

硅基热光、电光、全光开关及其阵列的研究进展*

李显尧[†] 俞育德 余金中

(中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室 北京 100083)

2012-06-07 收到

[†] Email: xianyaoli@semi.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20130405

Thermo-optic, electro-optic, and all-optical switches and arrays

LI Xian-Yao[†] YU Yu-De YU Jin-Zhong

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

摘要 光开关在实现高速信息互连中扮演着重要的角色,受到人们的广泛关注。随着器件结构的不断创新以及半导体加工技术的不断改进,光开关的发展趋向于低功耗、高速和易集成等特点。文章介绍了功耗仅为 $540\mu\text{W}$ 的热光开关,响应时间为 4ns 的电光开关和响应时间为 25ps 的全光开关,重点分析了这三种开关中存在的问题,并提出了解决方法,同时还探讨了开关在阵列化时应考虑的主要问题。

关键词 光开关, 硅光子学, 绝缘层上的硅, 光子集成

Abstract Recently, much attention has been focussed on optical switches, which play a critical role in high speed data transmission. With the innovations in device design and fabrication, it is now possible to produce optical switches that consume low power, while being high speed and easy to integrate. In this paper, a thermo-optic switch with ultra-low power as low as $540\mu\text{W}$, an ultra-fast electro-optic switch, and an all-optical switch with response times as fast as 4ns and 25ps , respectively, are first reviewed. Emphasis is put on the analysis and solutions to the problems involved. The main considerations in building a switch array are then explored and the future trends of optical switches envisaged.

Keywords optical switch, silicon photonics, silicon-on-insulator(SOI), photonic integration

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB301701)、国家自然科学基金(批准号: 60877036; 61107048)资助项目; 中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KG CX2-EW-102)

1 引言

1947年,贝尔实验室的肖克莱研制出了世界上首个半导体晶体管。2009年,英特尔公司发布世界上集成度最高的微处理芯片,该芯片集成了数量超过13亿个晶体管。半个多世纪以来,微电子技术的发展将人类文明带入了信息化时代。计算机在信息化的发展中扮演着重要的角色,目前它已被广泛应用于国民经济和国防建设等领域,并在我们的日常生活中发挥着不可或缺的作用。中央处理器(CPU)是组成计算机的核心单元之一。人们对计算机性能要求越来越高,促使CPU内部的芯片朝着高集成度、高复杂性方面发展,以致于芯片中用于信号互连的金属引线的间距越来越小。此时,不同信道中信号间串扰加剧,器件功耗增大,电阻电容(RC)时延问题突出,使得基于金属引线的电互连在芯片性能提升上遇到了“瓶颈”。

为了解决电互连的“瓶颈”问题,人们需要寻求一种新的信息载体,光便成为首选对象。基于光的互连其优势在于:光是一种高频电磁波,利用它作为载波,可实现信号的高速调制;光子的运动速度远远大于电子,在互连中信号的时延非常小;光在空间中独立传播,不同频率的信号间不存在串扰,也不受外界电磁干扰。因此光互连是一种前景光明的解决

方案。硅是成熟的电子学材料,已广泛应用于芯片内电路的大规模集成。硅还是理想的光学材料,对通信波段的光几乎完全透明。目前科研人员提出硅基光互连的设想,采用硅互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺在硅材料上同时制作光子和电子器件,以实现小型化、低成本和高性能的大规模光电集成回路,最终实现高速、宽带的互连^[1, 2]。

光开关是硅基光互连中的核心器件,它在光信息交换和信号处理中有广泛的应用。利用半导体材料的热光、电光等效应,可以对光在波导器件中的传输路径进行控制。对硅而言,主要采用热光效应和等离子色散效应,与之对应的开关单元分别有热光、电光和全光开关。本文对近年来三种光开关单元的研究进展进行了概述与比较,并探讨了开关阵列研究中的主要问题。

2 光开关单元

硅晶体结构呈中心反演对称,因此不具有线性电光效应,并且克尔效应也非常微弱,无法利用直接电光效应来获得高效高速的调制^[3]。相比而言,热光效应和等离子体色散效应是实现调制的两种有效方法。基于以上两种效应,目前光开关主要有热光、电光和全光三种。硅基光开关与调制器的工作原理类似,但从功能上而言,开关要实现输入光信号通断的严格控制,若采用干

