气抽离,光发生全反射;(b)空气注入,光直通

Fig. 2 Working principle diagrams of 2×2 optical switch units. (a) Air is extracted and light is fully reflected; (b) air is injected and light passes through microchannel

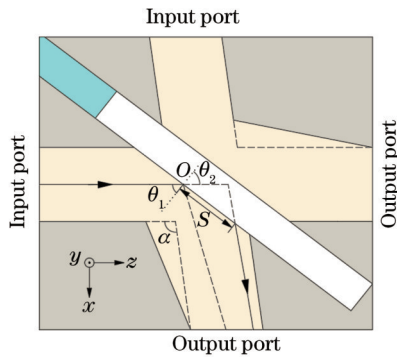


图 3 波导交叉口剖面图

Fig. 3 Waveguide intersecting zone

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1, \cos \theta_2 = i \sqrt{\frac{n_1^2 \sin^2 \theta_1}{n_2^2} - 1} \quad (3)$$

若条形波导交叉处对应的微流道内是空气,则 $n_2=1$ 。设条形波导折射率 n_1 为 1.498,则全反射临界角 θ_c 为

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1.498}\right) = 41.8^\circ \quad (4)$$

为使入射角 θ_1 大于临界角 θ_c ,实现全反射,输入、输出波导的夹角 α 应满足

$$\alpha > 2\theta_c = 83.6^\circ \quad (5)$$

将式(3)代入式(2),得到

$$E_2 = E_2 \exp\left[-k_2 z \left(\frac{n_1^2 \sin^2 \theta_1}{n_2^2} - 1\right)^{1/2}\right] \times \exp[i(k_2 x \sin \theta_1 - \omega t)] \quad (6)$$

由式(6)可知,反射光波穿透微流道界面一定深度,称之为倏逝波隧道效应。并且倏逝波还会沿表面传播一段距离,称之为古斯-汉欣(Goos-Hanchen)位移^[22]。倏逝波的穿透深度是光波振幅衰减到界面振幅的 $1/e$ 时的深度^[23]。由式(6)可得倏逝波的穿透深度 z_0 为

$$z_0 = \frac{\lambda_1}{2\pi \sqrt{\sin^2 \theta_1 - n_2^2/n_1^2}} \quad (7)$$

式中: λ_1 为入射光的波长。当入射光电场为横电波

(TE波)时,古斯-汉欣位移可表示为

$$S = \frac{2\sin \theta_1}{k_1 (n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2)^{1/2}} \quad (8)$$

当入射角 $\theta_1 = 45^\circ$ 、波长为 1550 nm 时,倏逝波的穿透深度与古斯-汉欣位移分别是 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $1.00 \mu\text{m}$ 。微流道宽度应大于倏逝波的穿透深度,即 $1.06 \mu\text{m}$ 。如果条形波导垂直交叉,即 $\alpha = 90^\circ$,由于古斯-汉欣位移的存在,图 3 中输入波导下侧部分光反射后会偏离输出波导而造成光损耗。如果选用直波导,条形波导交叉口不拓宽,则输入波导上侧部分光可能被反射出输出波导外,故这里选用斜波导与半拉锥结构解决以上问题。

4 光开关阵列的传输特性

本文提出两种光开关阵列的拓扑结构,给出最优路径选择方法,然后基于上述理论,利用 FDTD Solutions 软件对光开关阵列的三维光场传输特性进行讨论分析,并进行结构优化。

