

# 超紧凑聚合物五端口光路由器的分析模拟

郑传涛 罗倩倩 黄小亮 梁 磊 王一丁 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联合实验室, 吉林 长春 130012)

**摘要** 构建了一种五端口聚合物光路由器, 由于四种不同半径的交叉耦合双环谐振器的谐振作用, 该器件可完成二维平面内对四个信道波长的定点路由功能。由于聚合物材料和左右覆层材料具有较大的折射率差, 四种微环的半径可小至  $14\ \mu\text{m}$ , 波导模式振幅弯曲损耗小于  $10^{-4}\ \text{dB/cm}$ 。当不同信道波长沿不同端口输入时, 得到了波长与路由链路的关系。计算结果表明, 各信道波长沿各路由链路的插入损耗为  $0.03\sim 0.62\ \text{dB}$ , 各路由链路 on 端口和其他 off 端口的最大串扰小于  $-39\ \text{dB}$ , 器件的尺寸约为  $626\ \mu\text{m}\times 495\ \mu\text{m}$ 。与已报道的硅光路由器相比, 该聚合物器件具有相似的微环半径和封装尺寸, 且由于零静态功耗、低串扰、低损耗和处理工艺简单、价格低廉等优势, 该器件在光片上网络中具有潜在的应用价值。

**关键词** 集成光学; 光路由; 微环谐振器; 插入损耗; 串扰

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0313001

## Analysis and Simulation of an Ultra-Compact Polymer Five-Port Optical Router

Zheng Chuantao Luo Qianqian Huang Xiaoliang Liang Lei

Wang Yiding Zhang Daming

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

**Abstract** Routing scheme of a kind of polymer five-port optical router is proposed, and it can optically route four channel wavelength data streams along certain definite-path in two-dimensional (2D) plane, owing to the resonance function of cross-coupling two-ring resonators with four different ring radii. Due to the large contrast between polymer core refractive index and the left/right cladding index, the four ring radii are as small as  $14\ \mu\text{m}$ , and the mode amplitude bending loss is as low as  $10^{-4}\ \text{dB/cm}$ . Under the case of lights with different wavelengths inputting into different ports, the relationships between wavelength and routing path are derived. Simulation results on the device reveal that the insertion losses of each channel wavelength along each routing path are within the range of  $0.03\sim 0.62\ \text{dB}$ , the maximum crosstalk between the on-port along each routing path and other off-ports is less than  $-39\ \text{dB}$ , and the device footprint size is about  $626\ \mu\text{m}\times 495\ \mu\text{m}$ . Compared with the previously reported silicon optical routers, this device possesses similar ring radius and similar device size. In addition, because of zero static power consumption, low crosstalk and insertion loss, simple processing technology and low cost, the proposed device shows potential applications in optical networks-on-chip (NoC).

**Key words** integrated optics; optical router; microring resonator; insertion loss; crosstalk

**OCIS codes** 130.0250; 130.4815

## 1 引 言

在片上多核处理器系统中, 光片上网络(NoC)

成为增大传输带宽、减小延时以及降低功耗(PC)的有效措施, 利用光网络连接各处理器核可获得并行

收稿日期: 2013-07-01; 收到修改稿日期: 2013-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(61107021)、教育部博士点基金(20110061120052, 20120061130008)、中国博士后科学基金(20090491299, 2012T50297)、吉林省科技发展计划(20130522161JH)、吉林大学基本科研业务费项目(201103076)

作者简介: 郑传涛(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事聚合物集成光电子器件与系统方面的研究。

E-mail: zhengchuantao@jlu.edu.cn

处理系统的极限容量<sup>[1-2]</sup>。光片上网络中的一个关键器件是光路由器<sup>[3-4]</sup>,它可根据入射光信号的波长和输入端口选择其输出端口,从而实现路由功能。利用微环谐振器(MRR)<sup>[5-8]</sup>,人们报道了有源<sup>[9]</sup>和无源<sup>[10]</sup>光路由器,在应用中二者各有优势。对于有源光路由器而言,器件各微环半径相同,工作波长为单一谐振波长(或满足自由光谱区间隔的谐振波长),依靠电或热调谐折射率来改变光束传输路径,因此可扩性强且体积小,然而器件存在静态功耗;对于无源光路由器而言,器件微环半径不同,含有多个工作波长,依靠微环的谐振作用,完成对特定波长光的定点路由功能,该类器件不需调谐因而功耗为零,然而它一般需要较多的开关单元和波导交叉点来实现复杂的路由功能,导致器件尺寸较大且可扩性较差。