涉型器件结构，开关所需的光相位变化要比调制器多。

2.1 热光开关

热光开关的工作机理是热光效应，即在温度 T

发生变化时，材料的折射率 n 也会随之变化。硅有较大的热光系数^[4]，当 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 时，其热光系数为 $dn/dT = 1.84 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$ 。利用热光效应很容易改变材料的有效折射率。但热光效应本质上是一种慢速过程，其响应时间一般为 μs 量级。

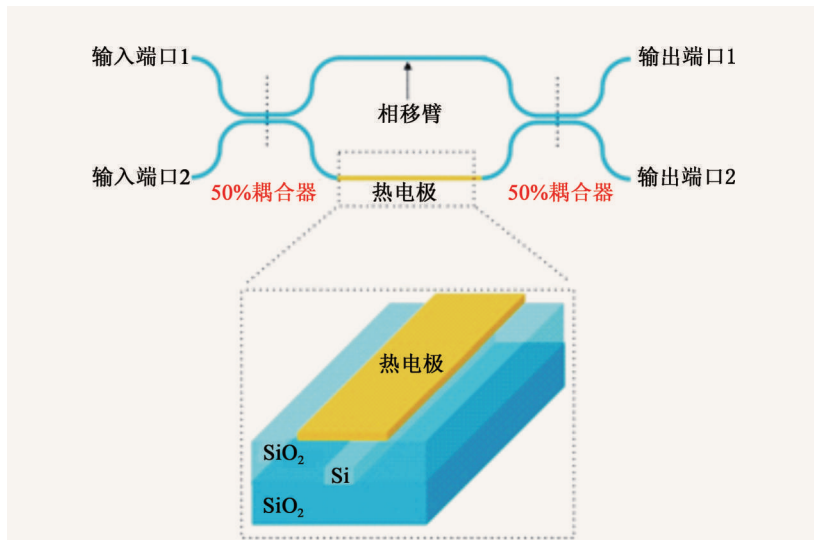


图1 2×2热光开关示意图

典型的 2×2 热光开关如图 1 所示，由两个 50% 分光的耦合器及两个相同长度的臂组成。通常在一臂上制作与之平行的热电极。其工作原理如下：光从端口 1 输入后，通过第一个 50% 分光的耦合器分为强度相同、相位相差为 π 的两束，再经过相同长度的直波导以及第二个 50% 分光的耦合器从端口 2 输出；如果对一臂进行加热，产生 π 的相位差，此时光将从端口 1 输出。因此，通过加热臂可精确地改变光的相位差，严格控制光的输出。

然而，会出现“开不全，关不断”的问题，即两输出端口之间存在明显的串扰，这一直是光开关研究中的难点之一。由于器件制作中存在工艺误差等问题，要实现两开关臂完全均匀地分光，其难度很大。研究者指出^[5]，对于硅基光开关而言，若两臂上的光强度相差 3%—4% 时，输出端之间的串扰将无法小于 -25dB 。针对此问题，文献[5]中采用级联 4 个开关单元的方法，实现了直通态串扰最低为 -50dB ，交叉态串扰最低为 -30dB 的热光开关。其结构如图 2 所示，若开关单元的直通态串扰为 $-x_1\text{dB}$ ，交叉态串扰为 $-x_2\text{dB}$ ，级联后串扰可减小为 $-2x_1\text{dB}$ 和 $-2x_2\text{dB}$ 。需指出的是，此方法是以高功耗为代价，获取低开关串扰。

