

# 基于单个微环谐振器的小尺寸、低损耗二维光路由器

廖莎莎<sup>1,2\*</sup>, 冯玉婷<sup>1</sup>, 黄琮<sup>1</sup>, 刘真伟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065;

<sup>2</sup>上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

**摘要** 光路由器作为实现信号传输与数据交换的基本元器件,被广泛应用于片上光互连网络中。二维光路由器可以有效降低系统复杂度,并且可以满足片上光互连网络中多种拓扑结构对路由的需求。因此,提出一种基于单个微环谐振器的小尺寸、低损耗二维光路由器方案。所提方案仅采用单个微环谐振器,即可实现二维的路由切换。该二维光路由器的最大串扰为 $-11.65$  dB,尺寸仅为 $100\ \mu\text{m}\times 65\ \mu\text{m}$ ,具有结构简单、尺寸小等优势,可被广泛应用于信号处理系统、通信系统和互联系统中。

**关键词** 集成光学; 集成光学器件; 光路由器; 光互连网络; 硅光子学

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2213002

## Small-Size and Low-Loss Two-Dimensional Optical Router Based on Single Micro-Ring Resonator

Liao Shasha<sup>1,2\*</sup>, Feng Yuting<sup>1</sup>, Huang Cong<sup>1</sup>, Liu Zhenwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;*

<sup>2</sup>*State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*

**Abstract** As a basic component of signal transmission and data exchange, the optical router is widely used in the on-chip optical interconnection network. The two-dimensional optical router can effectively reduce the complexity of the system and meet the routing requirements of on-chip optical interconnection networks with various topologies. Therefore, a small-size and low-loss two-dimensional optical router based on a single micro-ring resonator is proposed. The proposed scheme can realize two-dimensional routing switching by using only one micro-ring resonator. The two-dimensional optical router has a maximum crosstalk of  $-11.65$  dB and a size of only  $100\ \mu\text{m}\times 65\ \mu\text{m}$ . It has the advantages of simple structure and small size, and can be widely used in signal processing systems, communication systems, and interconnection systems.

**Key words** integrated optics; integrated optical devices; optical routers; optical interconnection networks; silicon photonics

## 1 引言

随着芯片集成度的提高,片上系统(SoC)可以将一个完整系统集成到单一芯片上。然而,随着人们对SoC的性能要求的提高,传统的基于总线的互联架构逐渐无法满足现今系统的要求,这成为了系统性能发

展的瓶颈。片上网络(NoC)具有通信性能高、扩展性高和并行能力强等优势,可有效突破基于总线互联架构SoC的瓶颈。NoC架构可分为片上电互连网络(ENoC)和片上光互连网络(ONoC)<sup>[1]</sup>。传统的片上电互连网络存在带宽小、延迟高和功耗高等缺点。与片上电互连相比,片上光互连网络具有更宽的带宽和

收稿日期: 2022-04-11; 修回日期: 2022-05-26; 录用日期: 2022-06-04

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0597)、上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金(2021GZKF005)

通信作者: \*liaoss@cqupt.edu.cn

更低的延迟,能够更好地满足片上系统的性能需求。作为片上光互连网络中的核心元件之一,光路由器受到了越来越广泛的关注和研究。

受到制备难度、尺寸等方面的限制,现有光路由器集成方案中大多将微环谐振器(MRR)<sup>[2-8]</sup>和马赫-曾德尔干涉仪(MZI)<sup>[9]</sup>作为基本单元。Huang等<sup>[3]</sup>提出了基于热光调谐MRR的四端口光路由器。该器件在1530~1565 nm波长范围内,光信噪比均大于11 dB,可实现不同端口之间的互连,但路由器尺寸较大。罗佳莹等<sup>[4]</sup>提出了基于MRR的八端口光路由器方案,最大插入损耗为-0.95 dB,最小信噪比为11.69 dB,尺寸约为70 μm×90 μm。然而,上述两种方案仅能实现一维路由。为了实现更灵活、更多维的调控,Diao等<sup>[5]</sup>提出了一种采用多层耦合MRR的低串扰五端口光路由器(ILCOR)。该方案采用多层耦合的方式减少波导交叉点,从而降低串扰,其最小信噪比约为11 dB。Shi等<sup>[6]</sup>提出了基于MRR的五端口光路由器方案,最大插入损耗为-0.77 dB,最小信噪比为16.81 dB。上述两种方案均可实现二维路由(即光信号切换端口大于两个,理论上光信号可以切换至上下左右任一方向),但都需要级联多个MRR,制作难度较大,工艺要求较高,结构较为复杂,尺寸较大。此外,Jia等<sup>[9]</sup>提出了基于MZI光开关的六端口光路由器,该路由器在1525~1565 nm波长范围内,信噪比均大于13.5 dB,最大插入损耗为-5.6 dB,尺寸为1300 μm×700 μm。