4.1 光开关阵列的拓扑结构与最优路径选择

图 4 是两种光开关阵列的拓扑结构。图 4(a) 是部分阻塞型光开关阵列,其中上侧和左侧端口 ($1' \sim N'$) 是输入端,右侧和下侧端口 ($1 \sim N$) 为输出端。图 4(b) 是完全无阻塞型光开关阵列,其左侧端口 ($1' \sim N'$) 是输入端,右侧端口 ($1 \sim N$) 为输出端。部分阻塞型光开关阵列^[24] 有部分光路是阻塞的。如图 4(a) 所示,光在微流道表面不能向上或向左反射,因而上侧输入端口的光不能从它左下侧的输出端口输出,左侧输入端口的光不能从它右上方的输出端口输出。例如,端口 2' 的光不能从端口 N 输出,端口 N' 的光不能从端口 2 输出。图 4(b) 是完全非阻塞型开关阵列^[25],通过增加一些开关单元来实现开关阵列完全无阻塞输出。部分阻塞型开关阵列相对于完全无阻塞型开关阵列而言,所需开关单元更少,较少的开关级联可以减小串扰、损耗和功耗,成本更低,但有阻塞性问题。实际应用中可以根据对系统的阻塞性要求高低以及综合考虑开关性能、成本来选择合适的光开关阵列阻塞类型。两种结构均支持多光路同时传输。表 1 显示了两种 $N \times N$ 光开关阵列的开关单元数与单条光路反射的最多或最少次数。

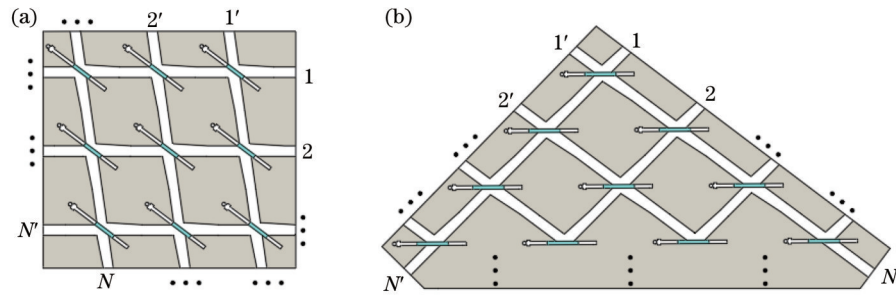


图 4 $N \times N$ 光开关阵列的拓扑结构。(a) 部分阻塞型; (b) 完全无阻塞型

Fig. 4 Topology structures of $N \times N$ optical switch array. (a) Partial blocking type; (b) complete non-blocking type

表 1 两种光开关阵列的特点

Table 1 Characteristics of two types of optical switch arrays

Optical switch array	Number of switch units	Maximum reflection number of a path	Minimum reflection number of a path
Partial blocking type	$(N/2)^2$	$N-1$	0
Complete non-blocking type	$N(N-1)/2$	$2N-3$	0

从一个输入端口到某个输出端口通常有多种路径。光损耗与路径长短、反射次数有关。最佳路径选择首先遵循最短路径原则。

以 6×6 部分阻塞型光开关阵列为例。设微流道宽度为 $2.5 \mu\text{m}$, 输入与输出条形波导的夹角为 94° , 波导层尺寸为 $180 \mu\text{m} \times 180 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, 入射光波长为

1550 nm , 入射功率为 1 mW 。设光从端口 $4'$ 入射、端口 4 出射, 选取分别反射 1、3、5 次的 3 条路径, 如图 5 所示。表 2 给出了这 3 条路径的功率传输效率。结果显示: 反射次数越多, 功率传输效率越低 (即光能量损耗越大)。因而, $N \times N$ 光开关阵列的最优路径应尽量选择反射次数少且最短的路径。

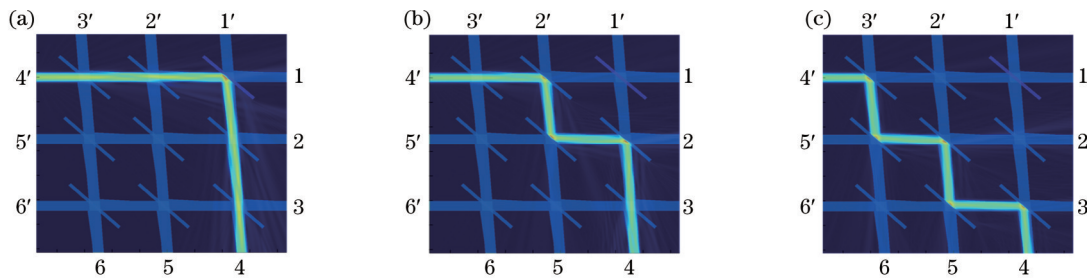


图 5 6×6 光开关阵列的光传输路径。(a) 反射次数为 1 次; (b) 反射次数为 3 次; (c) 反射次数为 5 次

Fig. 5 Optical transmission paths of 6×6 optical switch array. (a) Reflection number is 1; (b) reflection number is 3; (c) reflection number is 5