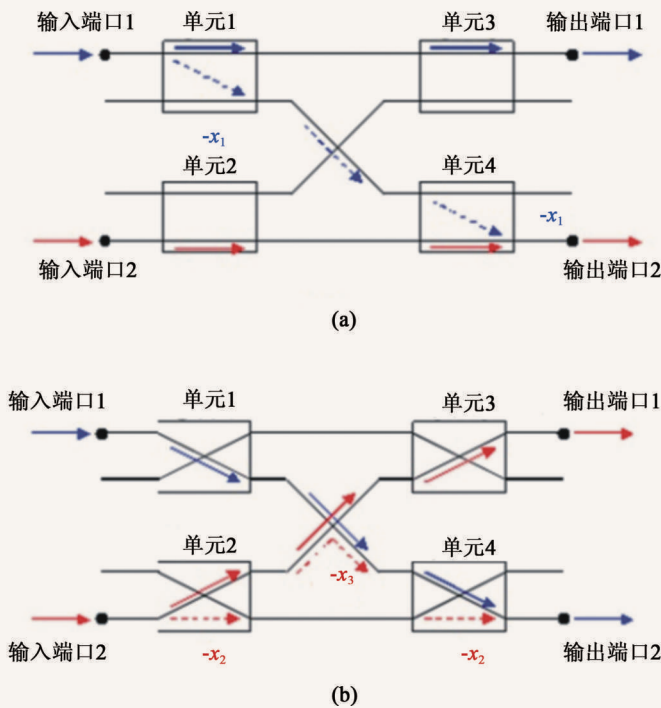


图2 级联后所组成的 2×2 开关单元示意图 (a)直通态；(b)交叉态

降低功耗也是目前开关研究中的热点之一。文献[6]中介绍了一种新颖的热光开关，其功耗仅为传统的1/5，达毫瓦量级，开关时间为14 μ s，其结构如图3所示。与图1中传统的开关结构相比，其功耗降低主要依赖于以下两个方面：一是在保持热电极总长度不变时，将波导折叠成螺旋状可与热场有更多的交叠，提高热的利用率；二是在开关的整体尺寸相同时，折叠波导可增加开关的臂长，使得开关达到 π 相移时所需的有效折射率变化 Δn 减小^[6]。为了进一步减小热光开关的功耗，文献[7]中给出了另一种新颖的设计方案：将加热臂悬空。其结构如图4所示，由于空气导热速度较慢，若将加热臂悬空，则可有效地降低加热臂上的热量流失。采用此方法，他们报道了功耗仅为540 μ W，开关时间为141 μ s的热光开关。需指出的是：在实现光信号“开关”的过程中，热仅改变光相位，并不会造成两臂光强度的变化，因此其消光比和串扰不会退化。

从以上的介绍中可看出，如何有效地减少串扰，降低开关功耗，仍是目前热光开关的研究重点。热光效应是实现光开关的一种有效方法，但其速度较为缓慢(开关时间为 μ s量级)。

2.2 电光开关

硅基电光开关的工作机

理为等离子体色散效应。即在半导体材料中，自由载流子浓度的变化将引起材料折射率和吸收系数的变化。硅材料的等离子体色散效应十分明显，利用该效应目前已实现了最高速率为40Gbps的硅基电光调制器^[8]。1987年，Soref等人利用Kramers—Kronig关系和光吸收谱的实验数据，给出了等离子体色散效应的近似公式^[9]。对于波长为1550nm的光，其表达式为

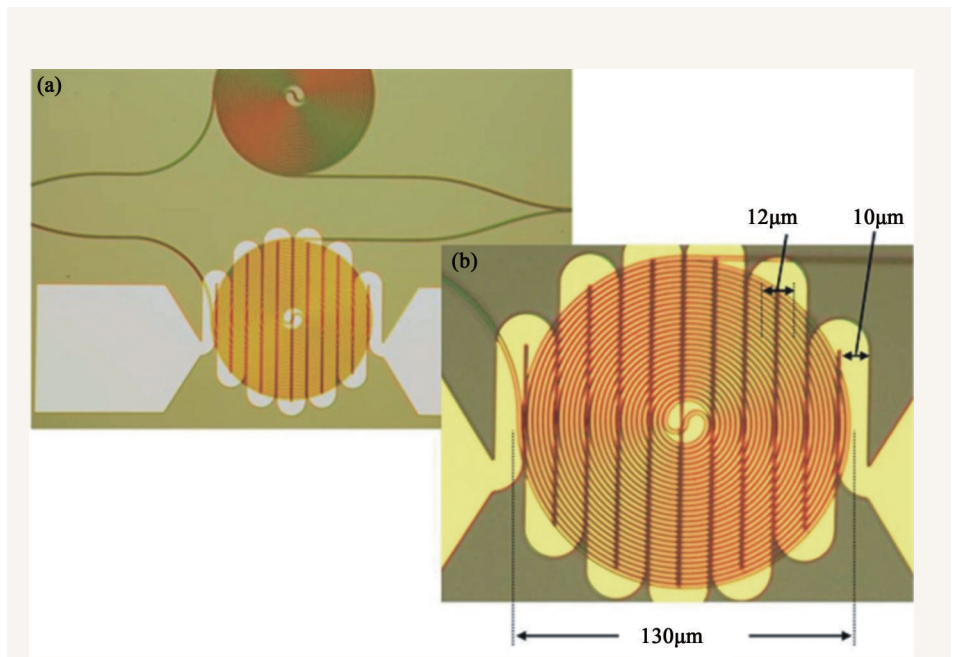


图3 (a) 马赫曾德干涉型热光开关的顶视图，其中两干涉臂为密集环绕成螺旋状的光子线波导；(b)有源波导臂放大示意图^[6]