当无源路由器端口数量一定时,波导交叉点和微环的数量是评价该器件设计方案的主要指标。为了减少微环个数,本文优化设计并模拟分析了一种超小尺寸的五端口聚合物微环谐振光路由器,它可完成对四个信道波长的路由作用。相比传统型<sup>[11]</sup>和改进型<sup>[12]</sup>的交叉/直通式(Crossbar)五端口路由器,该器件使用的微环个数分别从 25 个和 20 个减少至 16 个。给出了双环交叉耦合基本路由单元的结构,并对其做了优化和模拟;利用四种不同半径的双环交叉耦合基本路由器单元和一定的网状拓扑结构,优化设计了一种五端口光路由器,对器件的插入

损耗和串扰(CT)做了详细的表征和分析。

## 2 器件结构与参数优化

### 2.1 基本单元结构

图 1(a)给出了  $2 \times 2$  波长选择性交叉耦合双环谐振器的结构,它也是构建五端口路由器的基本单元。MRR 波导和信道波导耦合点处的横截面如图 1(b)所示。它是由 1 条水平信道、1 条垂直信道和 2 个半径相等的微环构成的。令水平信道输入端口及垂直信道输入端口到与其临近的耦合点的距离相等,皆为  $L_1$ ,两个微环的半径均为  $R$ (该值也决定谐振波长)。为了使信道和微环具有近似相同的传播常数,二者的芯宽度稍有差别,这是由微环的弯曲造成的。除此之外,信道波导与微环波导的其他参数皆相同。在波长 1550 nm 附近,聚合物芯层材料<sup>[13]</sup>折射率  $n_{10} = 1.59$ ,材料的振幅衰减系数  $\alpha_{10} = 0.25$  dB/cm;聚合物缓冲层材料<sup>[14]</sup>折射率  $n_{20} = 1.461$ ,材料的振幅衰减系数  $\alpha_{20} = 0.25$  dB/cm;左、右覆层材料为空气,折射率  $n_{30} = 1$ ,材料的振幅衰减系数  $\alpha_{30} = 0$ 。设计中选取主模为  $E_{00}^y$ 。根据对介质吸收型(即考虑各层材料的损耗系数)矩形波导的分析理论<sup>[15]</sup>,上述折射率和振幅衰减系数将用于微环波导和信道波导中模式有效折射率和模式振幅衰减系数的计算。

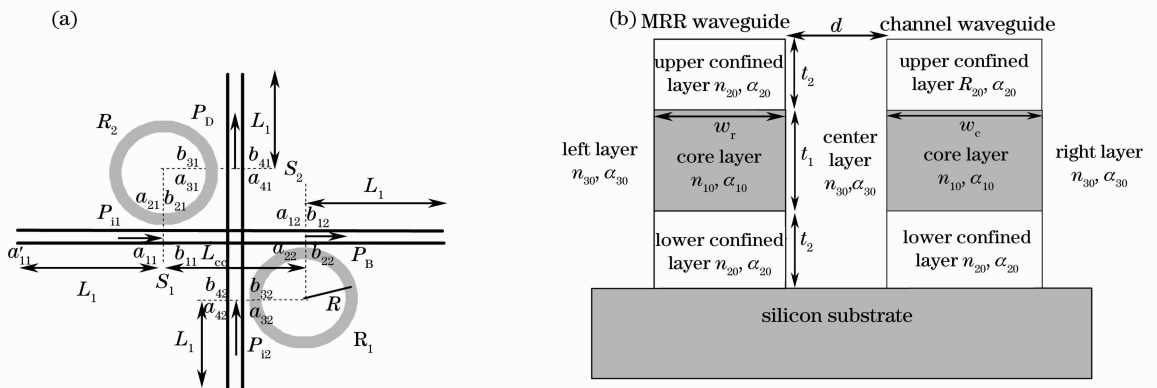


图 1 (a)交叉耦合双环谐振器的结构;(b)微环波导与信道波导的耦合点的截面结构

Fig. 1 (a) Structure of the cross-coupled two-ring resonator; (b) cross-section view over the coupling region between the MRR waveguide and the channel waveguide

表 1 基本微环路由单元的优化参数列表

Table 1 Optimized parameter list of the basic MRR routing element

Parameter	Value	Parameter	Value
Core thickness $t_1/\mu\text{m}$	1.7	Resonance order $m$	85
Channel core width $w_c/\mu\text{m}$	2.03	Transmittance coefficient $t$	0.99624
MRR core width $w_r/\mu\text{m}$	1.7	Coupling coefficient $\kappa$	0.08664
Buffer thickness $t_2/\mu\text{m}$	2.0	Coupling gap $d/\mu\text{m}$	0.14

## 2.2 参数优化

在优化器件的结构参数时主要考虑如下因素：

1)微环与信道波导中的单模传输；2)微环与信道波导中的相速匹配；3)合适的微环弯曲半径以确保较小的弯曲损耗；4)微环与信道间合适的耦合间距以确保合适的振幅耦合率和透射率。综合上述因素，采用对矩形波导<sup>[15]</sup>和弯曲波导<sup>[16]</sup>的分析方法，优化选取的结构参数如表1所示。