然而,与基于MRR的光路由器方案相比,基于MZI的光路由器方案功耗、损耗和尺寸都更大。综上所述,现有二维路由方案普遍存在尺寸大、制作困难和结构复杂等缺陷。为了解决上述问题,本文提出了一种尺寸小、损耗低的二维路由方案。该方案仅使用单个MRR作为基本路由单元,就能实现对光信号的二维路由。该二维光路由器的最大插入损耗为-0.57 dB,最大串扰为-11.65 dB,尺寸仅为100 μm×65 μm,具有制造简单、易大规模集成等优势,可被广泛应用于信号处理系统、通信系统和互联系统中。

## 2 二维光路由器原理

MRR是一种常见的硅基集成器件,因其紧凑的结构、较低的功耗,在集成光子系统中有广泛的应用。MRR可以实现传感器<sup>[10]</sup>、路由器<sup>[11]</sup>、延迟线<sup>[12]</sup>、滤波器<sup>[13]</sup>、微分器<sup>[14]</sup>和缓存器<sup>[15]</sup>等多种功能。常见的基于MRR的光路由器基本单元通常采用上下加载型微环结构,如图1(a)所示。上下加载型微环结构由两根直波导与一个MRR构成,光从input端输入,当输入的光信号波长满足MRR的谐振条件时,对应的光信号将从drop端输出。加热MRR改变谐振波长可以实现路由切换。该单元只能实现一维路由,虽然可以通过级联多个MRR实现多维路由,但是这无疑会增大面积,提高器件的制作难度。

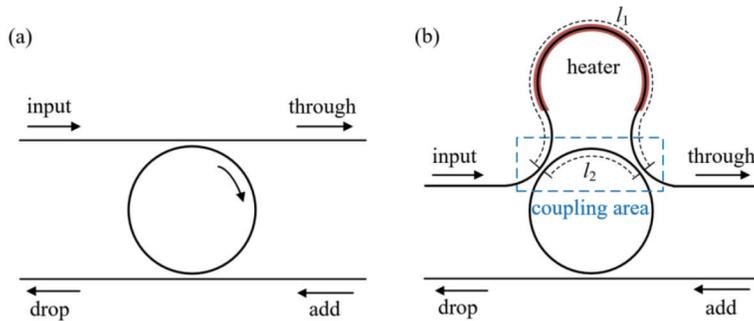


图1 基本路由单元结构。(a)上下加载型微环;(b)两点耦合式微环

Fig. 1 Structural diagram of basic routing unit. (a) Add-drop micro-ring; (b) two-point coupling micro-ring

因此,提出了一种结构简单、尺寸小和制作难度低的二维光路由器方案。该方案的基本单元为一个两点耦合式的上下加载微环谐振器(DC-MRR),如图1(b)所示。当上下加载波导与环形波导具有相同群折射率,且耦合区域上下两臂的长度 $l_1$ 与 $l_2$ 满足 $l_1 - l_2 = 2\pi R/N$ ( $R$ 为微环的半径)时,DC-MRR的自由光谱范围( $R_{FSR_{DC-MRR}}$ )与环形谐振腔的自由光谱范围( $R_{FSR_{ring}}$ )满足的关系式<sup>[16]</sup>为