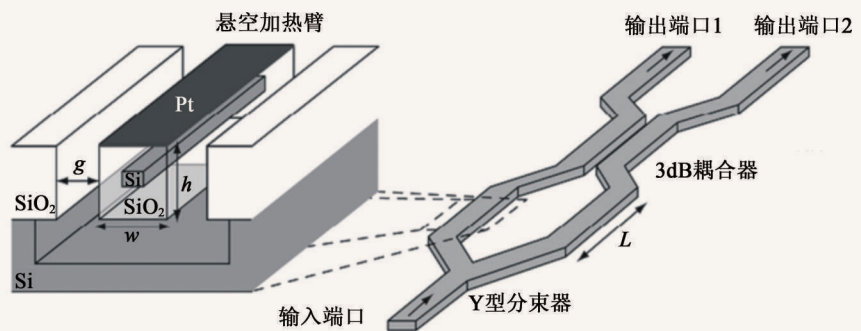


图4 采用绝缘层上的硅悬空波导形成的马赫曾德干涉型热光开关示意图(其中两干涉臂是由SiO₂包裹着的矩形波导悬空后组成，在两臂上沉积金属铂，形成热电极^[7])

$\Delta n = \Delta n_e + \Delta n_h = -8.8 \times 10^{-22} \times \Delta N_e - 8.5 \times 10^{-18} \times (\Delta N_h)^{0.8}$,
 $\Delta \alpha = \Delta \alpha_e + \Delta \alpha_h = 8.5 \times 10^{-18} \times \Delta N_e + 6.0 \times 10^{-18} \times \Delta N_h$,
 其中 Δn 和 $\Delta \alpha$ 分别为自由载流子浓度变化引起的折射率和吸收系数的变化, ΔN_e 和 ΔN_h 分别为电子和空穴浓度的变化, 单位为 cm^{-3} 。由上面的公式可以看出, 当载流子浓度的变化达到 10^{18}cm^{-3} 时, 硅材料折射率的变化值约为 -10^{-3} , 可见硅的等离子体色散效应是实现光调制和开关的一种有效手段。

理想的开关要求实现光信号的完全打开或关断, 其对应的折射率变化很大。实现载流子浓度变化的电学结构主要有 pin, pn 和 mos 三种^[10-12], 其中效率最高的为 pin 型, 适合应用于光开关。其工作原理是: 通过外加正向偏压, 向 i 区(即波导核心区)注入大量载流子, 实现高效的折射率变化。IBM T.J. Watson 研究中心采用 pin 正向注入的方式, 已实现了开关时间小于 4ns, 功耗约为 3mW 的电光开关^[13], 如图 5 所示, 其中 MZI 的臂长为 200 μm 。开关采用了两宽带的 3dB 定向耦合器, 带宽扩大为 110nm, 开关的最差消光比为 -17dB。在此方案中, 当 pin 中注入的电流较大时, i 区发热严重, 造成由注入载流子所致的折射率变化被热光效应部分抵消, 导致开关功耗较大。目前 Kotura 公司给出了一种实现低功耗电光开关的方案^[14]: 同样采用 pin 正向注入的方法, 增加 MZI 臂长, 可减小达到 π 相移时所需注入的载流

子浓度, 降低开关的工作电压和电流, 并且减小 i 区的发热; 将臂环绕成螺旋状, 可有效缩小其尺寸, 提高器件的集成度。利用此方法, 他们实现功耗仅为 0.6mW 的电光开关, 其工作电压为 0.83V, MZI 的臂长为 4mm, 开关时间为 6ns。需指出的是: 通过注入载流子改变光相位的同时, 由于载流子吸收使此臂上的光强度变弱, 因此在实现光信号“开关”时, 消光比和串扰会发生退化。

对于 pin 型电学结构, 材料折射率的变化主要依赖于载流子的扩散和复合。从物理机制上而言, 扩散与复合的过程均较为缓慢, 因此, 目前 pin 型电光开关的速度只达到 ns 量级。与热光开关相比, 电光开关在速度方面占有明显的优势。

2.3 全光开关

硅材料的非线性效应较弱, 利用其实现高速、低功耗的全光开关难度很大, 因此, 与电光开关类似, 硅基全光开关主要采用等离子体色散效应, 结构上一般采用光学微腔, 如微环、微盘和光子晶体微腔等。文献[9]指出, 采用光学微腔的共振效应可增强光对硅材料折射率变化的灵敏度, 降低信号调制和开关所需的功耗。共振效应通常只针对特定频率的光而言, 因此微腔结构会表现出明显的波长选择性。硅基全光开关的输入

