光子和光电子集成专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022030902

硅基光开关及阵列研究进展

孙小强，刘崧岳，李鹏飞，尹悦鑫，张大明*

（吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点实验室，长春 130012）

摘　要： 随着网络传输数据的爆炸式增长，传统集成电路芯片面临着难以进一步提升交换速率及继续扩大容量等挑战。相较于传统电子芯片，硅基光子器件具有交换速度快、功耗低、带宽大和与 CMOS 工艺兼容性好等优点，可满足下一代全光交换网络、数据中心和高性能计算光互连的迫切需求，被视为在后摩尔时代突破芯片容量最具前途的解决方案，受到日益广泛关注。文章介绍了硅基光子芯片中光开关单元及阵列的技术原理和发展现状，重点论述了 MZI 型、MRR 型开关单元，以及常见阵列拓扑结构，介绍了近年来大规模光开关阵列的国内外研究进展，讨论了未来硅基光开关及阵列研究中面临的主要问题和解决方法。

关键词： 光互连；硅基光子；光开关；拓扑架构；光开关阵列；集成光子

中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0207－11

Review on Silicon-based Optical Switch and Switch Array

SUN Xiaoqiang，LIU Songyue，LI Pengfei，YIN Yuexin，ZHANG Daming

（State Key Lab. of Integrated Optoelectronics，School of Electronic Science and Engin.，Jilin University，Changchun 130012，CHN）

Abstract： With the explosive growth of network transmission data，traditional integrated circuit is facing difficulties of further increasing exchange rate and expanding chip capacity. Compared with traditional electronic chips，silicon photonic devices present the advantages of high speed，low power consumption，larger bandwidth，lower cost，good compatibility with CMOS process，thus they show great potentials to meet the requirements of next-generation all-optical switching networks，the optical interconnection for data centers and the high-performance computing. Therefore，silicon photonics is widely recognized as one of the most promising solutions to break through the bottleneck of capacity in the post-Moore era. In this work，technical principles of silicon-based optical switch and switch arrays are introduced，especially MZI and MRR switch units and the construction strategy of switch array. Progresses and proposal of promising solutions to the challenges of silicon optical switches are reviewed.

Key words： optical interconnection；silicon light；optical switch；topology framework；optical switch array；integrated photonics

0　引言

近年来，互联网通信数据容量以每年 50%～60%的速度迅速增长，人们对带宽的需求也越来越大，互联网信息传输与处理面临越来越高的容量需求[1-3]，这使得电交换的“瓶颈”愈发凸显，即通信带宽和互连密度、网络节点电交换设备耗电量均接近许可极限。同时，纳米工艺下电子的量子效应也更加明显，器件集成度的进一步提升也面临巨大挑战。如中国移动省际骨干传送网数据显示，业务量的迅猛增长导致各类传输设备单机架功耗迅猛增长，单机架(600×6 000)满配功耗最高已经突破了 20 000 W 大关，在大量消耗电能的同时，也带来了极其严重的

收稿日期：2022－03－09.

基金项目：国家重点研发计划项目(2019YFB2203001).

* **通信作者：**张大明　**E-mail：**zhangdm@jlu.edu.cn

散热问题[4]。由于电交换设备耗电量的 80% 源自光电/电光转换和电交换开关，因此低功耗光交换技术成为一种有效解决方案。自 1966 年华裔科学家高锟首次提出光纤概念以来[5]，在远程通信领域，光纤通信已经基本取代了传统的电通信。相比较电信号传输，光通信具有传输带宽大、抗电磁干扰能力强、互联密度高、功耗小和成本低等优点[6]，吸引了越来越多研究人员的关注。

随着数据传输量的增加，处理器芯片也朝着多核、高集成的方向发展。芯片之间和芯片内核之间的数据传输对带宽、速率和功耗都提出了更高的要求，相比较电互连的延时，片上光网络中的光信号以光速传输，更容易实现大带宽、低功耗、小体积和低串扰等目标。因此在片上互连方面，光互连也是一种很有吸引力的方案，“片上光网络”这个概念也成为国内外研究热点之一[7]。光开关是现代光网络向着更高速和更大容量发展的重要元器件之一，无论是远程光信号交换还是片上的光互连，光开关都是其中关键的光器件。光开关类型大致可分为 MEMS 光开关[8-9]、光纤光开关[10]、Ⅲ-Ⅴ族半导体光开关[11-13]，以及硅基光波导开关[14-17]。近年来，硅基波导光开关由于其体积小、成本低、易于同电芯片集成，以及与传统 CMOS 工艺兼容等特性[18]，被认为在通信网络、数据处理中心和高性能计算领域中具有非常广阔的发展前景。

本文将总结与回顾近年来硅基波导光开关的发展现状，并着重对具有应用潜力的大规模集成光开关及拓扑结构进行分析介绍。

1 硅基光波导开关单元

多输入输出端口的开关阵列主要由 2×2 开关单元，根据性能需求，按照一定的拓扑结构组成，所以完整开关阵列的性能与开关单元有着密不可分的关系。在近 20 年硅基光子学研究中，马赫-曾德尔干涉仪(MZI)和微环谐振器(MRR)是最常见的两种开关单元结构。

1.1 MZI 型光开关

MZI 结构最初由德国物理学者路德维希·马赫和路德维·曾德尔提出[19]，是集成光电子器件中一种常用基本结构，具有结构简单、工作带宽大、热稳定性好等优点，广泛用于调制器及光开关等器件中。

基于 MZI 的光开关结构如图 1 所示：开关单元由两个 2×2 分光器和两条调制臂组成。常见的分光器通常为定向耦合型(DC)或多模干涉仪(MMI)结构，调制臂可分为热光型与电光型两类[20-21]，分别基于等离子体色散效应和热光效应。



图 1 MZI 型光开关结构图

基于等离子体色散效应的 MZI 型电光开关，其开关时间通常在纳秒量级，具有较大的带宽。2009 年，IBM 公司的 Campenhout 团队设计制备的 2×2 结构 MZI 型硅基光开关，串扰小于 −17 dB，在 1 V 偏置电压下，开关功耗为 3 mW，开关时间仅为 4 ns[22]。

后摩尔时代，缩小芯片尺寸是至关重要的发展方向。通过螺旋波导结构，可以在不减小调制臂长度的条件下，将原有器件尺寸进一步降低。2010 年，美国 Kotura 公司的 Dong 团队报道了一种 MZI 型 2×2 硅基电光开关[23]，如图 2 所示。通过增加移相臂长度至 4 mm，使改变 π 相位所需电压仅为 0.83 V，功耗降至 0.6 mW。这意味着在面向片上互联的过程中更进了一步，也提供了新的发展方向。