$$R_{FSR_{DC-MRR}} = R_{FSR_{ring}} \times N, \quad (1)$$

式中: $N$ 为整数。当 $N=3$ 时,DC-MRR与环形谐振腔的传输谱如图2所示。

所提的二维光路由器采用三个基本单元,其原理示意图如图3(a)所示。路由器中存在三个耦合区域和四个交叉波导,其中耦合区域2、3、4中 $N$ 分别取值

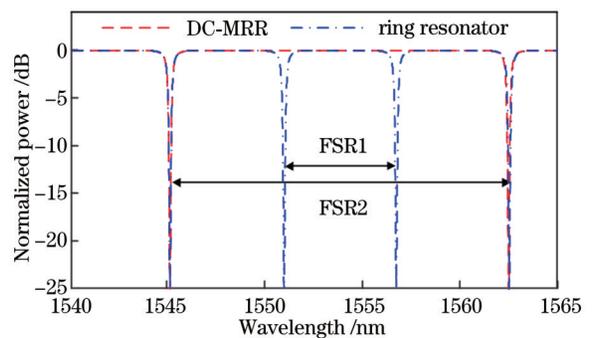


图2 DC-MRR与单个环形谐振腔的传输谱

Fig. 2 Transmission spectra of DC-MRR and single ring resonator

2、3、4。因此,当光信号经过交叉波导进入耦合区域 1 时, A 点传输谱与直通型 MRR 的透过谱类似,如图 3 (b1)中实线所示。此时,满足环形谐振器条件的信号就会进入环形谐振腔中,如  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  和  $\lambda_4$ ,而不满足谐振条件的光信号会经端口 4 输出。对于耦合区域 2,  $N=2$ , B 点传输谱如图 3(b2)中实线所示。因此,进入环形谐振腔的波长为  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  和  $\lambda_4$  的光信号中,波长为  $\lambda_1$  和  $\lambda_3$  的光信号会经端口 6 输出。以此类推,波长为  $\lambda_4$  的光信号会经端口 8 输出,而波长为  $\lambda_2$  的光信号会被持续限制在环形谐振腔中。当对环形谐振腔和各个耦合区域中的弯曲波导进行加热时,可以调控各点处的传输谱和下载端谱线。比如,对环形谐振腔进行加热可以使 A 点传输谱红移,如图 3(b1)中虚线所示。对耦合区域中弯曲波导加热,则可以打破  $l_1$ 、 $l_2$  的长度关

系,此时下载端谱线会退化为普通环形谐振腔的下载端谱线,如图 3(b2)、(b3)中虚线所示。采用这种特性,该结构能够对波长为  $\lambda_2$  的光信号实现二维路由切换,其具体过程:当仅有加热器 4 工作时,波长为  $\lambda_2$  的光信号因不满足此时环形谐振腔的谐振条件,会经两个交叉波导从端口 4 输出,如图 3(b1)所示;当加热器 1 工作时,波长为  $\lambda_2$  的光信号会经过环形谐振器,再经端口 6 输出,如图 3(b2)所示。相似地,调控加热器 2 可使得波长为  $\lambda_2$  的光信号经端口 8 输出,调控加热器 3 可使得波长为  $\lambda_2$  的光信号经端口 2 输出,如图 3(b3)、(b4)所示。事实上,由于采用环形谐振腔,故当信号从任意端口输入时,均可实现二维路由切换,其输出结果与端口 1 输入时类似。

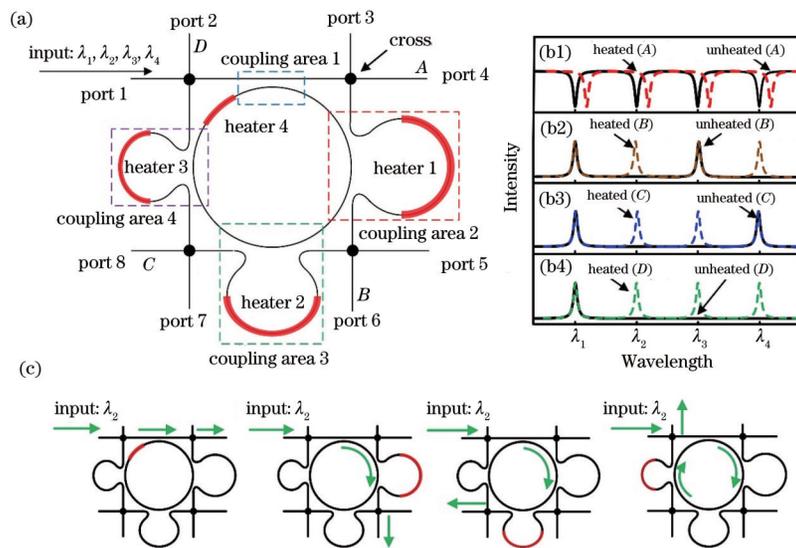


图 3 二维光路由器示意图。(a)结构原理示意图;(b1)~(b4)不同端口传输谱;(c)路由切换示意图

Fig. 3 Schematic diagram of two-dimensional optical router. (a) Structural diagram; (b1)–(b4) transmission spectra of different ports; (c) schematic diagram of routing switching