表 2 不同反射次数对应的功率传输效率

Table 2 Power transmission efficiencies for different reflection numbers

Reflection number	1	3	5
Power transmission efficiency / %	86.9	82.0	79.4

所提两种拓扑结构的光开关阵列中, 光传播路径有 3 种情况: 沿直线传播 (无反射)、至少改变 1 次方向 (反射 1 次) 和至少改变 2 次方向 (反射 2 次)。若多条光路交叉时无反射/透射矛盾, 最佳路径最多反射 2 次。

当 $N \times N$ 光开关阵列中有多条光路交叉传输时, 可能存在如下情形: 对于某个波导交叉口, 一条光路需要直通, 另一条光路需要反射, 结果其中一条光路不得不

改变原有的最佳路径, 增加反射次数以到达预定输出端口。如图 6(a) 所示的部分阻塞型 4×4 开关阵列中, 光从端口 $3'$ 传播到端口 3 ($3' \rightarrow 3$) 的最优路径只需要反射一次。若同时存在 $2' \rightarrow 1$ 光路, 则 $3' \rightarrow 3$ 光路需要改变原来的最佳路径, 经历三次反射, 如图 6(b) 所示。完全无阻塞型的 4×4 开关阵列也有类似情形, 如图 6(c)、(d) 所示。

4.2 开关阵列的传输特性与结构优化

光开关阵列的波导层采用由溶胶-凝胶法制备的 $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$ 复合材料, 通过改变 ZrO_2 的含量可改变复合材料的折射率^[26]。条形波导和周围包层的折射率分别为 1.498 和 1.455。液体采用折射率为 1.498 的苯基甲基硅油。由于波导是非双折射材料且尺寸很小, 并且全反射不改变偏振性又无色差, 因此该光开关阵列

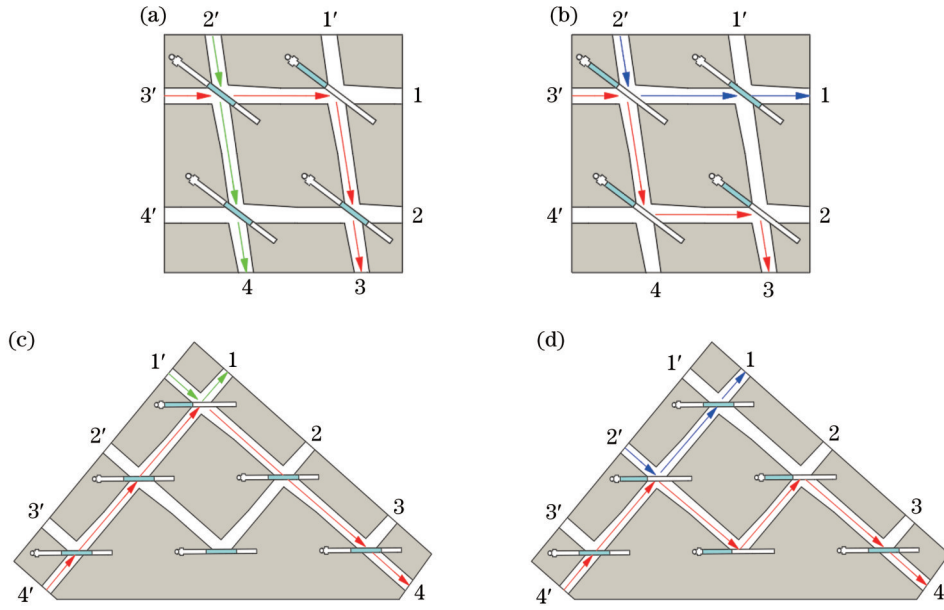


图 6 光路交叉的影响。(a) $3' \rightarrow 3$ 光路只反射一次; (b) $3' \rightarrow 3$ 光路需反射三次; (c) $4' \rightarrow 4$ 光路只反射一次; (d) $4' \rightarrow 4$ 光路需反射三次
 Fig. 6 Effect of optical path crossing. (a) Light path $3' \rightarrow 3$ has only one reflection; (b) light path $3' \rightarrow 3$ has three reflections; (c) light path $4' \rightarrow 4$ has only one reflection; (d) light path $4' \rightarrow 4$ has three reflections