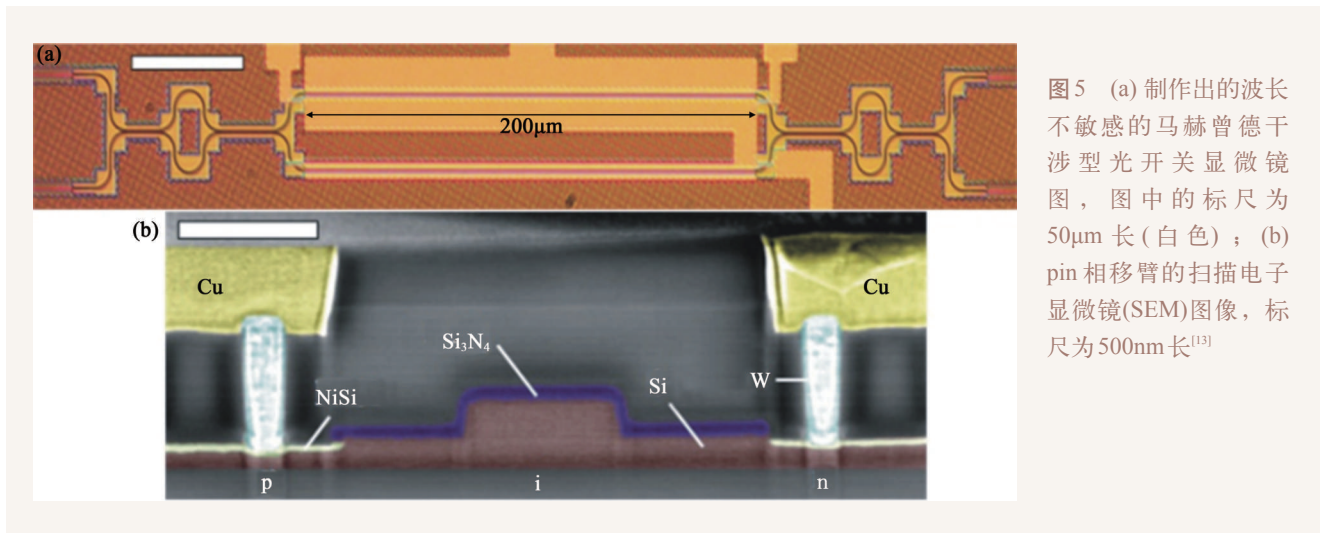


图5 (a)制作出的波长不敏感的马赫曾德干涉型光开关显微镜图, 图中的标尺为 50 μm 长(白色); (b) pin 相移臂的扫描电子显微镜(SEM)图像, 标尺为 500nm 长^[13]

一般由两束光组成(如图7所示): 其中一束用于改变微腔的谐振条件, 其波长位于硅材料的吸收区, 称为抽运光; 另一束光载有信号, 波长位于硅材料透明的通信波段, 为探测光。其工作机理与电光开关类似, 但不同之处在于, 载流子的注入方式主要依赖于抽运光照射硅波导时产生光生载流子。载流子浓度变化所导致材料折射率以及吸收系数变化最终反映为微腔谐振条件变化, 从而对特定波长的光实现开关。

与正向注入的pin型电光开关一样, 全光开关也面临着载流子复合速度较慢所导致的开关速度很慢的问题。为提高全光开关的速度, 可采用离子注入的方法^[15-17], 向硅波导中引入缺陷, 增强载流子的复合几率; 其中文献[15]是利用氧离子注入的方法, 将载流子的复合速度加快后实现了25ps的全光开关。从上面的介绍中可看出, 全光开关与电光开关有诸多相似之处, 因此在如何进一步提高开关性能方面, 两者可相互借鉴。