### 3 二维光路由器仿真

基于第 2 节所述原理,二维路由器的结构设计图如图 4 所示,其中图 4(a)为三维示意图,图 4(b)为俯视图和相关结构参数。该光路由器采用的绝缘体上硅(SOI)的上硅层厚度为 220 nm,掩埋层厚度为 2  $\mu\text{m}$ ,波导厚度为 220 nm。路由器中的波导交叉<sup>[17]</sup>是通过多模波导交叉实现的,即先增大一段锥形波导的宽度,实现交叉,再通过反向拉锥将多模波导逐渐变为单模波导。其中,波导宽度为  $w_0=500$  nm,交叉波导中锥形波导的长度为  $l_1=2.5$   $\mu\text{m}$ ,多模波导的长度为  $l_m=3.7$   $\mu\text{m}$ ,多模波导的宽度为  $w_m=1.9$   $\mu\text{m}$ ,交叉波导的串扰小于 -30 dB。总线波导长度为  $l=100$   $\mu\text{m}$ ,微环的半径为  $r_1=20.5$   $\mu\text{m}$ ,三个耦合区域弯曲波导半径相同,即  $r_2=r_3=r_4=9.5$   $\mu\text{m}$ 。耦合区域 2 的弯曲角度为  $\theta_1=141.2^\circ$ ,上臂长度为  $l_1=79.38$   $\mu\text{m}$ ,下臂长度为  $l_2=15.03$   $\mu\text{m}$ 。耦合区域 3 的弯曲角度为  $\theta_2=130.7^\circ$ ,上臂长度为  $l_3=57.28$   $\mu\text{m}$ ,下臂长度为  $l_4=14.53$   $\mu\text{m}$ 。耦

合区域 4 的弯曲角度为  $\theta_3=123.2^\circ$ ,上臂长度为  $l_5=46.29$   $\mu\text{m}$ ,下臂长度为  $l_6=14.03$   $\mu\text{m}$ 。由于结构参数较多,故本文采用粒子群算法优化各个耦合区域的间隔宽度,最优结果为: $g_1=0.12$   $\mu\text{m}$ , $g_2=0.13$   $\mu\text{m}$ , $g_3=0.16$   $\mu\text{m}$ , $g_4=0.12$   $\mu\text{m}$ 。因此,该二维光路由器的尺寸为 100  $\mu\text{m} \times 65$   $\mu\text{m}$ 。

该二维光路由器的仿真结果如图 5 所示,路由切换的波长为  $\lambda_2=1550.02$  nm,功率均进行归一化处理。对耦合区域部分进行加热会对整体结构的有效折射率产生影响,导致谐振波长发生细微偏移,在发生波长偏移的情况下,可微调环上电极让不同情况下的谐振波长对准。二维光路由器信噪比( $M_{\text{SNR}}$ )可表示为  $M_{\text{SNR}}=M_{\text{IL}}-M_{\text{CT}}$ ,其中  $M_{\text{IL}}$  为插入损耗, $M_{\text{CT}}$  为串扰。为获得更好的消光比,综合调控这 4 个加热器,仿真结果如图 5 所示。图 5(a)为仅加热器 4 工作时,信号由端口 4 输出的情况。此时加热器 4 温度升高 30  $^\circ\text{C}$ ,端口 4 处  $\lambda_2$  的输出功率为 -0.22 dB,消光比为 7 dB,插入损耗为 -0.22 dB。在目标波长  $\lambda_2$  周围的 3.8 nm 带宽

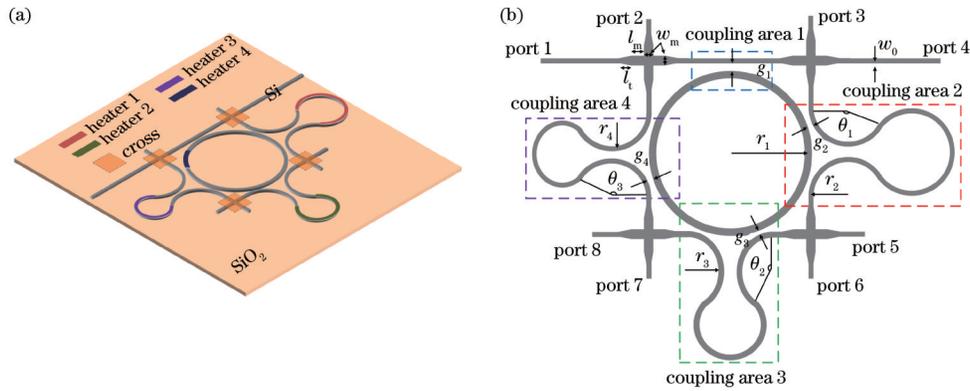


图 4 二维光路由器的结构示意图。(a)三维示意图;(b)俯视图和相关结构参数

Fig. 4 Structural diagram of two-dimensional optical router. (a) Three-dimensional view; (b) top view and related structural parameters