的偏振相关性损耗可以忽略,且适合宽波带操作(从可见光到近红外波段)。

以 4×4 部分阻塞型开关阵列为例,波导层的尺寸为 $124 \mu\text{m} \times 124 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 。设入射光波长为

1550 nm,输入功率为 1 mW。如图 7 所示:若光从端口 $3'$ 输入,则光可从所有输出端口输出;若光从端口 $4'$ 输入,则光只能从端口 $2 \sim 4$ 输出。光从输入端口 $1'$ 和 $2'$ 输入时的情况类似。

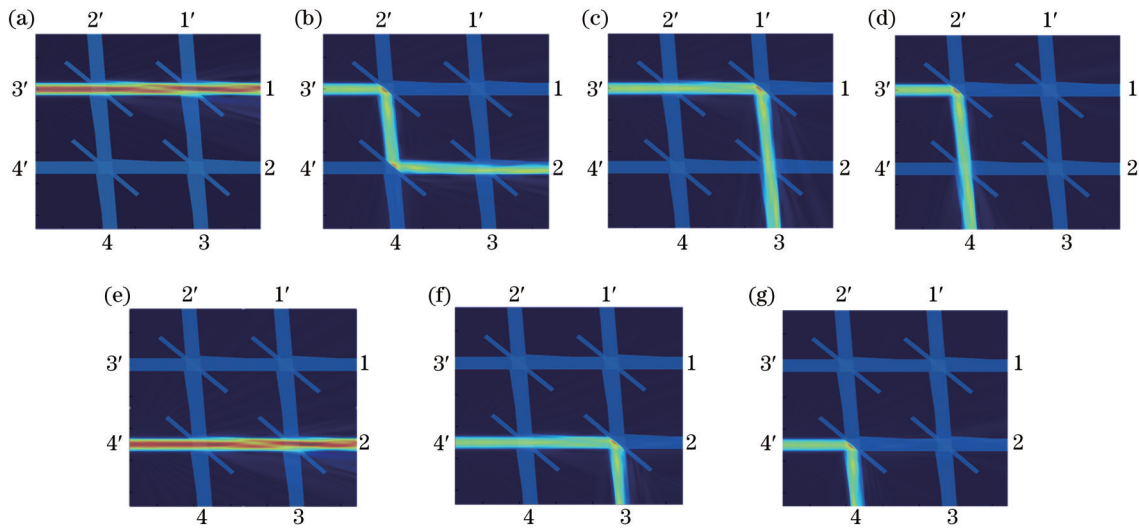


图 7 4×4 部分阻塞型开关阵列的最佳路径。(a)~(d) 输入端口是 $3'$; (e)~(g) 输入端口是 $4'$
 Fig. 7 Optimal paths for 4×4 partially blocked switch array. (a)~(d) Input port is $3'$; (e)~(g) input port is $4'$

图 8 是 4×4 开关阵列在不同波导夹角时的功率传输效率,其中 $P_{3' \rightarrow 1}$ 表示光从端口 $3'$ 传输到端口 1 的光功率传输效率,其他图例中的符号定义类同。由图 8 可见,斜波导夹角对直通路程的功率传输效率 ($P_{3' \rightarrow 1}$ 和 $P_{4' \rightarrow 2}$) 几乎没有影响,但是对反射路径的功率传输效率影响大。随着波导夹角逐渐增加,反射路径的功率传输效率先提高再缓慢下降,在 94° 达到最

大值。因而最佳波导夹角为 94° 。

微流道宽度对光开关阵列的传输特性也有较大的影响。图 9 为 4×4 光开关阵列对应不同微流道宽度的功率传输效率和最大串扰,其中波导夹角取最佳值 94° ,三条路径分别是直通路程 ($3' \rightarrow 1$)、一次反射路径 ($3' \rightarrow 3$) 和两次反射路径 ($3' \rightarrow 2$)。