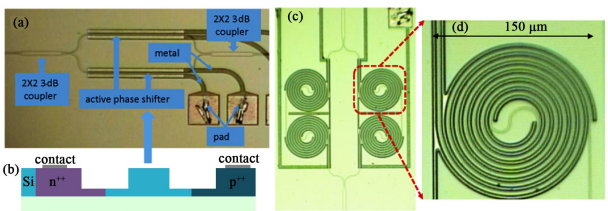
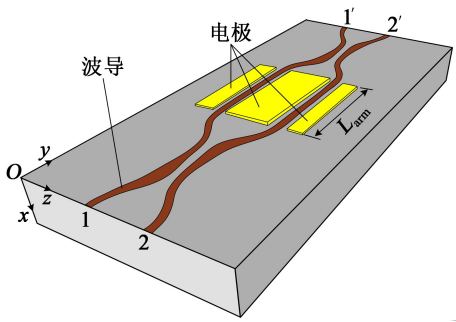
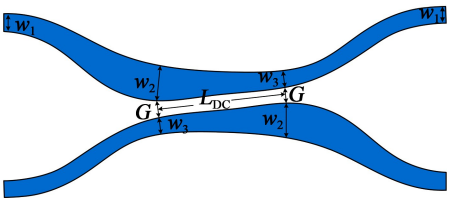


图 2 带有螺旋波导结构的 2×2 硅基电光开关[23]。(a) 器件显微镜照片；(b) 波导截面图；(c) 级联微环；(d) 微环显微图

除器件尺寸外，工作带宽同样起着举足轻重的作用，更大的带宽，更稳定的分光比意味着可以满足更广泛的条件。2017 年，Wang 等提出了一种基于 MZI 和反向对称定向耦合器(DC)的宽带 2×2 电光



(a) 2×2 电光开关



（b）　反向对称耦合器

图 3　反向对称型电光开关[24]

开关[24]，如图 3 所示。通过反向对称型耦合器取代由均匀波导构成的传统耦合器，可在较宽波长范围内实现 50%分光比。在 1 550 nm 工作波长下，当驱动电压为 6 V 时，消光比大于 15 dB，带宽为 85 nm，且所有通道的插入损耗均小于 8.5 dB。

由于等离子体色散效应会对光信号产生吸收，对串扰有不利影响，相比于硅基电光开关，基于热光效应的硅基光开关响应速度虽仅为微秒量级，但热调谐对损耗和串扰的影响相对较小。近年来，随着制作工艺以及结构的不断优化，硅基热光开关的性能也得到进一步提升。Harjanne 等首次将热光开关的响应时间降至约 700 ns[25]。2009 年，Sun 团队提出了一种低功耗硅基热光开关[26]，如图 4 所示。该开关采用 free-standing 波导结构，功耗可降至 540 μW，且开关时间仅约为 141 μs。

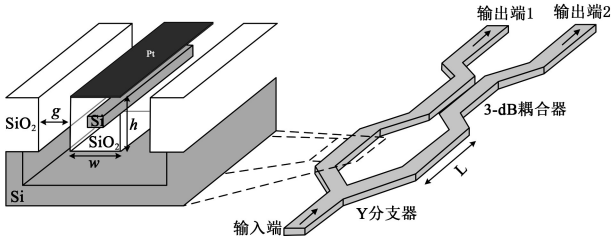


图 4　free-standing 结构热光开关

2017 年，哥伦比亚大学研究人员提出了一种非对称结构 MZI 热光开关[27]，其具有结构紧凑、功耗低和响应速度快等优点。如图 5 所示，当调制臂长度为 4.18 mm 时，该热光开关实现 π 相移所需功耗仅为 0.26 mW，偏置电压为 0.3 V，响应时间可以达到 10 μs 左右。上述性能可满足硅基光子器件的片上互连需求。

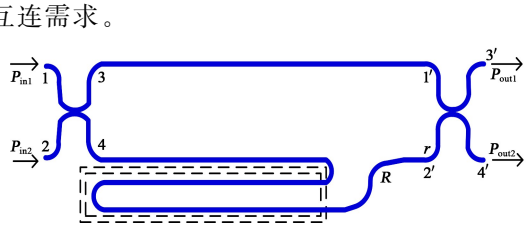


图 5　非对称 MZI 型热光开关

为了进一步降低功耗和提高响应速率，2018 年，华中科技大学研究人员报道了一种基于悬浮波导的 MZI 型热光开关[28]，其结构如图 6 所示。该设计利用周期性支撑结构保证沟槽波导稳定性，通过具有低热传导特性的空气包层提高热调谐效率，优化后的热光开关驱动功率可降低至 1 mW，开启和关闭时间分别为 76 和 48 μs。2021 年，Zhang 等在此波导结构的基础上进一步优化了热光开关的性能，在减小器件尺寸的同时，将调制效率提升至 7.7 nm/mW，有力推进了热光开关在片上互连中的应用[29]。

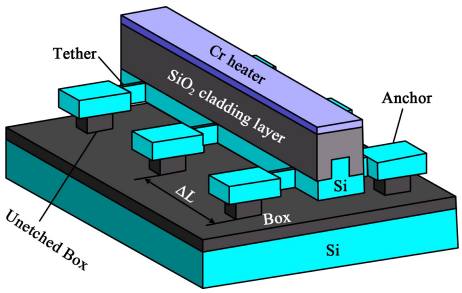


图 6　基于悬浮波导的 MZI 型热光开关

传统意义上的硅基光开关不可避免地面临尺寸以及材料特性的限制，近年来各种新型材料的发现与应用为更高速更低功耗的光开关发展注入了新的活力。2020 年，英国埃克塞特大学和南安普顿大学实验展示了一种 O 波段硅波导 MZI 型开关[30]，如图 7 所示。它利用温度控制 $Ge_2Sb_2Te_5$（GST）相变材料在非晶态和晶态间的转换，从而改变波导损耗，实现 ON 状态（非晶态）和 OFF 状态（晶态）的切换，获得 11 dB 消光比。该方法的特点在于开关状态的非易失性，不必为了维持开关状态而产生静态功耗。

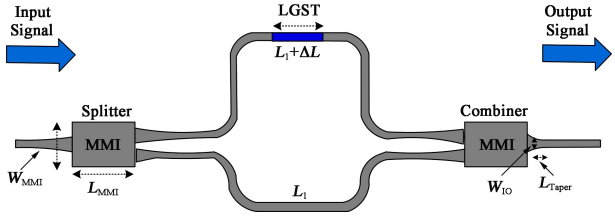


图 7　基于 GST 相变材料辅助的 MZI 开关

2021 年，华中科技大学武汉光电国家实验室提出了一种 2×2 高速热光开关[31]。如图 8 所示，该开关为 MMI-MZI 级联结构，金属加热器位于波导一侧平板区，移相臂采用横向支撑的脊型悬挂波导来提高热调谐效率。实验结果表明，开关功耗仅为 1.07 mW，开关时间为 4.7 μs，消光比为 30 dB，光