## 2.3 理论分析

针对图1所示的微环谐振器，由于信号光从左端口输入与从下端口输入的情况类似，仅分析信号光从水平信道左端口输入的情况，并对其做详细的理论推导。针对第一个微环( $R_1$ )，令 $R$ 为微环的弯曲半径， $a_{11}$ 为水平信道左端口的输入光振幅， $b_{11}$ 为水平信道右端口输出光振幅， $a_{21}$ 、 $b_{21}$ 、 $a_{31}$ 、 $b_{31}$ 、 $a_{41}$ 、 $b_{41}$ 如图1(a)所示；针对第二个微环( $R_2$ )，令 $a_{12}$ 为水平信道左端口的输入光振幅， $b_{12}$ 为水平信道右端口输出光振幅， $a_{22}$ 、 $b_{22}$ 、 $a_{32}$ 、 $b_{32}$ 、 $a_{42}$ 、 $b_{42}$ 如图1(a)所示。定义 $\kappa$ 、 $t$ 分别为信道与微环间的振幅耦合率和振幅透射率，满足 $\kappa^2 + t^2 = 1$ 。光通过截面 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 的输入、输出振幅之间有如下关系：

$$b_{11} = ta_{11} - j\kappa b_{31} \exp(-j\varphi_1), \quad (1)$$

$$b_{21} = -j\kappa a_{11} + tb_{31} \exp(-j\varphi_1), \quad (2)$$

$$b_{31} = -j\kappa a_{41} + tb_{21} \exp(-j\varphi_2), \quad (3)$$

$$b_{41} = ta_{41} - j\kappa b_{21} \exp(-j\varphi_2), \quad (4)$$

$$b_{12} = ta_{12} - j\kappa b_{32} \exp(-j\varphi_2), \quad (5)$$

$$b_{22} = -j\kappa a_{12} + tb_{32} \exp(-j\varphi_2), \quad (6)$$

$$b_{32} = tb_{22} \exp(-j\varphi_1), \quad (7)$$

$$b_{42} = -j\kappa b_{22} \exp(-j\varphi_1), \quad (8)$$

$$a_{41} = b_{42} \exp(-j\psi_2), \quad (9)$$

$$a_{12} = b_{11} \exp(-j\psi_2), \quad (10)$$

$$a_{42} = 0, \quad (11)$$

式中 $\varphi_1 = 1.5\pi R(\beta_R - j\alpha_R)$ ， $\varphi_2 = 0.5\pi R(\beta_R - j\alpha_R)$ ， $\psi_2 = L_{cc}(\beta_c - j\alpha_c)$ ， $\beta_c$ 为信道波导中模式传播常数， $\beta_R$ 为微环波导中模式传播常数，且二者近似相等； $\alpha_c$ 为信道波导中基模振幅损耗系数， $\alpha_R$ 为微环波导中基模振幅损耗系数，在波长1550 nm处二者约为0.256 dB/cm； $L_{cc}$ 为水平或竖直信道上两耦合点的距离(如图1中标注所示)。联立(1)~(11)式，可得基本单元的振幅传递函数为

$$U = \frac{b_{12}}{a_{11}} = \frac{tf_1 \{f_1 - k^2 \exp[-j(\varphi_1 + \varphi_2)]\}}{f_2}, \quad (12)$$

$$V = \frac{b_{41}}{a_{11}} = -\frac{k^2 f_2 \exp(-j\varphi_2) + t^2 k^2 \exp[-j(\varphi_1 + 2\psi_2)] \{f_1 - k^2 \exp[-j(\varphi_1 + \varphi_2)]\}^2}{f_1 f_2}, \quad (13)$$

式中

$$f_1 = 1 - t^2 \exp[-j(\varphi_1 + \varphi_2)], \quad (14)$$

$$f_2 = f_1^2 - k^4 \exp[-j(2\varphi_1 + 2\psi_2)] \{f_1 + t^2 \exp[-j(\varphi_1 + \varphi_2)]\}, \quad (15)$$

相应的两端口的归一化输出功率定义为

$$P_B = 10 \lg(|U|^2), \quad P_D = 10 \lg(|V|^2). \quad (16)$$

## 2.4 五端口路由结构、工作波长和弯曲半径

本文设计的五端口定点路由，需要四个工作波长，相应的共需要四个如图1所示的基本路由单元(分别编号为1、2、3、4)，它们之间的区别仅在于微环的弯曲半径不同。图2显示了所设计的五端口聚合物微环谐振光路由器的平面结构，它共含有8个交叉耦合双环谐振路由单元(共有16个微环)，各基本单元的谐振波长如图2所示。每个端口包含一个输入端口和一个输出端口，分别用 $I_i$ 和 $O_i$ 表示。设计中，各基本路由单元的相关参数仍由表1给出。各端口输入、输出波导的长度 $L_1 = 100 \mu\text{m}$ ；两相邻微环的中心间距 $L_2 = 100 \mu\text{m}$ ； $L_3$ 和 $L_4$ 为1/4圆周