总之, 热光开关的优点在于: 结构简单, 制作

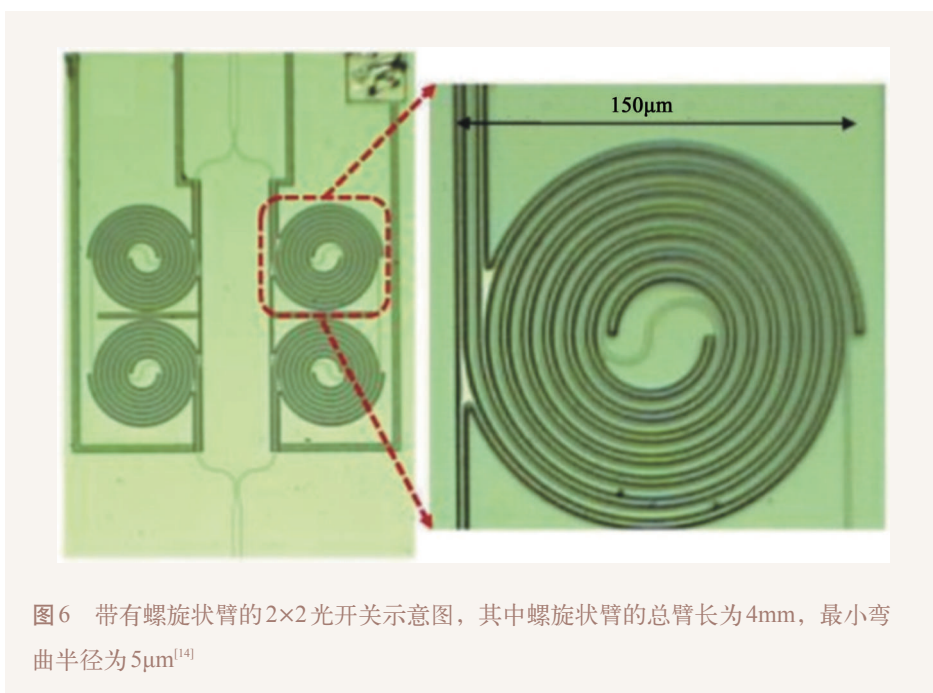


图6 带有螺旋状臂的2×2光开关示意图, 其中螺旋状臂的总臂长为4mm, 最小弯曲半径为5 μm ^[14]

工艺成熟; “开关”过程并不会改变其消光比和串扰特性, 通过优化设计, 容易获得高消光比和低串扰的光开关, 但开关速度较慢。电光开关的优点是: 开关速度快, 与传统的CMOS工艺兼容。但由于“开关”过程中, 消光比和串扰特性会退化, 同时获得快速、高消光比和低串扰的电光开关难度较大。全光开关的速度很快, 但与电光开关类似, 在“开关”过程中, 会伴随着消光比和串扰特性的退化, 而且由于其具有波长选择性, 信号的传输带宽有限。

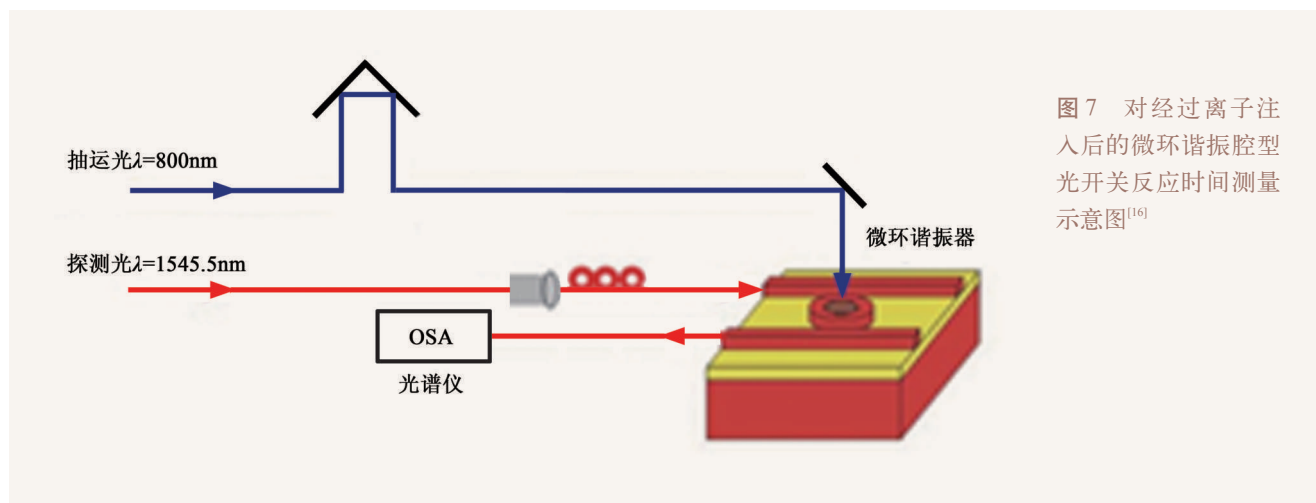


图7 对经过离子注入后的微环谐振腔型光开关反应时间测量示意图^[16]