损耗约为 0.5 dB。与传统热光开关相比，通过改变其加热调制方式使其品质因子(Q)提高了一个数量级，在网络重构和片上互连方面具有潜在的应用前景。

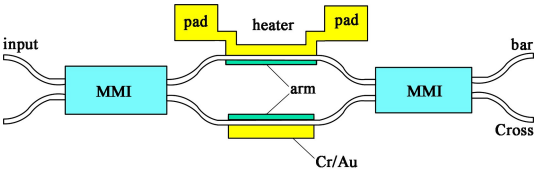


图 8 MMI-MZI 型 2×2 热光开关示意图

1.2 MRR 型光开关

与 MZI 型光开关相比，基于微环谐振效应的光开关，具有更小的尺寸以及更低的损耗。但由于谐振对于温度以及波长较为敏感，因此 MRR 型光开关的带宽小于 MZI 型开关，且微环结构对制作工艺提出了更高要求。MRR 型光开关包括传统型 MRR 光开关[32]和 DR-MZI 型光开关[33]。典型的 MRR 型 2×2 光开关单元如图 9 所示，主要由输入-直通波导、上载-下载波导和可调谐微环组成。信号光自 Input 端口输入，当微环不发生谐振时，信号光由 Through 端口输出，当微环发生谐振时，光经过谐振腔耦合后从 Drop 端口输出，从而实现波长交换。

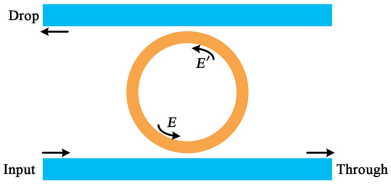


图 9 MRR 型光开关

2005 年，Xu 等首次提出了基于微环谐振结构的硅基调制器[34]，如图 10 所示。通过对微环两侧 n^+ 与 p^+ 区域施加电压，控制谐振输出，通过改变工作电压，可有效调节波导有效折射率，从而实现光调制功能。但在实际的设计和制备过程中，MRR 型光开关面临着两个需要解决的问题：一是微环谐振腔的光谱特性限制了带宽，不利于抑制信道间的串扰；二是微环谐振器的制备对工艺要求较高，物理尺寸与结构精度需有效地满足谐振条件，同时尽量减小外界温度变化和入射光波长漂移对 MRR 输出的影响。

为了增加工作带宽，可采用微环级联结构实现波谱平坦[35-38]和连续调谐[39]。IBM 公司的 Vlasov 等将 5 个 MRR 单元级联，获得了较大的工作带宽，如图 11 所示[35]，虽相比于 MZI 型开关仍有一定距离，但有效提升了谐振型光开关的性能。

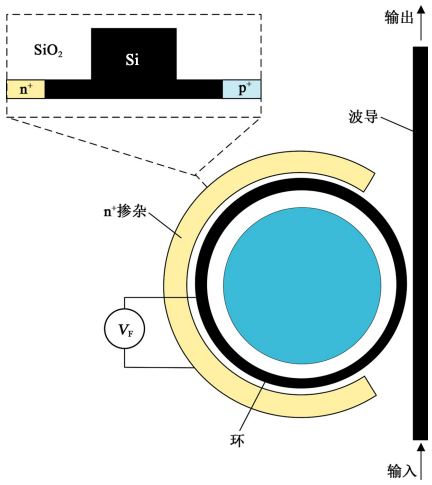


图 10 MRR 型光开关



图 11 级联微环型光开关

2009 年，康奈尔大学 Michal Lipson 课题组设计了基于电光效应的级联 MMR 开关单元[40]。IBM 公司研发团队在双环基础上，通过优化开关单元电光调谐性能，进一步降低了串扰以及驱动功耗[41]。2012 年，新加坡 IME 的 Luo 团队首次实验报道了基于电光效应的十级级联 MRR 型光开关[42]，大幅度提高了带宽，有效降低了开关串扰和开关时间。

微环型光开关由于其自身的特性不可避免地会造成较大的串扰，而 MZI 型光开关能够很好地调控串扰，但其尺寸和损耗相对较大。为了进一步提升硅基光开关性能和减小尺寸，2014 年上海交通大学 Lu 等提出了一种 DR-MZI 型硅基光开关[43]结构，如图 12 所示。在 MZI 调制臂两侧分别设置微环谐

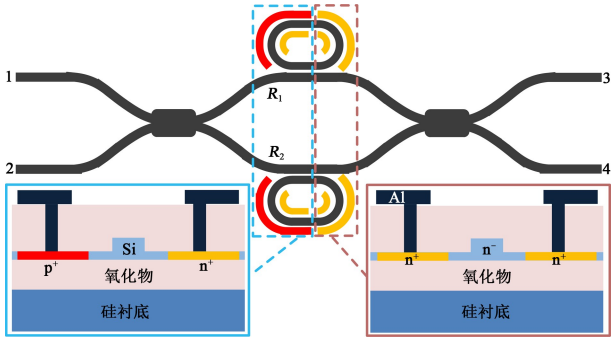
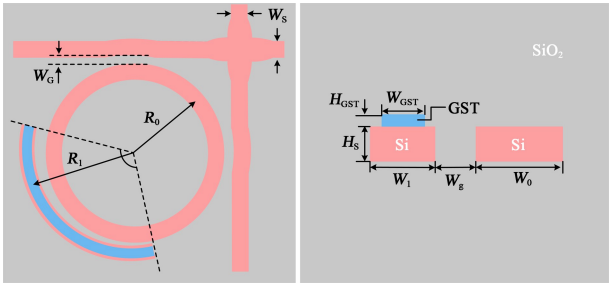


图 12 DR-MZI 型光开关

振器，通过改变微环谐振腔的有效折射率实现 π 相位调节，开关时间约为 414 ps，串扰小于－20 dB，驱动功耗仅为 0.691 mW。该方案结合了谐振与干涉方法的优点，实现了相比于单独采用 MZI 或 MRR 结构更低的串扰与损耗，有效降低了器件功耗与尺寸，为构建高性能大规模开关阵列提供了新的思路和方向。

除单元结构外，光开关的驱动方式以及级联间的架构同样会对性能产生一定影响。2008 年，哥伦比亚大学的 Bergmant 报道了一种基于 MRR 的 4×4 硅基热光开关[44]。该光开关的片上尺寸约为 0.07 mm^2，工作带宽为 38.5 GHz，消光比大于 20 dB。2015 年，Bergmant 课题组利用 MRR 单元设计制备了高性能无阻塞结构的 8×8 开关阵列[45]。次年，该团队通过优化驱动，构建了基于 MRR 结构的 1×8 光开关，实现了不同波长下的选择性单通道/多通道传输，在空间和波长上实现了通道间光交换[46]。可见，光开关阵列的拓扑结构和驱动方式对阵列性能有显著影响。