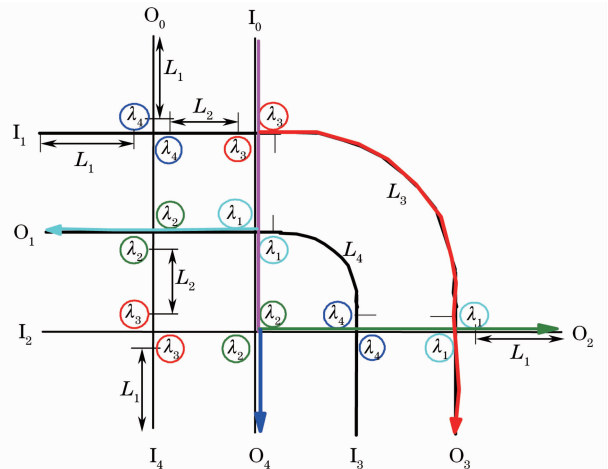


图2 五端口聚合物微环谐振光路由器的结构

Fig. 2 Structure of the five-port polymer MRR optical router

长度,弯曲半径分别取为  $100 \mu\text{m}$  和  $200 \mu\text{m}$ ,故  $L_3 = 157.08 \mu\text{m}$ ,  $L_4 = 314.16 \mu\text{m}$ 。

图 3 显示了微环波导中的模式有效折射率和弯曲半径随谐振波长的变化特性,计算中取谐振级数为  $m=85$ 。由图中可见,当谐振波长增大时,微环的弯曲半径随之增大,模式有效折射率随之减小。设计中选取的谐振波长和对应的微环弯曲半径如表 2 所示。可以发现,在四个谐振波长处,微环的弯曲半径约为  $14 \mu\text{m}$ ,这主要是由于聚合物芯层(折射率为 1.59)和左右覆层(折射率为 1.0)存在较大的折射率差,这使得微环在水平方向上可取较小的弯曲半径。同时,由于微环在竖直方向并未发生弯曲,因此波导芯层和上/下缓冲层的折射率差可以不要求太大。为了便于表述,定义波长为  $1550 \text{ nm}$  的信道为信道 1,波长为  $1552 \text{ nm}$  的信道为信道 2,波长为  $1554 \text{ nm}$  的信道为信道 3,波长为  $1556 \text{ nm}$  的信道为信道 4。

### 2.5 四个基本路由单元的传输特性

图 4(a)~(d) 显示了四个路由单元两端口(定义为 drop 端口和 thr 端口)的输出光功率随传输波长的变化曲线。由图 4(a)可以看出,在该单元的谐

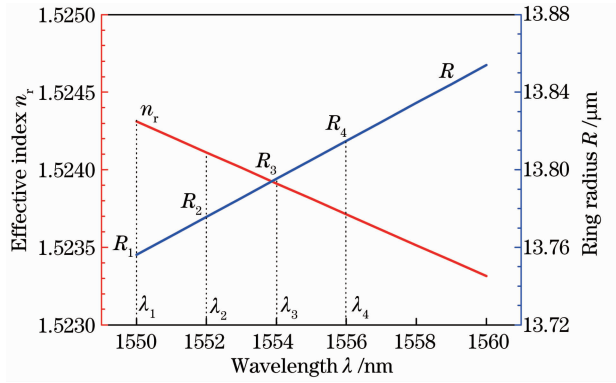


图 3 微环的弯曲半径和微环波导中模式有效折射率随谐振波长的变化曲线

Fig. 3 Curves of ring radius and MRR waveguide mode effective index versus resonance wavelength

表 2 四个基本路由单元的谐振波长与微环半径

Table 2 Resonance wavelengths and ring radii of the four basic routing elements

Channel number	Channel wavelength /nm	Ring radius / $\mu\text{m}$	Mode effective index
1	1550	13.756	1.52431
2	1552	13.775	1.52411
3	1554	13.795	1.52391
4	1556	13.815	1.52371