如图 9 所示,随着微流道宽度的增加,直通路程的

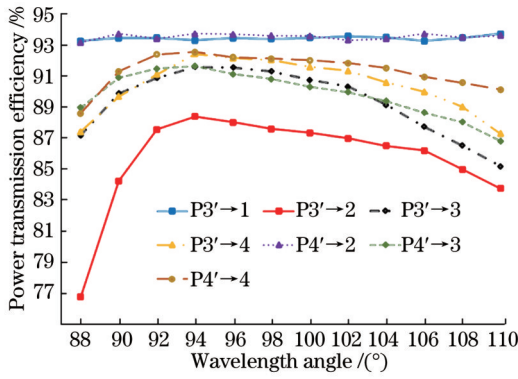


图 8 不同波导夹角的功率传输效率(微流道的宽度为 2.5 μm)
Fig. 8 Power transmission efficiency of different waveguide angles (microchannel width is 2.5 μm)

功率传输效率与串扰缓慢下降,但变化很小。其原因在于:直通路径的损耗主要来源于波导交叉口的光泄漏以及材料对光的吸收,二者受微流道宽度的影响比较小。而反射路径的功率传输效率与串扰受微流道宽度的影响比较大。如图 9(a)所示:当微流道宽度从 1.0 μm 逐渐增加时,反射路径的传输效率先提高后降低,在 2.5 μm 处达到最大值。光从某个端口输出时,在其他输出端口有串扰。图 9(b)显示了三条路径在各个输出端口的最大串扰。当微流道宽度从 1.0 μm 逐渐增加到 2.5 μm 时,反射路径的串扰急剧减小。之后随着微流道宽度的增加,反射路径的串扰变化趋于平缓。综合考虑传输效率和串扰,最佳微流道宽度选为 2.5 μm。

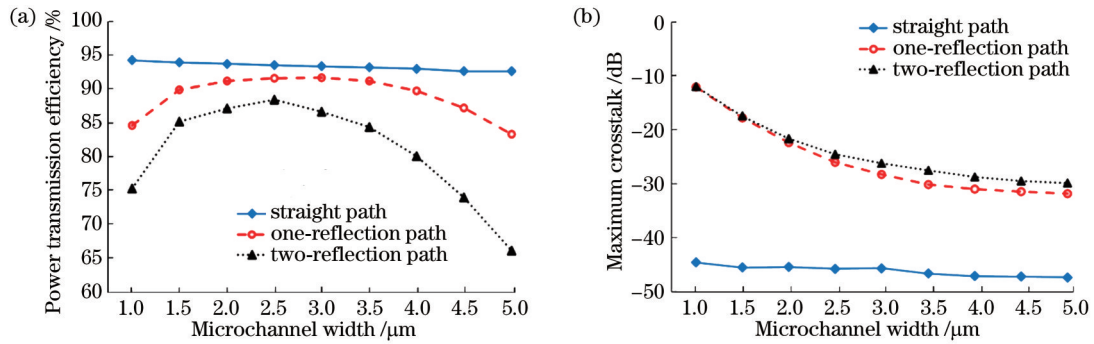


图 9 不同微流道宽度对应的功率传输效率和最大串扰。(a)功率传输效率;(b)各输出端口的最大串扰
Fig. 9 Power transmission efficiency and maximum crosstalk for different microchannel widths. (a) Power transmission efficiency; (b) maximum crosstalk of output ports