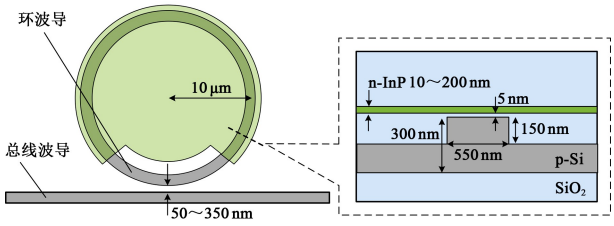
近年来，不同新型低维材料或相变材料等应用的发展同样在 MRR 型光开关的研发中提供了帮助。2020 年，浙江大学戴道锌教授团队提出了一种 GST 相变材料辅助 MMR 型 2×2 波长选择开关[47]。它由两条直波导和一个 GST 加载硅波导 MRR 组成，通过控制 GST 在晶态和非晶态的转换实现开关功能，如图 13 所示。仿真结果表明，该光开关在谐振波长下的消光比为 20 dB，Through 端口和 Drop 端口的损耗分别为 0.9 和 2 dB，且谐振波长在 ON 状态和 OFF 状态下变化很小，适用于多信道波分复用系统。



（a）　顶视图　　（b）　耦合区横截面

图 13　GST 辅助 MRR 的波长选择光开关的原理图

2021 年日本东京大学的 Li 等提出了一种基于Ⅲ-Ⅴ/Si 混合金属氧化物半导体光学移相器和超薄 InP 膜 MRR 光开关[48]。如图 14 所示，通过减小 InP 膜厚度，降低移相器损耗，从而获得高 Q 值。数值分析结果表明，该 MRR 光开关功耗仅为 0.3 pW，适用于硅基低串扰可编程集成光路应用。



（a）　平面视图　　（b）　截面视图

图 14　混合 MRR 光开关原理图

2022 年，吉林大学许言等提出了一种光学相变材料 $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$（GSST）辅助硅基跑道型微环光开关[49]，如图 15 所示。分析结果表明，其在谐振波长处的消光比为 18 dB，且在开、关两种状态下的损耗均小于 1 dB。该开关的宽带低功耗特性使其在片上开关矩阵构建中具有良好的应用潜力。

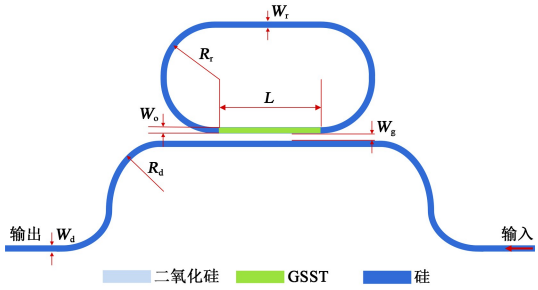
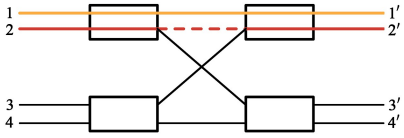


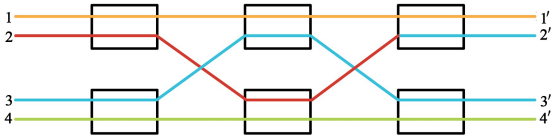
图 15　GSST 辅助跑道型微环光开关

2　波导光开关阵列拓扑结构

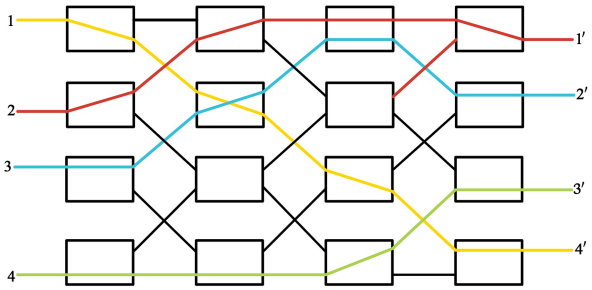
硅基光子芯片中光开关阵列通常由 1×2 开关单元或 2×2 开关单元按照一定逻辑关系连接组合而成。大规模硅光开关阵列主要由输入端口、交换网络以及控制单元构成，而交换网络即光开关阵列的拓扑结构根据阻塞类型的不同，大致可以分为阻塞性、可重构无阻塞和严格无阻塞型等。



（a）　阻塞型网络架构



（b）　可重构无阻塞网络架构



(c) 严格无阻塞型网络架构

图 16 光开关阵列拓扑架构

2.1 阻塞型架构

阻塞型网络架构是最早被提出的一种拓扑结构，典型为 Butterfly 型架构[50]，如图 17 所示。该拓扑结构具有水平对称性，$N\times N$ 开关阵列所需的开关单元数目为$(1/2N)\log_2(N)$个，每条路径中开关单元的数量为 $\log_2(N)$个，每条路径中交叉节点的数量为 $N-\log_2(N)-1$ 个[51]，相较于可重构无阻塞网络与严格无阻塞网络，其优势在于开关单元数量较少，并且能够满足大部分的交换需求。较少的开关单元数量有利于降低损耗和封装难度，控制成本，增强实用性。其挑战在于该网络无法满足每条路径独立互不影响的特殊需求。

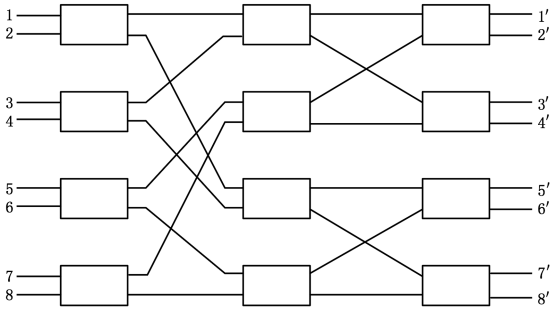
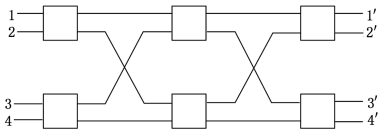


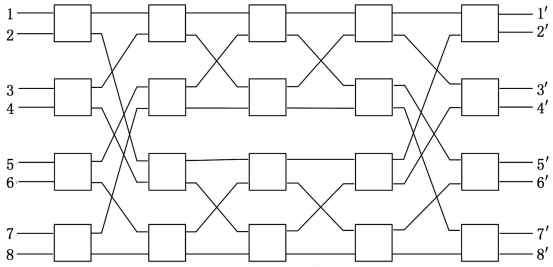
图 17 Butterfly 型拓扑结构

2.2 可重构型无阻塞架构

典型的可重构无阻塞开关为 Benes 架构[52-53]。如图 18 所示，其 N 端口阵列所需开关单元总数为 $N\log_2(N)-(N/2)$个，每条路径中开关的数量为 $2\log_2(N)-1$ 个，整个网络架构呈中心对称结构。Benes 网络具有较为灵活的配置，可通过重置单元状态实现光信号的无阻塞传输。在无阻塞型网络架构中，Benes 具有最少的开关单元数量，相较于严格无阻塞网络，其优势在于损耗更低。Benes 网络的不足在于每条路径之间并非完全独立，由于同一个开关可控制两路传输光信号，串扰相对较高，需进一步通过优化单元开关降低串扰性能来提高阵列整体性能。