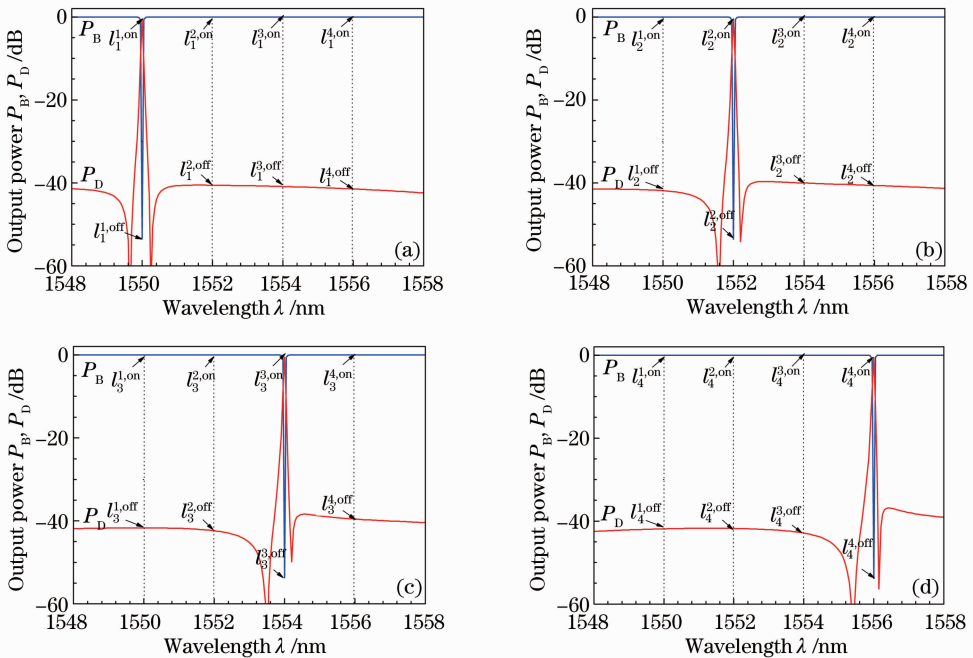


图 4 谐振波长为(a)  $1550 \text{ nm}$ 、(b)  $1552 \text{ nm}$ 、(c)  $1554 \text{ nm}$ 、(d)  $1556 \text{ nm}$  基本路由单元的光谱特性

Fig. 4 Spectral characteristics of the four basic routing elements whose resonance wavelengths are (a)  $1550 \text{ nm}$ , (b)  $1552 \text{ nm}$ , (c)  $1554 \text{ nm}$  and (d)  $1556 \text{ nm}$

振波长  $\lambda_{c1} = 1550$  nm 处,由水平信道输入的满足谐振波长的光经过微环几乎全部耦合进入 drop 端口, thr 端口的输出功率几乎为 0,器件呈现 drop 状态。在其他三个非谐振信道波长处( $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ ), thr 端口的输出功率达到最大,而 drop 端口的输出功率几乎为 0。观察图 4(b)~(d)可得到类似结论。

为了描述第  $i$  个基本路由单元对所选择的四个

表 3 四个基本路由单元在四个信道波长处 on 与 off 状态的损耗参数(单位: dB)

Table 3 Loss parameters of the four routing elements at the four channel wavelengths under on and off states (unit: dB)

		Channel wavelength number $j$							
		1, on	1, off	2, on	2, off	3, on	3, off	4, on	4, off
Routing element $i$	1	0.584	53.444	0.002	40.566	0.002	40.891	0.002	41.470
	2	0.002	41.886	0.580	53.573	0.002	40.045	0.002	40.640
	3	0.002	41.658	0.002	42.368	0.575	53.697	0.002	39.550
	4	0.002	41.878	0.002	41.788	0.001	42.898	0.570	53.813

### 3 五端口路由器性能模拟

#### 3.1 路由功能

当波长为  $\lambda_{c1}, \lambda_{c2}, \lambda_{c3}, \lambda_{c4}$  的四种信号光一起从某一输入端口输入时,它们将分别从某一固定端口输出,称该功能为定点路由功能。例如,当四个波长的光一起从  $I_0$  端口输入时,按照图 2 所标注的路由线路,将分别从端口  $O_1, O_2, O_3$  和  $O_4$  输出。当四个波长的光一起从其他端口输入时,器件的定点路由链路如表 4 所示。

表 4 五端口微环光路由器的定点路由操作

Table 4 Definite-path routing operations of the five-port MRR optical router

		Output				
		$O_0$	$O_1$	$O_2$	$O_3$	$O_4$
Input	$I_0$	/	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$
	$I_1$	$\lambda_4$	/	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
	$I_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	/	$\lambda_1$	$\lambda_2$
	$I_3$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	/	$\lambda_1$
	$I_4$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	/

#### 3.2 插入损耗

插入损耗是衡量路由器性能的主要指标之一,当某一波长的光从特定端口输入时,按照预定路由链路它将从某一特定端口输出,插入损耗则定义为该端口输出光功率与输入光功率的比值(用 dB 表示)。仍以端口  $I_0$  输入为例,当四种波长的光从该端口输入时,根据表 4 所示的定点路由功能,四种光将分别从端口  $O_1, O_2, O_3$  和  $O_4$  输出且功率达到最大(称为 on 状态)。定义  $P_i^{\lambda_k}$  为单位功率且波长为  $\lambda_k$  的光(0 dB)从  $i$  端口输入且从  $j$  端口输出时的光