范围内,端口 4 的输出功率变化小于 0.34 dB。端口 2、端口 6 和端口 8 处  $\lambda_2$  的输出功率分别为  $-19.59$  dB、 $-15.69$  dB 和  $-19.59$  dB,因此该路由器的串扰为  $-13.1$  dB,信噪比为 12.88 dB。信号由端口 6 输出的情况如图 5(b)所示,此时加热器 2 和加热器 3 的温度分别升高至  $50$   $^{\circ}\text{C}$  和  $45$   $^{\circ}\text{C}$ ,端口 6 处  $\lambda_2$  的输出功率为  $-0.28$  dB,3 dB 带宽为 72.5 GHz,消光比为 19.22 dB,插入损耗为  $-0.28$  dB。端口 2、端口 4 和端口 8 处  $\lambda_2$  的输出功率分别为  $-23.01$  dB、 $-15.23$  dB 和  $-22.22$  dB,此时该路由器的串扰为  $-13.87$  dB,信噪比为 13.59 dB。图 5(c)和图 5(d)分别为信号由端口 8 和端口 2 输出的情况。在图 5(c)中,加热器 1 和加热器 3 的温度同时升高至  $50$   $^{\circ}\text{C}$ ,端口 8 处  $\lambda_2$  的输出功率为  $-0.52$  dB,3 dB 带宽为 47.5 GHz,消光比为 18.5 dB,插入损耗为  $-0.52$  dB。端口 2、端口 4 和端

口 6 处  $\lambda_2$  的输出功率为  $-36.99$  dB、 $-12.87$  dB 和  $-17.83$  dB,此时该路由器的串扰为  $-11.65$  dB,信噪比为 11.13 dB。当加热器 1、加热器 2 和加热器 4 的温度分别升高  $50$   $^{\circ}\text{C}$ 、 $50$   $^{\circ}\text{C}$  和  $10$   $^{\circ}\text{C}$  时,端口 2 处  $\lambda_2$  的输出功率为  $-0.57$  dB,3 dB 带宽为 50 GHz,消光比为 16.83 dB,插入损耗为  $-0.57$  dB。端口 4、端口 6 和端口 8 处  $\lambda_2$  的输出功率分别为  $-16.83$  dB、 $-18.36$  dB 和  $-18.07$  dB,此时该路由器的串扰为  $-12.93$  dB,信噪比为 12.36 dB。为了验证温度控制偏差情况下,路由器性能的变化。仿真并分析了温度偏差  $\pm 1$   $^{\circ}\text{C}$  和  $\pm 2$   $^{\circ}\text{C}$  时路由器串扰和损耗的变化量,发现:当温度变化  $\pm 1$   $^{\circ}\text{C}$  时,端口 2 的最大串扰变化量为 1.06 dB,其余端口的最大串扰变化量均不超过 1 dB,各个端口的插入损耗改变量均不超过 0.1 dB;当温度变化  $\pm 2$   $^{\circ}\text{C}$  时,端口 2 的最大串扰变化量为 2.52 dB,其余端口的最大