(a) 阻塞型网络架构

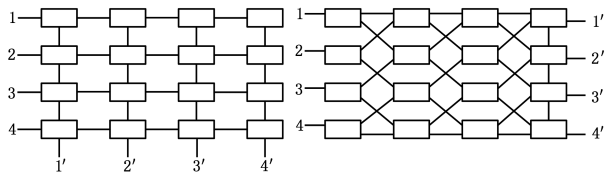


(b) 可重构无阻塞网络架构

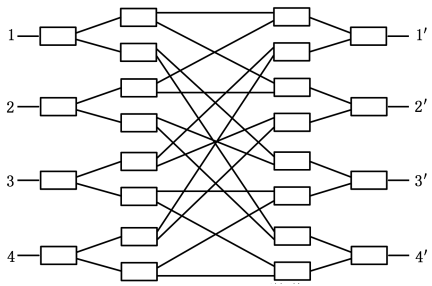
图 18 Benes 型拓扑结构

2.3 严格无阻塞架构

常见的严格无阻塞型网络架构有 Crossbar，Path Independent Loss (PILoss) 和 Switch and Select(S&S)三类，如图 19 所示。



(a) Crossbar 型架构 (b) PILoss 型架构



(c) S&S 型架构

图 19 严格无阻塞架构

N 端口 Crossbar 网络总开关单元数量为 N^2，每条路径开关数量为 $2N-1$，且无光交叉[54]。Crossbar 网络架构的主要特点是其严格无阻塞特性和零波导交叉。但 Crossbar 结构每条路径经过的开关单元数量不同，即光信号路径长度不同，最短的路径仅经过 1 个开关单元，而最长的路径需经过 $2N-1$ 个开关单元，因此路径不同导致的损耗差异较大，从而影响阵列开关路径之间的损耗均匀性。

N 端口 PILoss 网络总的开关单元数量虽然同为 N^2，但每条路径开关数量为 N，每条路径交叉节

点数量为 $N-1$。相较于 Crossbar 网络，PILoss 架构具有较好的路径损耗均匀性，即损耗与路径无关，但是网络结构相对复杂。

N 端口 S&S 网络架构总开关数量为 $2N^2-2N$，每条路径开关数量为 $2\log_2(N)$，每条路径交叉节点数量为 $(N-1)^2$[55]。S&S 网络每条路径拥有完全独立的光链路，除交叉波导以外不存在路径之间的重叠，因此，S&S 网络路径之间的串扰极低。但随着端口数量的增加，网络的复杂度迅速增加，每条路径交叉节点数量以 N^2 快速增加，损耗与串扰均会随之恶化，且实现难度较高。

从实际应用角度考虑，可重构无阻塞网络能够满足大部分应用需求，且随着端口数增大，开关数量相对较少，损耗低，易于实现，典型的 Benes 网络架构在大规模阵列光开关中具有较多应用。

3　大规模硅基光开关阵列

目前，基于 MEMS 技术的阵列光开关商用化较为成熟[56]，而 SiO_2 波导光开关则具有灵活性大、集成度高和工艺成熟等优点，文献报道 32 端口波导开关阵列的插入损耗仅为 6.6 dB 左右[57]。但由于物理机制限制，上述两种开关切换时间均为毫秒级，限制了其在高速信号交换处理中的应用。相比 MEMS 和 SiO_2 波导光开关，硅波导光开关虽在损耗及偏振相关性方面有待提高，但开关时间为微秒或纳秒级，且功耗相对较低，在数据中心等高集成度、高速和高能耗应用中具有良好的应用前景。

2014 年，日本先进工业科技研究所（AIST）提出了一种基于 PILoss 架构的 8×8 硅波导热光开关[58]，其包含 64 个开关单元和 49 个波导交叉节，MZI 调制臂采用 TiN 电极加热，如图 20 所示。测试结果表明，平均片上损耗约为 6.5 dB，以 1 550 nm 为中心波长，7.5 nm带宽范围串扰小于－20dB。2015 年，该团队同样采用 PILoss 架构，在 MZI 单元性能优化的基础上成功制备了 32×32 光开关阵列[59]，芯片的尺寸为 11 mm×25 mm，包含 1 024 个开关单元和 961 个波导交叉节，平均片上损耗为 15.8 dB，驱动功耗为 2.93 W，开关时间小于 30 μs。

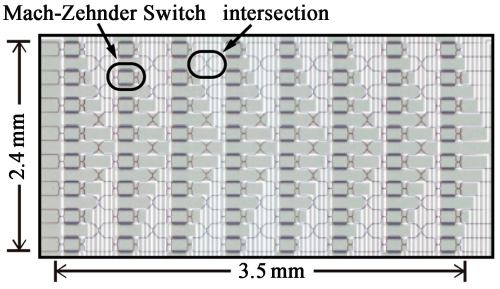
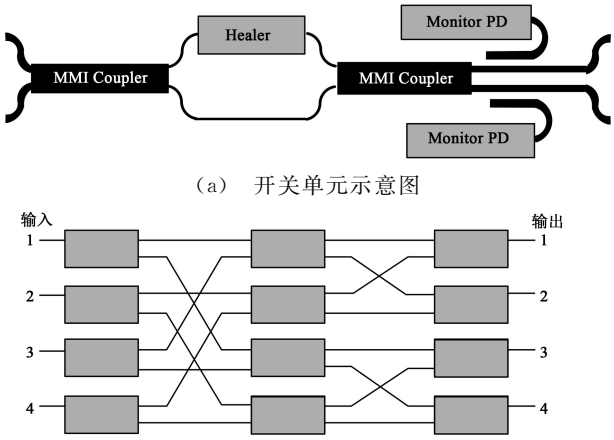


图 20　8×8 光开关阵列[58]

Benes 架构由于其重构无阻塞拓扑特性，在信号交换与处理的过程中不可避免地会造成较大的串扰。华为在 Benes 网络架构的基础上，通过增加更多的开关单元器件来抑制和降低阵列的总串扰。2016 年，华为公司报道了自行研发的 32×32 光开关阵列芯片[60]。该设计采用了一种称为 Hybrid Dilated Benes 的拓扑结构。该开关阵列由 448 个 2×2 开关单元器件构成，同时每个开关单元上都增加了动态监测器，如图 21(a)所示，用于稳定开关工作状态。此外，还采用了一种热补偿技术[61]，使单个开关功耗降低至 0.5 mW。经测试，光开关阵列的片上损耗约为 23～28 dB。