信道波长( $\lambda_j$ )的光的传输特性,定义如下损耗参数: $L_{\lambda_j}^{\text{on}}$  表示波长为  $\lambda_j$  的光在谐振波长为  $\lambda_{ci}$  的基本路由单元作用下呈 on 状态的损耗; $L_{\lambda_j}^{\text{off}}$  表示波长为  $\lambda_j$  的光在谐振波长为  $\lambda_{ci}$  的基本路由单元作用下呈 off 状态的损耗。由此,共可得到 32 个损耗参数,根据图 3 的计算结果,各个损耗数值如表 3 所示。

功率,则定义具有最大输出光功率端口的损耗为该波长光的插入损耗,即

$$L_i^{\lambda_k} = -1 \times P_i^{\lambda_k}, \quad (17)$$

式中  $P_i^{\lambda_k} = \max_j P_i^{j,\lambda_k}$ 。因此只要确定了定点路由端口的输出光功率即可计算出插入损耗。为此,可利用循迹法,即综合光束走过的波导线路和交叉结点,由此计算出总的损耗,即可确定输出功率。计算了光从不同端口输入时,各信道波长从特定路由端口(称为 on 端口)输出时的插入损耗,如图 5(a)~(e)所示。可以看出,各信道呈现出近似均一的插入损耗,其最大值约为 0.62 dB,最小值约为 0.03 dB。

#### 3.3 串扰

当某个波长的光从特定端口输入时,按照定点路由功能,它将从某一特定端口(称为 on 端口)输出,除该端口外,其他端口(称为 off 端口)输出的光对 on 端口形成串扰。定义其他 off 端口中具有最大输出光功率的端口对 on 端口形成的串扰为该波长的光从  $i$  端口输入时的串扰,即

$$C_i^{\lambda_k} = \frac{\max_{j \neq i} P_i^{j,\lambda_k}}{P_i^{\lambda_k}}. \quad (18)$$

当光从不同端口输入时,各信道波长串扰的计算结果仍如图 5 所示。在 5 种输入情况下,各信道波长的最大串扰分别小于 -39.6、-40.5、-40.1、-40.1、-39.6 dB。

#### 3.4 器件尺寸

对于半径为  $R_1$  的交叉耦合双环谐振器,两水平或垂直耦合点的距离为

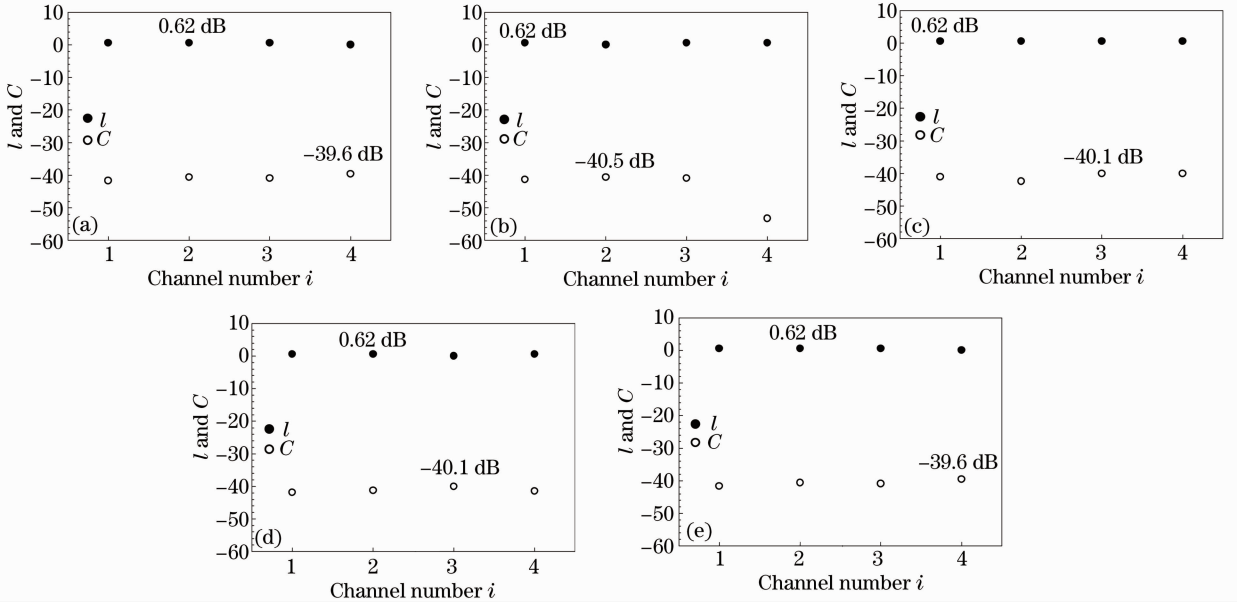


图 5 各路由端口 (on 端口) 的插入损耗以及其他 off 端口与该 on 端口最大串扰。(a) 光从  $I_0$  口输入; (b) 光从  $I_1$  口输入; (c) 光从  $I_2$  口输入; (d) 光从  $I_3$  口输入; (e) 光从  $I_4$  口输入