由图 9 可知,两次反射路径比一次反射和直通路径的损耗大,传输效率低。本文以两次反射路径为例分析光开关阵列中光的传输损耗特性。当微流道比较

窄时,倏逝波的光学隧道效应导致反射路径有较多的光透过微流道而损耗,如图 10(a)所示。当微流道宽度小于 2.5 μm 时,反射路径的损耗主要来源于倏逝波

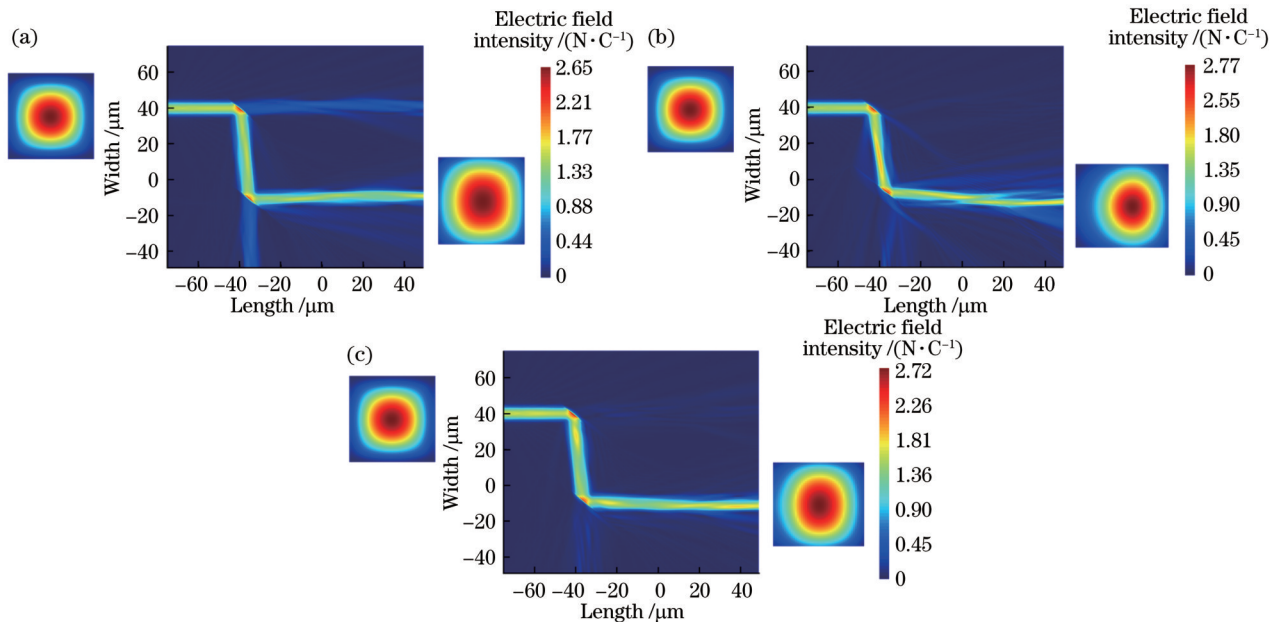


图 10 光开关阵列的光场分布。(a)微流道宽度为 1.0 μm;(b)微流道宽度为 5.0 μm;(c)微流道宽度为 2.5 μm
Fig. 10 Optical field distributions of optical switch array. (a) Microchannel width is 1.0 μm; (b) microchannel width is 5.0 μm; (c) microchannel width is 2.5 μm.

的微流道透射损耗。当微流道宽度从 $1.0\ \mu\text{m}$ 逐渐增加到 $2.5\ \mu\text{m}$ 时,透射损耗逐渐减小,所以图 9 中功率传输效率逐渐增加。但是,当微流道比较宽 ($>2.5\ \mu\text{m}$),如图 10(b)所示,有部分光被反射出输出波导,同时波导交叉口光泄漏也随之增加,因而损耗又逐渐加大。所以图 9 中微流道宽度大于 $2.5\ \mu\text{m}$ 后,反射路径的传输效率又逐渐减小。 $2.5\ \mu\text{m}$ 最佳微流道宽度对应的光场分布如图 10(c)所示,此时光场中杂

散光显著较少,各种光损耗相对较小。

优化后,微流道宽度为 $2.5\ \mu\text{m}$ 并且波导夹角取 94° 时, 4×4 光开关阵列的光学性能如表 3 和表 4 所示。插入损耗和串扰在直通路最小而在两次反射路径最大。入射光波长为 $1550\ \text{nm}$ 时, 4×4 光开关阵列的插入损耗为 $0.28\ \text{dB}\sim 0.54\ \text{dB}$,最大串扰为 $-43.5\ \text{dB}\sim -23.2\ \text{dB}$ 。 4×4 光开关阵列的插入损耗和串扰均远小于一般光开关阵列。