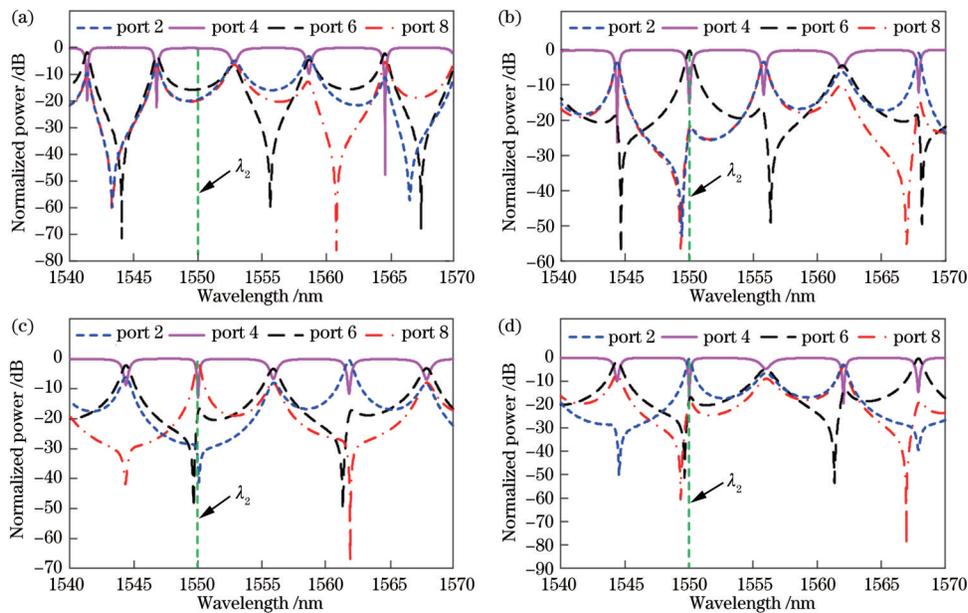


图 5 二维光路由器的仿真结果。(a)信号路由至端口 4 时的传输谱;(b)信号路由至端口 6 时的传输谱;(c)信号路由至端口 8 时的传输谱;(d)信号路由至端口 2 时的传输谱

Fig. 5 Simulated results of two-dimensional optical router. (a) Transmission spectra when signal is routed to port 4; (b) transmission spectra when signal is routed to port 6; (c) transmission spectra when signal is routed to port 8; (d) transmission spectra when signal is routed to port 2

串扰变化量为 1.3 dB, 各个端口的插入损耗改变量均小于 0.15 dB。因此, 只需保证温度偏差在  $\pm 2^\circ\text{C}$  以内, 此时路由器的串扰将保持在  $-10$  dB 以下。

所提的基于单个 MRR 的二维光路由器方案与以往光路由器方案性能的比较如表 1 所示。由表 1 可知, 所提的光路由器的插入损耗均小于  $-0.57$  dB,  $M_{\text{CT}}$  均小于  $-11.65$  dB, 最小  $M_{\text{SNR}}$  为 11.13 dB, 带宽为 47.5 GHz, 尺寸为  $100\ \mu\text{m} \times 65\ \mu\text{m}$ , 即在多种光路由器

方案中所提方案以较小的结构尺寸实现了对光信号的二维路由。文献[4]中提出的光路由器尺寸虽然较小, 但是只能实现一维路由。文献[5]和文献[6]采用了多个微环对光信号实现二维路由,  $M_{\text{IL}}$  分别约为  $-3$  dB 和  $-0.77$  dB, 相比之下, 所提方案在微环数量和  $M_{\text{IL}}$  上有较大优势。所提的二维路由器只需要增加两点耦合区就可以实现端口数的扩展, 也可以通过级联的方式进一步扩展端口数。

表 1 不同光路由器方案的结构性能比较

Table 1 Comparison of structural performance of different optical router schemes

Ref.	Two-dimensional routing	Basic structure	Number of basic structures	Area / $\mu\text{m}^2$	Minimum signal-to-noise ratio / dB	Maximum insertion loss / dB	Bandwidth / GHz
[3]	No	MRR	6	76800	11		25
[4]	No	MRR	28	6300	11.69	$-0.95$	
[7]	No	MRR	12	100000		$-2.5$	50
[8]	No	MRR	24	7000	0.29	$-1.52$	
[9]	No	MZI	12	910000	13.5	$-5.6$	
[5]	Yes	MRR	14		$\sim 11$	$\sim -3$	
[6]	Yes	MRR	15		16.81	$-0.77$	
Our scheme	Yes	MRR	1	6500	11.13	$-0.57$	47.5

## 4 结 论

在片上光网络中, 光路由器能够有效优化信息传输过程, 是提升光通信网络性能的关键元件之一。提出一种基于两点耦合式 MRR 的二维光路由器, 其插入损耗低于  $-0.57$  dB, 带宽为 47.5 GHz, 不同传播路径中最小信噪比为 11.13 dB。该二维光路由器结构仅使用单个 MRR, 尺寸约为  $100\ \mu\text{m} \times 65\ \mu\text{m}$ , 适用于多种网络结构, 可以扩展为  $N$  端口的光路由器。在后续实验中可以通过高速热光调控<sup>[18-19]</sup>或电控提高响应速度, 实现光互连中高速路由切换。同时, 该光路由器具有集成度高、工艺难度低等优势, 能被应用于信号处理系统、通信系统和互联系统中。