Fig. 5 Insertion losses of definite routing port (on port) and the maximum crosstalk of this on-port relative to other off-ports, where the light is launched from port (a)  $I_0$ , (b)  $I_1$ , (c)  $I_2$ , (d)  $I_3$  and (e)  $I_4$

$$L_{cc,i} = 2 \left( R_i + \frac{\omega_r}{2} + d + \frac{\omega_c}{2} \right), \quad (19)$$

因此, 器件在水平方向的长度为

$$L_W = 2L_1 + 3L_2 + \sum_{i=1}^4 L_{cc,i} = 626.3 \mu\text{m}, \quad (20)$$

器件在垂直方向的宽度为

$$L_H = 2L_1 + 2L_2 + \sum_{i=2}^4 L_{cc,i} = 494.8 \mu\text{m}, \quad (21)$$

进而器件的封装尺寸约为  $0.31 \text{ mm}^2$ 。

### 3.5 对比和讨论

如表 5 所示, 将本文设计的五端口四信道路由器和文献[5, 7-8, 14]报道的四端口或五端口路由器的性能做了对比, 表中 ER 为消光比。根据对比结果, 可得如下结论: 1) 相比其他四种 Si 器件, 本文器件使用聚合物材料, 这将最大化地利用聚合物材料处理工艺简单、成膜性好、价格低廉等优势。2) 四种 Si 光路由器使用热光 (TO) 效应调节材料折射率, 进而改变信号光的传输路径; 而本文给出的器件

主要依据微环的半径不同, 进而实现对不同波长的光的路由功能。3) 本文利用聚合物材料和左右覆层材料具有较大的折射率差的特点, 使微环的弯曲半径小于  $14 \mu\text{m}$ , 该半径与 Si 材料微环的半径处于相同量级, 因此器件的尺寸较小, 约为  $0.31 \text{ mm}^2$ 。4) 文献[4, 9, 17-18]报道的 Si 路由器由于需要热调谐, 因此器件存在静态功耗, 而本文设计的器件不需要加电控制, 因此静态功耗为 0。5) 同实验报道的四种 Si 路由器相比, 本文设计的五端口路由器在理论上展现出良好的性能, 如器件的最大串扰小于  $-39.6 \text{ dB}$ , 最大插入损耗小于  $0.62 \text{ dB}$ 。另外, 为了保证实际制备器件的性能, 器件结构尺寸及其精度将十分重要, 如微环波导与信道波导的耦合间距 ( $0.14 \mu\text{m}$ ) 与耦合系数 (0.08664)、微环的弯曲半径 ( $14 \mu\text{m}$ ) 等。可采用激光束直写<sup>[19]</sup>工艺来制备器件以保证纳米量级的工艺精度, 且该技术不需掩模板因此制备速度快。

表 5 文献中报道的  $4 \times 4$  和  $5 \times 5$  Si 信道波长路由器和本文报道的  $5 \times 5$  聚合物光路由器的对比结果

Table 5 Comparison among the reported  $4 \times 4$  and  $5 \times 5$  silicon channel wavelength routers and the proposed  $5 \times 5$  polymer optical router

Device /Ref.	Material	Ring radius / $\mu\text{m}$	Routing type	PC /mW	Device area / $\text{mm}^2$	CT or ER /dB
$4 \times 4$ router / [17]	Silicon	10	TO active	6.5	0.16	$>20$ (ER)
$4 \times 4$ router / [4]	Silicon	10	TO active	Not shown	Not shown	$>8$ (ER)
$4 \times 4$ router / [9]	Silicon	10	TO active	10.37	Not shown	$<-13$ (CT)
$5 \times 5$ router / [18]	Silicon	10	TO active	Not shown	0.29	$>16$ (ER)
$5 \times 5$ router / [this]	Polymer	13.7~13.9	Passive	0	0.31	$<-39.6$ (CT)