(a)　开关单元示意图

(b)　新型拓扑结构

图 21　完全无阻塞 4×4 光开关阵列

在优化拓扑结构的基础上，新的驱动方式也相继被提出。2015 年，IBM 公司研发团队报道了基于新型拓扑结构的完全无阻塞 4×4 光开关阵列[62-63]，如图 21(b)所示。当采用推挽（Push-Pull）驱动方式时[64]，在 1 310 nm 工作波长下，串扰为－25 dB，且 15 nm 带宽范围内串扰均小于－20 dB。2020 年，IBM 公司利用前期的 2×2 开关单元构建了 8×8 单片集成光开关阵列[65]，如图 22 所示，单个开关单元光损耗为 0.8 dB，开关时间为 10 ns，串扰小于－30 dB，输入/输出阵列光纤耦合损耗约为 7.5～10.5 dB。

2017 年，中科院半导体所 Qiao 等设计制作了基于 Benes 架构的 32×32 电光开关阵列与 64×64 热光开关阵列[66]。其中，电光开关阵列损耗约为

12.9～18.5 dB，串扰约为－15～－24.8 dB，开关时间仅为 1 ns。

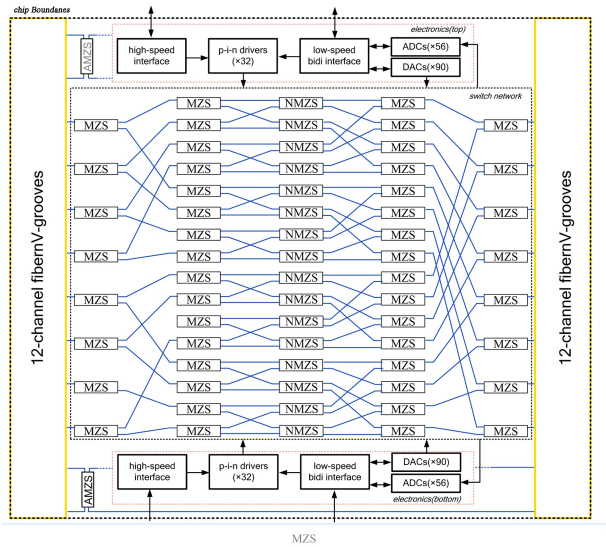


图 22 单片集成光开关

2019 年，日本 AIST 的 Suzuki 等报道了基于硅热光效应的 32×32 严格无阻塞光开关阵列[67]，开关时间约为 10 μs。单元开关采用 DC 耦合器，通过 PLC 转接器实现纤-纤损耗为 10 dB。同年，该团队报道了一种基于 Si/SiN 双层波导的光开关阵列[68]，如图 23 所示。该方案利用 PILOSS 拓扑架构中空闲端口，通过 SiN/Si 双层波导和交叉结构，克服硅波导偏振依赖性，实现了 32×32 三维光开关阵列。

经过不懈努力，2021 年，美国加州大学的 Zhang 等报道了一种 128×128 大规模硅光开关阵列[69]，该阵列通过 MEMS 光开关控制光束偏转角，具有 70°×70°视角和兆赫兹级的响应速度，在激光雷达等方面具有潜在应用价值。

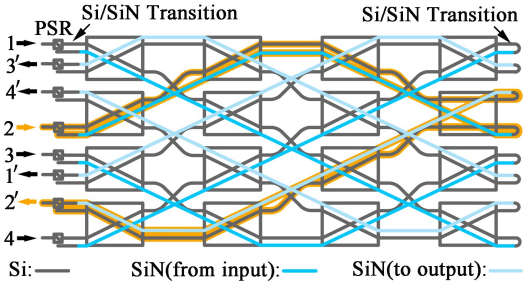


图 23 双层光开关阵列

4 结束语

本文简要介绍了硅基光开关单元和阵列拓扑结构，对近年来硅基光开关阵列研究进行了总结和分析。相较于传统光开关，硅光开关及阵列虽起步相对较晚，但由于其具有小尺寸、低功耗和 CMOS 工艺兼容等优点，在研究和应用上获得广泛关注。硅光开关面临的主要问题之一是串扰影响阵列规模，二是传输损耗相对较大，需通过增强工艺容差，提高开关单元性能，进一步优化拓扑结构实现阵列性能和规模的有效扩展。此外，驱动电路的功耗同样是硅光开关发展中亟待解决问题之一。随着开关端口数量的增加，外部驱动电路规模同样呈几何式增长，这就意味着需要考虑大规模硅光开关阵列芯片的尺寸以及散热对可靠性的影响。可从电极设计出发，通过推挽式驱动等降低开关单元功耗，并构建新型拓扑结构，优化光传输路径，采用三维交叉连接等工艺，减少开关单元数量，降低总体功耗。未来可以探索通过低维材料或相变材料与硅波导相结合的方式，在保证 CMOS 工艺兼容的前提下，突破当前集成光路发展中的瓶颈，实现满足后摩尔时代信息交换需求的光开关芯片。

参考文献：

[1] Kachris C, Kanonakis K, Tomkos I. Optical interconnection networks in data centers: Recent trends and future challenges [J]. IEEE Commun. Mag., 2013, 51(9): 39-45.

[2] Li Yu, Zhang Yu, Zhang Lei, et al. Silicon and hybrid silicon photonic devices for intra-data center applications: state of the art and perspectives [Invited][J]. Photonics. Res., 2015, 3(5): B10-B27.

[3] Kachris C, Tomkos I. A survey on optical interconnects for data centers[J]. IEEE Commun. Surv. Tutor., 2012, 14(4): 1021-1036.

[4] 杜 铮，王亚龙，杨天普. 电交叉技术瓶颈日益凸显，可在三大应用场景引入光交叉[J]. 通信世界，2018，8(766)：45-47.
Du Zheng, Wang Yalong, Yang Tianpu. The bottleneck of electrical crossover technology is becoming increasingly prominent, and optical crossover can be introduced in three major application scenarios[J]. Communications World, 2018, 8(766): 45-47.

[5] Essiambre R J, Kramer G, Winzer P J, et al. Capacity limits of optical fiber networks[J]. J. Lightwave Technol., 2010, 28(4): 662-701.

[6] Nivaashini M, Thangaraj P. Computational intelligence techniques for automatic detection of Wi-Fi attacks in wireless IoT networks[J]. Wireless Networks, 2021, 27(4): 2761-2784.

[7] Miller S E. A survey of integrated optics [J]. IEEE J. Quantum Electron., 2003, 8(2): 199-205.

[8] Helkey R, Adams S, Bowers J, et al. Design of large, MEMS-based photonic switches [J]. Opt. Photon. News,

2002，13(5)：40-43.