### 参 考 文 献

- [1] 李翠婷. 硅基微环谐振光路由器器件及三维光互连网络的设计与模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2017: 1-8.  
Li C T. Design and simulation of silicon based microring resonant optical router and three-dimensional optical interconnection network[D]. Changchun: Jilin University, 2017: 1-8.
- [2] Yao Y H, Cheng Z, Dong J J, et al. Performance of integrated optical switches based on 2D materials and beyond[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2020, 13(2): 129-138.
- [3] Huang L, Gu H X, Tian Y H, et al. Universal method for constructing the on-chip optical router with wavelength routing technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(15): 3815-3821.
- [4] 罗佳莹, 邓军勇, 杨博文, 等. LONE: 一种低损耗无阻塞可扩展的 8 端口光路由器[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 0313001.
- [5] Luo J Y, Deng J Y, Yang B W, et al. LONE: a low-loss, non-blocking, and scalable 8-port optical router[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 0313001.
- [6] Diao X L, Huang L, Tan W, et al. A low-crosstalk optical router using multi-layer coupled MR for ONoC [C]//16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 7-10, 2017, Wuzhen, China. New York: IEEE Press, 2017.
- [7] Shi X H, Wu N, Ge F, et al. Srax: a low crosstalk and insertion loss  $5 \times 5$  optical router for optical network-on-chip[C]//IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 14-17, 2019, Lisbon, Portugal. New York: IEEE Press, 2019: 3102-3105.
- [8] Guo X Q, Wang G C, Dai T G, et al. Scalable nonblocking  $4 \times 4$  silicon optical switch based on dual-microring resonators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(5): 397-400.
- [9] Huang L, Qi S X, Wang K, et al. LACE: a non-blocking on-chip optical router by utilizing the wavelength routing technology[C]//16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 7-10, 2017, Wuzhen, China. New York: IEEE Press, 2017.
- [10] Jia H, Zhou T, Zhao Y C, et al. Six-port optical switch for cluster-mesh photonic network-on-chip[J]. Nanophotonics, 2018, 7(5): 827-835.
- [11] 刘春娟, 桑常林, 吴小所, 等. 一维光子晶体槽型微环谐振器及其传感特性[J]. 光学学报, 2020, 40(24):

2413002.  
Liu C J, Sang C L, Wu X S, et al. One-dimensional photonic crystal groove microring resonators and its sensing characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(24): 2413002.
- [11] Asadinia S, Mehrabi M, Yaghoubi E. Surix: Non-blocking and low insertion loss micro-ring resonator-based optical router for photonic network on chip[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2021, 77(5): 4438-4460.
- [12] McKay L, Merklein M, Liu Y, et al. Integrated microwave photonic true-time delay with interferometric delay enhancement based on Brillouin scattering and microring resonators[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 36020-36032.
- [13] 张福领, 翟珊, 潘俊, 等. 类 Sagnac 干涉仪结构的三维多微环谐振滤波器 [J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1113003.  
Zhang F L, Zhai S, Pan J, et al. Three-dimensional multi-microring resonance filter based on Sagnac-like interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1113003.
- [14] 陈梦, 李静, 张若虎, 等. 硅基级联双微环的分数阶微分器[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 090701.  
Chen M, Li J, Zhang R H, et al. Fractional-order differentiator using silicon-based cascaded dual microrings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 090701.
- [15] 孙超. 高速硅基光缓存器的研究[D]. 南京: 东南大学, 2018: 3-19.  
Sun C. The study of high speed silicon-based optical buffer[D]. Nanjing: Southeast University, 2018: 3-19.
- [16] Popović M. Theory and design of high-index-contrast microphotonic circuits[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2008: 244-247.
- [17] Johnson M, Thompson M G, Sahin D. Low-loss, low-crosstalk waveguide crossing for scalable integrated silicon photonics applications[J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 12498-12507.
- [18] Schall D, Mohsin M, Sagade A A, et al. Infrared transparent graphene heater for silicon photonic integrated circuits[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 7871-7878.
- [19] Gupta R K, Das B K. Performance analysis of metal-microheater integrated silicon waveguide phase-shifters [J]. *OSA Continuum*, 2018, 1(2): 703-714.