3 光开关阵列

光开关阵列由开关单元级联而成，目前的开关单元主要有马赫曾德干涉型光开关单元和微环谐振器型光开关单元两种。图 8(a)是马赫曾德干涉型光开关单元，它是由两个 50%分光比的耦合器以及调制臂组成，利用光的干涉效应实现开关；图 8(b)是典型的 2×2 微环谐振器型光开关，它是由交叉波导和两个微环谐振器组成，其工作主要基于单个微环谐振器的波长选择性。两种光开关单元各具优势：马赫曾德型光开关具有波长不敏感特性，适用于高带宽信息传输的场合；而微环谐振器型具有明显的波长选择性，可用于波长路由等场合^[18]。

描述一个开关阵列的特性主要有以下几个方面^[19]：开关单元数目，损耗均匀性，交叉波导数目和阻塞特性。拓扑结构是光开关阵列设计中的核心，它直接决定了开关阵列特性。如一个 8×8 的交叉直通型(crossbar)光开关阵列可实现严格的无阻塞特性，而且无波导的交叉，但其要求的开关单元数目较多(为 64)；拜尼兹(Benes)型开关阵列是一种重排无阻型结构，它所需的开关数目比交叉直通型少，8×8 的开关阵列仅需要 20 个开关单元，但其交叉波导数目要求较多。因此对开关阵列的设计应结合实际，根据需求选择合适的拓扑结构。

香港科技大学近期报道了基于微环谐振器的交叉直通型光开关^[18]，如图 9 所示。其中开关单元由一个 pin 型微环光开关构成，图中的 p⁺ 和 n⁺ 为形成欧姆接触用的重型掺杂区，其开关时间

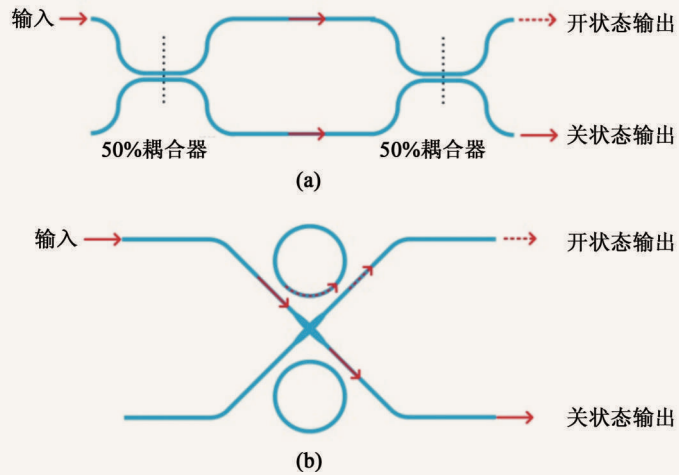


图 8 (a)马赫曾德干涉型光开关单元；(b)微环谐振器型光开关单元

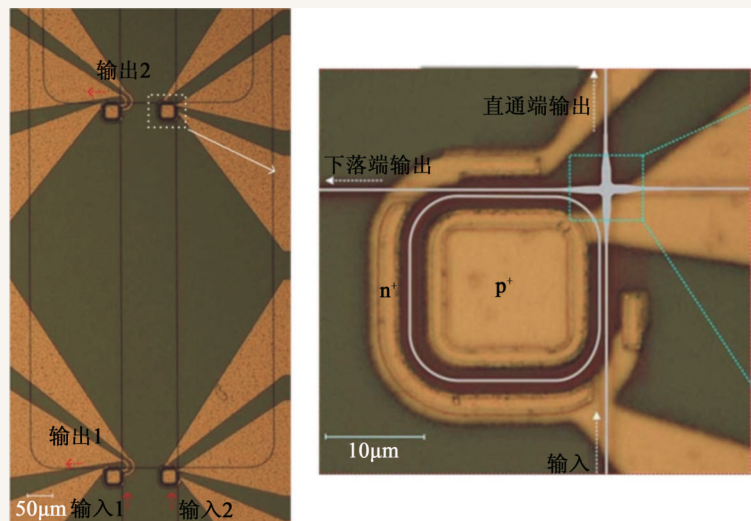
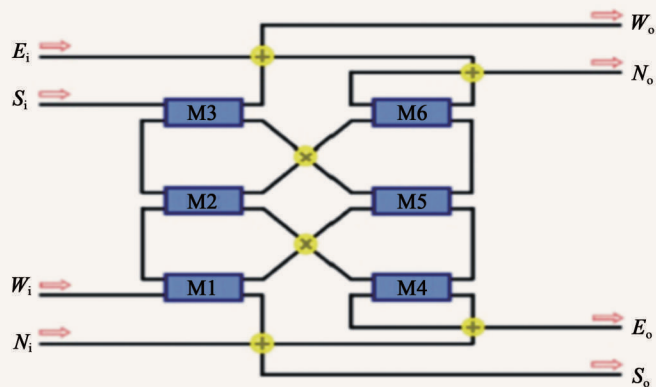