[9] Chu P B，Lee S S，Park S. MEMS：The path to large optical crossconnects[J]. IEEE Commun. Mag.，2002，40(3)：80-87.

[10] Presby H，Narayanan C. Mechanical silica optical circuit switch[J]. Electron. Lett.，1998，34(5)：484-485.

[11] Stabile R. Integrated InP optical switch matrices performance for packet data networks [C]// Optoelectronics & Communications Conf. IEEE，2016：1-3.

[12] Soganci I M，Tanemura T，Williams K A，et al. Monolithically integrated InP 1 × 16 optical switch with wavelength-insensitive operation [J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2010，22(3)：143-145.

[13] Agashe S S，Shiu K T，Forrest S R. Compact polarization-insensitive InGaAsP-InP 2 × 2 optical switch [J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2005，17(1)：52-54.

[14] Goh T，Yasu M，Hattori K，et al. Low loss and high extinction ratio strictly nonblocking 16 × 16 thermooptic matrix switch on 6-in wafer using silica-based planar lightwave circuit technology [J]. J. Lightwave Technol.，2001，19(3)：371.

[15] Nagase R，Himeno A，Okuno M，et al. Silica-based 8 × 8 optical matrix switch module with hybrid integrated driving circuits and its system application [J]. J. Lightwave Technol.，1994，12(9)：1631-1639.

[16] Honjo T，Inoue K，Sahara A，et al. Quantum key distribution experiment through a PLC matrix switch [J]. Opt. Commun.，2006，263(1)：120-123.

[17] Shibata T，Okuno M，Goh T，et al. Silica-based waveguide-type 16 × 16 optical switch module incorporating driving circuits[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2003，15(9)：1300-1302.

[18] Yoo S J B. Future prospects of silicon photonics in next generation communication and computing systems [J]. Electron. Lett.，2009，45(12)：584-587.

[19] Heideman R G，Kooyman R，Greve J. Performance of a highly sensitive optical waveguide Mach-Zehnder interferometer immunosensor [J]. Biosens. Bioelectron.，2009，45(12)：584-588.

[20] Yang M，Green W，Assefa S，et al. Non-blocking 4 × 4 electro-optic silicon switch for on-chip photonic networks[J]. Opt. Express，2011，19(1)：47-54.

[21] Nicolas，Dupuis，Benjamin，et al. Design and fabrication of low-insertion-loss and low-crosstalk broadband 2 × 2 Mach-Zehnder silicon photonic switches [J]. J. Lightwave Technol.，2015，33(17)：3597-3606.

[22] Joris V C，William M J，Green S A，et al. Low-power，2×2 silicon electro-optic switch with 110-nm bandwidth for broadband reconfigurable optical networks [J]. Opt. Express，2009，17(26)：24020.

[23] Dong P，Liao S，Hong L，et al. Submilliwatt，ultrafast and broadband electro-optic silicon switches[J]. Opt. Express，2010，18(24)：25225-25231.

[24] Wang Hangli，Li Xuepeng，Zhang Mengruo，et al. Broadband 2×2 lithium niobate electro-optic switch based on a Mach-Zehnder interferometer with counter-tapered directional couplers[J]. Appl. Opt.，2017，56(29)：8164.

[25] Harjanne M，Kapulainen M，Aalto T，et al. Sub-μs switching time in silicon-on-insulator Mach-Zehnder thermooptic switch [J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2004，16(9)：2039-2041.

[26] Peng S，Reano R M. Submilliwatt thermo-optic switches using free-standing silicon-on-insulator strip waveguides[J]. Opt. Express，2010，18(8)：8406.

[27] Rizal C S，Niraula B. Compact Si-based asymmetric MZI waveguide on SOI as a thermo-optical switch [J]. Opt. Commun.，2018，410：947-1015.

[28] Chen Kai，Duan Fei，Yu Yonglin. Performance-enhanced silicon thermo-optic Mach-Zehnder switch using laterally supported suspended phase arms and efficient electrodes[J]. Opt. Lett.，2019，44(4)：951-954.

[29] Zhang Ruihuan，He Yu，Zhang Yong. Ultracompact and low-power-consumption silicon thermo-optic switch for high-speed data[J]. Nanophotonics，2021，10(2)：937-945.

[30] Faneca J，Bucio T D，Gardes F Y，et al. O-band N-rich silicon nitride MZI based on GST[J]. Appl. Phys. Lett.，2020，116(9)：093502.

[31] Duan Fei，Chen Kai，Chen Da，et al. Low-power and high-speed 2 × 2 thermo-optic MMI-MZI switch with suspended phase arms and heater-on-slab structure[J]. Opt. Lett.，2020，46(2)：234-237.

[32] Manipatruni S，Dokania R K，Schmidt B，et al. Wide temperature range operation of micrometer-scale silicon electro-optic modulators[J]. Opt. Lett.，2008，33(19)：2185-2187.

[33] Lu Liangjun，Zhou Linjie，Li Xinwan，et al. Low-power 2×2 silicon electro-optic switches based on double-ring assisted Mach-Zehnder interferometers[J]. Opt. Lett.，2014，36(6)：1633-1636.

[34] Xu Q，Schmidt B，Pradhan S，et al. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator[J]. Nature，2005，435(7040)：325.

[35] Vlasov Y，Green W，Xia F. High-throughput silicon nanophotonic wavelength-insensitive switch for on-chip optical networks[J]. Nature Photonics，2008，2(4)：1-3.

[36] Biberman A，Lira H L R，Padmaraju K，et al. Broadband silicon photonic electrooptic switch for photonic interconnection networks[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2011，23(8)：504-506.

[37] Poon A W，Luo X S，Xu F. Cascaded microresonator-based matrix switch for silicon on-chip optical interconnection[J]. Proc. IEEE，2009，90(7)：1216-1238.

[38] Luo Xianshu，Song Junfeng，Feng Shaoqi，et al. Silicon

high-order coupled-microring-based electro-optical switches for on-chip optical interconnects[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012, 24(10): 821-823.

[39] Dasmahapatra P, Stabile R, Rohit A, et al. Optical crosspoint matrix using broadband resonant switches[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron., 2014, 20(4): 1-10.

[40] Lira H L, Manipatruni S, Lipson M. Broadband hitless silicon electro-optic switch for on-chip optical networks[J]. Opt. Express, 2009, 17(25): 22271.

[41] Lee B G, Green W, Campenhout J V, et al. Comparison of ring resonator and Mach-Zehnder photonic switches integrated with digital CMOS drivers[C]// 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics-Society, Denver, CO, 2010: 327-328.

[42] Luo Xianshu, Song Junfeng, Feng Shaoqi, et al. Silicon high-order coupled-microring-based electro-optical switches for on-chip optical interconnects[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012, 24(10): 821-823.

[43] Lu Liangjun, Zhou Linjie, Li Zuxiang, et al. 4×4 silicon optical switches based on double-ring-assisted Mach-Zehnder interferometers[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2015, 27(23): 2457.