表 3 4×4 光开关阵列的光学性能(输入端口为 $3'$)

Table 3 Optical performance of 4×4 optical switch array (input port is $3'$)

Output port	1 (straight path)	2 (two reflections)	3 (one reflection)	4 (one reflection)
Power transmission efficiency /%	93.3	88.4	91.6	92.4
Insertion loss /dB	0.30	0.54	0.38	0.34
Maximum crosstalk /dB	-43.5	-23.2	-26.6	-29.9

表 4 4×4 光开关阵列的光学性能,其中输入端口为 $4'$

Table 4 Optical performance of 4×4 optical switch array, where the input port is $4'$

Output port	2 (straight path)	3 (one reflection)	4 (one reflection)
Power transmission efficiency /%	93.7	91.6	92.5
Insertion loss /dB	0.28	0.38	0.34
Maximum crosstalk /dB	-40.2	-26.4	-28.6

5 结 论

提出一种基于气压驱动的 $N\times N$ 微流控光开关阵列,该结构具有可控性好、结构简单、偏振相关性损耗可忽略、插入损耗和串扰小、宽波带的优点。给出了光开关阵列的两种拓扑结构,并讨论了 $N\times N$ 光开关阵列的最佳路径和光传输特性,优化了结构。研究结果表明:在 $1550\ \text{nm}$ 波长处,最佳波导夹角和微流道宽度分别为 94° 和 $2.5\ \mu\text{m}$,其中 4×4 光开关阵列的插入损耗为 $0.28\ \text{dB}\sim 0.54\ \text{dB}$,最大串扰为 $-43.5\ \text{dB}\sim -23.2\ \text{dB}$ 。一般微流控光开关由于结构与微流体驱动模式的存在,很难集成光开关阵列。本文实现了 $N\times N$ 微流控光开关阵列,同时解决了一般光开关阵列中普遍存在的插入损耗和串扰大的问题。

参 考 文 献

- [1] Soref R. The past, present, and future of silicon photonics[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(6): 1678-1687.
- [2] Nikolova D, Rumley S, Calhoun D, et al. Scaling silicon photonic switch fabrics for data center interconnection networks[J]. Optics Express, 2015, 23(2): 1159-1175.
- [3] Rumley S, Nikolova D, Hendry R, et al. Silicon photonics for exascale systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(3): 547-562.
- [4] 何剑锋, 黄德修. 全光网络中的光开关技术[J]. 飞通光

电子技术, 2002(1): 23-30.

He J F, Huang D X. Optical switch technologies in all optical network[J]. Photon Technology, 2002(1): 23-30.

- [5] Wang Y D, Liu H X, Wang S L, et al. A waveguide-integrated graphene-based subwavelength electro-optic switch at $1550\ \text{nm}$ [J]. Optics Communications, 2021, 495: 127121.
- [6] Zhang L, Zhang X M, Song J Y, et al. Effects of device structure on thermo-optic switch and design optimization [J]. Optik, 2020, 201: 163390.
- [7] Okazeri K, Muraoka K, Shoji Y, et al. Self-holding magneto-optical switch integrated with thin-film magnet [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(4): 371-374.
- [8] Plander I, Stepanovsky M. Advanced three-dimensional MEMS photonic cross-connect switch for nonblocking all-optical networks[J]. Optical Switching and Networking, 2016, 22: 42-53.
- [9] Nakamura F, Asakura H, Suzuki K, et al. Silicon based $1\times M$ wavelength selective switch using arrayed waveguide gratings with fold-back waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(8): 2413-2420.
- [10] Ueda Y, Koyama N, Kambayashi K, et al. 4×4 InAlGaAs/InAlAs optical-switch fabric by cascading Mach-Zehnder interferometer-type optical switches with low-power and low-polarization-dependent operation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(9): 757-759.
- [11] 孙健, 吴远大, 安俊明, 等. 基于悬浮波导的低功耗聚合物热光开关[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0301008. Sun J, Wu Y D, An J M, et al. Polymer thermo-optic switch with low-power consumption based on suspended waveguide[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0301008.
- [12] Xing J J, Zhou P J, Gong Y H, et al. Nonblocking 4×4 silicon electro-optic switch matrix with low power consumption[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(13): 1434-1436.
- [13] Song Q Q, Chen K X, Wang L F, et al. Low-power total internal reflection thermo-optic switch based on