图 9 香港科技大学报道的交叉直通型光开关

仅为 1.2—1.3ns。但采用单个微环的开关结构易受带宽的限制，为了获得更宽的带宽和更好的波长选择性，可采用多环级联的方式^[20, 21]。选用波长不敏感的 2×2 MZI 型光开关也可达到宽带的目的，目前 IBM 公司的研究人员设计了一种新颖的 4×4 开关拓扑结构^[22]，用于实现 CPU 内部核与核之间的互联。如图 10(a)所示，组成此阵列所需的 2×2 MZI 型电光开关单元数目为 6 (M1 至 M6)，支持 12 个互连通道，实现了东西南北 4 个方向上信息的选择性交换。图 10(b)中



(a)

		输入			
		N_i	E_i	S_i	W_i
输出	N_o	×	M6	M3, M5, M6	M1, M5, M6
	E_o	M4	×	M3, M5, M4	M1, M5, M4
	S_o	M4, M2, M1	M6, M2, M1	×	M1
	W_o	M4, M2, M3	M6, M2, M3	M3	×
	S_o	M4, M2, M1	M6, M2, M1	×	M1

(b)

图 10 (a) 4×4 无阻塞型光开关示意图，由 6 个宽谱的 2×2 马赫曾德干涉型光开关单元和 6 个波导交叉结构组成；(b) 路由信息表^[18]

给出了其对应的路由表，从表中可看出该阵列为严格无阻塞型结构，且同一方向的输入端口与输出端口之间不进行通信。

4 结束语

更低串扰、更低功耗、更高开关速度是硅基光开关的发展方向。通过新颖的结构设计，可以有效地降低热光开关的串扰及功耗，优化器件的电学结构，提高载流子的注入及复合速率，从而获得具有更低功耗、更高速率的电光和全光开关。高性能的开关单元是开关阵列化的基础，同时选择或设计合理的拓扑结构对光开关阵列的实用化也至关重要。凭借着丰富的材料来源，成熟的 CMOS 制作工艺，高速、低功耗、易集成的硅基光开关将为未来的光信息交换铺出一条崭新的路。

参考文献

- [1] Haurylau M *et al.* IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12: 1699
- [2] Soref R. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12: 1678
- [3] Reed G *et al.* Nature Photonics, 2010, 4: 518
- [4] Espinola R *et al.* IEEE, Photonics Technology Letters, 2003, 15: 1366
- [5] Shoji Y *et al.* Optics Express, 2010, 18: 9071
- [6] Densmore A *et al.* Optics Express, 2009, 17: 10457
- [7] Sun P, Reano R M. Optics Express, 2010, 18: 8406
- [8] Liu A *et al.* Optics Express, 2007, 15: 660
- [9] Soref R, Bennett B. IEEE Journal of Quantum Electronics. 1987, 23: 123
- [10] Xu Q *et al.* Nature, 2005, 435: 325
- [11] Dong P *et al.* Optics Express, 2009, 17: 22484
- [12] Liu A *et al.* Nature, 2004, 427: 615
- [13] Van Campenhout J *et al.* Optics Express, 2009, 17: 24020
- [14] Dong P *et al.* Optics Express, 2010, 18: 25225
- [15] Liu Y, Tsang H. Optics Letters, 2006, 31: 1714
- [16] Tanabe T *et al.* Applied Physics Letters, 2007, 90: 031115
- [17] Waldow M *et al.* Optics Express, 2008, 16: 7693
- [18] Poon A W *et al.* Proceedings of the IEEE, 2009, 97: 1216
- [19] Papadimitriou G I *et al.* Journal of lightwave technology, 2003, 21: 384
- [20] Chang S J *et al.* IEEE, Photonics Technology Letters, 2008, 20: 1021
- [21] Vlasov Y *et al.* Nature Photonics, 2008, 2: 242
- [22] Yang M *et al.* Optics Express, 2011, 19: 47