[44] Sherwood-Droz N, Wang H, Chen L, et al. Optical 4×4 hitless silicon router for optical networks-on-chip (NoC)[J]. Opt. Express, 2008, 16(20): 15915-15922.

[45] Nikolova D, Calhoun D M, Liu Y, et al. A highly scalable fully non-blocking silicon photonic switch fabric[J]. Opt. Physics, 2015, 25(8): 09323.

[46] Vujicic V, Anthur A P, Gazman A, et al. Software-defined silicon-photonics-based metro node for spatial and wavelength superchannel switching[J]. J. Opt. Commun. Netw., 2017, 9(5): 342-350.

[47] Zhang Changping, Zhang Ming, Xie Yiwei, et al. Wavelength-selective 2 × 2 optical switch based on a $Ge_2Sb_2Te_5$-assisted microring[J]. Photonics Res., 2020, 8(7): 1171-1176.

[48] Ohno S, Li Q, Sekine N. Si microring resonator optical switch based on optical phase shifter with ultrathin-InP/Si hybrid metal-oxide-semiconductor capacitor[J]. Opt. Express, 2021, 29(12): 18502-18511.

[49] Xu Yan, Liu Songyue, Liu Tingyu, et al. Optical switch based on $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$-assisted racetrack microring[J]. Photonics, 2022, 9(2): 117.

[50] Dally W J, Towles B P. Principles and Practices of Interconnection Network[M]. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2004.

[51] Lee B G. Photonic switch fabrics in computer communications systems [C]// Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), San Diego, CA, 2018: 1-22.

[52] Guo Zhanzhi, Lu Liangjun, Zhou Linjie, et al. 16 × 16 silicon optical switch based on dual-ring-assisted Mach-Zehnder interferometers[J]. J. Lightwave Technol., 2018, 35(2): 225-232.

[53] Qiao Lei, Tang Weijie, Chu Tao. 32×32 silicon electro-optic switch with built-in monitors and balanced-status units[J]. Sci. Rep., 2017, 7(1): 42306.

[54] Seok T J, Quack N, Han S, et al. Large-scale broadband digital silicon photonic switches with vertical adiabatic couplers[J]. Optica, 2016, 3(1): 64-70.

[55] Chen L, Chen Y K. Compact, low-loss and low-power 8×8 broadband silicon optical switch[J]. Opt. Express, 2012, 20(17): 18977-18985.

[56] Chu T, Yamada H, Ishida S, et al. Compact 1×N thermo-optic switches based on silicon photonic wire waveguides[J]. Opt. Express, 2005, 13(25): 10109-10114.

[57] Sohma S, Watanabe T, Ooba N, et al. Silica-based PLC type 32×32 optical matrix switch[C]// 2006 European Conf. on Optical Communications, IEEE, 2006: 1-2.

[58] Suzuki K, Tanizawa K, Matsukawa T, et al. Ultra-compact 8×8 strictly-non-blocking Si-wire PILOSS switch[J]. Opt. Express, 2014, 22(4): 3887-3894.

[59] Tanizawa K, Suzuki K, Toyama M, et al. Ultra-compact 32×32 strictly-non-blocking Si-wire optical switch with fan-out LGA interposer[J]. Opt. Express, 2015, 23(13): 17599-606.

[60] Celo D, Goodwill D J, Jia J, et al. 32×32 silicon photonic switch [C]// Proc. of IEEE Optoelectronics & Communications Conf., 2016: 1-3.

[61] Celo D, Goodwill D J, Jia J, et al. Thermo-optic silicon photonics with low power and extreme resilience to over-drive [C]// Proc. of 2016 IEEE Optical Interconnects Conf. (OI), 2016: 26-27.

[62] Dupuis N, Lee B G, Rylyakov A V, et al. Modeling and characterization of a nonblocking 4×4 Mach-Zehnder silicon photonic switch fabric[J]. IEEE J. Lightwave Technol., 2015, 33(20): 4329-4337.

[63] Lee B G, Rylyakov A V, Green W M, et al. Monolithic silicon integration of scaled photonic switch fabrics, CMOS logic, and device driver circuits[J]. IEEE J. Lightwave Technol., 2014, 32(4): 743-751.

[64] Chen L, Dong P, Chen Y K. Chirp and dispersion tolerance of a single-drive Push-Pull silicon modulator at 28 Gb/s[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012, 24(11): 936-938.

[65] Dupuis N, Proesel J E, Boyer N, et al. An 8×8 silicon photonic switch module with nanosecond-scale reconfigurability[C]// Proc. of IEEE 2020 Optical Fiber Commun. Conf. and Exhibition (OFC), 2020: 1-3.

[66] Qiao Lei, Tang Weijie, Chu Tao. 32×32 silicon electro-optic switch with built-in monitors and balanced-status units[J]. Sci. Rep., 2017, 7(1): 1-7.

[67] Suzuki K，Konoike R，Suda S，et al. Low-loss，low-crosstalk，and large-scale silicon photonics switch [C]// Proc. of IEEE 2019 Optical Fiber Commun. Conf. and Exhibition (OFC)，2019：1-3.

[68] Suzuki K，Konoike R，Yokoyama N，et al. Polarization-diversity 32 × 32 Si photonics switch with non-duplicate diversity circuit in double-layer platform[C]// Proc. of IEEE 2019 Optical Fiber Commun. Conf. and Exhibition (OFC)，2019：1-3.

[69] Zhang X S，Kwon K，Henriksson J，et al. Large-scale silicon photonics focal plane switch array for optical beam steering[C]// Proc. of IEEE 2021 Optical Fiber Commun. Conf. and Exhibition (OFC)，2021：1-3.

作者简介：

孙小强(1977—)，男，微电子学与固体电子学专业博士，教授，博士生导师；主要从事集成光子器件方面研究工作，作为负责人承担国家重点研发计划子课题和国家自然科学基金、吉林省科技支撑计划重点项目等科研项目 10 余项；在 IEEE 和 OSA 等光电子领域重要刊物上发表相关学术论文 70 余篇；

刘崧岳(1998—)，男，硕士研究生，主要从事硅基片上互连用基础器件、硅基光开关及调制器的研究；

张大明(1970—)，男，微电子学与固体电子学专业博士，教授，博士生导师；一直致力于平面集成光路器件及其集成技术研究，主持完成国家重点研发计划项目、教育部新世纪优秀人才支持计划、“863”计划、“973”计划、国家自然科学基金、吉林省杰出青年基金计划和吉林省科技厅中青年科技创新领军人才及团队、吉林省教育厅“吉林省高校创新团队”建设等项目；已发表学术论文 400 余篇，其中 SCI 收录论文 350 余篇，引用超过 3000 次；获国家发明专利授权 32 项，合著专著 1 部。