- hybrid SiON-polymer X-junction waveguides[J]. Applied Optics, 2018, 57(33): 9809-9813.
- [14] Yang Y, Liu A Q, Chin L K, et al. Optofluidic waveguide as a transformation optics device for lightwave bending and manipulation[J]. Nature Communications, 2012, 3: 651.
- [15] Li L, Xiao L, Wang J H, et al. Movable electrowetting optofluidic lens for optical axial scanning in microscopy [J]. Opto-Electronic Advances, 2019, 2(2): 180025.
- [16] Yuan R Y, Luo L, Wang J H, et al. 1×2 optofluidic switch for optical beam routing and variable power distribution[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(18): 1629-1632.
- [17] Murade C U, Oh J M, van den Ende D, et al. Electrowetting driven optical switch and tunable aperture [J]. Optics Express, 2011, 19(16): 15525-15531.
- [18] 姚黎晓, 王琼华, 刘超, 等. 基于液体棱镜的光开关[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0616002.
Yao L X, Wang Q H, Liu C, et al. Optical switch based on electrowetting liquid prism[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0616002.
- [19] 陈陶, 梁忠诚, 黄勇林, 等. 一种基于微流控技术的光开关阵列设计与研制[J]. 光电子·激光, 2010, 21(11): 1605-1608.
Chen T, Liang Z C, Huang Y L, et al. Design and fabrication of an novel plane optical switch array device based on optofluidic technique[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2010, 21(11): 1605-1608.
- [20] 宋海龙, 汪勇, 李昊东, 等. 压电材料及压电效应的应用[J]. 硅谷, 2014, 7(23): 107-108.
Song H L, Wang Y, Li H D, et al. Application of piezoelectric materials and piezoelectric effects[J]. Silicon Valley, 2014, 7(23): 107-108.
- [21] 李建聪, 罗佳雄, 张宏炫, 等. 高效率光导开关光学系统的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 1122001.
Li J C, Luo J X, Zhang H X, et al. Design of high-efficiency photoconductive switch optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(11): 1122001.
- [22] 鄢腾奎, 梁斌明, 蒋强, 等. 古斯-汉欣(Goos-Hänchen)位移研究综述[J]. 光学仪器, 2014, 36(1): 90-94.
Yan T K, Liang B M, Jiang Q, et al. A research review of the Goos-Hänchen shift[J]. Optical Instruments, 2014, 36(1): 90-94.
- [23] 李林, 肖循. 光的全反射中倏逝波的研究[J]. 武汉科技学院学报, 2006, 19(12): 37-39.
Li L, Xiao X. Study on evanescent wave in total reflection of light[J]. Journal of Wuhan University of Science and Engineering, 2006, 19(12): 37-39.
- [24] 邢斌, 郭丽君, 齐琳. SOI 4×4 严格阻塞型开关阵列与部分阻塞型开关阵列的比较[J]. 电子技术与软件工程, 2017(1): 122.
Xing B, Guo L J, Qi L. SOI 4×4 strictly blocking switching array compared with partially blocking switching array[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2017(1): 122.
- [25] Chen Q S, Zhang F F, Ji R Q, et al. Universal method for constructing N-port non-blocking optical router based on 2×2 optical switch for photonic networks-on-chip[J]. Optics Express, 2014, 22(10): 12614-12627.
- [26] 徐键, 夏海平, 张约品, 等. 有机-无机复合 ZrO_2 - SiO_2 平面光波导[J]. 光学学报, 2005, 25(4): 506-510.
Xu J, Xia H P, Zhang Y P, et al. Organic-inorganic hybrid ZrO_2 - SiO_2 planar waveguides[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(4): 506-510.