## 4 结 论

利用 8 组交叉耦合双环谐振器,优化设计并模拟分析了一种五端口聚合物光路由器,它可完成对四个信道波长的定点路由,即当四种信号光从不同端口输入时,按照设计结构,各输入光可从指定的端口输出。由于聚合物材料和左右覆层材料具有较大的折射率差,使得微环的弯曲半径小于  $14\ \mu\text{m}$ ,器件的尺寸约为  $0.31\ \text{mm}^2$ ,波导弯曲损耗小于  $10^{-4}\ \text{dB/cm}$ 。各信道波长沿各路由链路的插入损耗为  $0.03\sim 0.62\ \text{dB}$ ,各路由链路 on 端口和其他 off 端口的最大串扰小于  $-39\ \text{dB}$ 。与具有相同或相近端口数的 Si 材料光路由器相比,本文设计的五端口光路由由于具有零静态功耗、低串扰和材料处理工艺简单等优势在光片上网络中具有潜在的应用。

## 参 考 文 献

- 1 A Shacham, K Bergman, L P Carloni. On the design of a photonic network-on-chip [C]. First International Symposium on Networks-on-Chip, 2007. 53-64.
- 2 R G Beausoleil, P J Kuekes, G S Snider, *et al.*. Nanoelectronic and nanophotonic interconnect [J]. Proc IEEE, 2008, 96(2): 230-247.
- 3 X Tan, M Yang, L Zhang, *et al.*. A generic optical router for photonic networks-on-chips [J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(3): 368-376.
- 4 A Biberman, B G Lee, N S Droz, *et al.*. Broadband operation of nanophotonic router for silicon photonic networks-on-chip [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 22(12): 926-928.
- 5 Ren Yan, Song Muping. Optical NRZ-to-RZ modulation format conversion based on cross-phase modulation effects in silicon micro-ring resonator [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706002.  
任 艳, 宋牟平. 基于硅基微环谐振器交叉相位调制效应的非归零信号到归零信号光调制格式转换[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706002.
- 6 Liu Yi, Tong Xiaogang, Yu Jinlong, *et al.*. All-optical switching in silicon-on-insulator serially coupled double-ring resonator based on thermal nonlinear effect [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205006.  
刘 毅, 仝晓刚, 于晋龙, 等. 基于热非线性效应的硅基串联双微环谐振腔全光开关 [J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205006.

- 7 Li Zhiquan, Li Xiaoyun, Sun Yuchao, *et al.*. Doubled free spectral range of single micro-ring resonator filter [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0723001.  
李志全, 李晓云, 孙宇超, 等. 自由光谱范围加倍的单微环谐振滤波器 [J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0723001.
- 8 Han Xiuyou, Wang Linghua, Wang Yu, *et al.*. Research of notch filter based on polymer micro-ring waveguide [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706006.  
韩秀友, 王凌华, 王 瑜, 等. 聚合物波导微环陷波滤波器研究 [J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706006.
- 9 R Ji, L Yang, Y Tian, *et al.*. Microring-resonator-based four-port optical router for photonic networks-on-chip [J]. Opt Express, 2011, 19(20): 18945-18955.
- 10 R Min, R Ji, Q Chen, *et al.*. A universal method for constructing  $N$ -port nonblocking optical router for photonic networks-on-chip [J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(23): 3736-3741.
- 11 A W Poon, F Xu, X Luo. Cascaded active silicon microresonator array cross-connect circuits for WDM networks-on-chip [C]. SPIE, 2008, 6898: 689812.
- 12 A W Poon, F Xu, X Luo. Cascaded microresonator-based matrix switch for silicon on-chip optical interconnection [J]. Proc IEEE, 2009, 97(7): 1216-1238.
- 13 G Xu, Z Liu, J Ma, *et al.*. Organic electro-optic modulator using transparent conducting oxides as electrodes [J]. Opt Express, 2005, 13(19): 7380-7385.
- 14 C Pitois, S Vukmirovic, A Hult, *et al.*. Low-loss passive optical waveguides based on photo-sensitive poly(pentafluorostyrene-co-glycidyl methacrylate) [J]. Macromolecules, 1999, 32(9): 2903-2909.
- 15 E A J Marcatil. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics [J]. Bell Syst Technol J, 1969, 48(7): 2071-2102.
- 16 A Melloni, F Carniel, R Costa, *et al.*. Determination of bend mode characteristics in dielectric waveguides [J]. J Lightwave Technol, 2001, 19(4): 571-577.
- 17 N S Droz, H Wang, L Chen, *et al.*. Optical  $4\times 4$  hitless silicon router for optical networks-on-chip (NOC) [J]. Opt Express, 2008, 16(20): 15915-15922.
- 18 R Ji, L Yang, L Zhang, *et al.*. Five-port optical router for photonic networks-on-chip [J]. Opt Express, 2011, 19(21): 20258-20268.
- 19 Li Xian, Yuan Yufeng, Li Shu, *et al.*. Opto-fluidic tactile sensor array by laser direct writing [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0313001.  
李 贤, 袁余锋, 李 书, 等. 基于激光直写的微流光学触摸传感阵列 [J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0313001.

栏目编辑: 王晓球