

基于改进型并联微环阵列的路由器设计

刘春娟, 穆洲*, 孙贇贇

兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要 提出了半径按比例依次增大的改进型并联微环阵列,研究了其滤波信道的切换和路由方法,实现了并联微环滤波信道的灵活切换和路由。利用传输矩阵法,分析了并联微环和改进型并联微环阵列的传输特性,并采用MATLAB对改进型三微环阵列滤波信道的路由方法进行了分析。结果表明,当相邻的两个微环满足相消干涉条件时,滤波信道关闭,对应波长的光不能通过;当两个相邻微环满足相长干涉条件时,滤波信道打开,对应波长的光可以通过。设计了由4个改进型微环阵列构成的 2×2 路由器。

关键词 光学器件; 改进型并联微环阵列; 传输矩阵法; 布拉格谐振; 切换; 路由器

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.092301

Design of Router Based on Improved Parallel Microring Array

Liu Chunjuan, Mu Zhou*, Sun Yunyun

School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract In this study, we propose an improved parallel microring antenna array with increasingly wide rings, and we also study the switching and routing methods for the filter channels. Herein, we achieve flexible switching and routing of the filter channels of the parallel microrings. Further, the transmission characteristics of the parallel microring arrays with and without the proposed improvement are analyzed using the transfer matrix method. The routing method of the filter channel of the improved three-microring array is then numerically analyzed using MATLAB. The results denote that the filter channel is closed and the light with the corresponding wavelength cannot pass when two adjacent microrings satisfy the condition of destructive interference; however, when two adjacent microrings satisfy the condition of constructive interference, the filter channel is opened, and the light with the corresponding wavelength can pass. Finally, a 2×2 router is designed using four improved microring arrays.

Key words optical devices; improved parallel microring array; transfer matrix method; Bragg resonance; switching; router

OCIS codes 230.1150; 230.3120; 230.3990; 230.5750

1 引言

随着信息产业的高速发展,传统的微电子技术已经无法满足信息产业对高带宽容量及灵活带宽分配的迫切需求。硅基集成光学结合了微电子技术和光电子技术,将具有极大带宽的光器件集成到集成电路(IC)芯片上^[1-2],从而发挥两者的优势,克服传统电气互连的瓶颈,如无法支持较高的数据速率、带宽有限、扩展性较差和高功耗等^[3-4],促进了片上光网络的发展。硅光子技术中可以用作路由器的一个

潜在元素是光谐振器,其交换功能能够在输入和输出端口之间路由数据包,因此,已成为在片上光互连网络中创建交换元件的关键组成部分^[5]。

微环谐振器结构紧凑,易与其他元件组合构成新型功能器件^[6],现已成为硅基集成光学的研究热点。其中,多个微环直接耦合组成的串联微环,能够形成箱型光谱响应,可有效降低光谱中非谐振光的强度,但由于各微环直接耦合,造成谐振波长发生多次分裂,输出的频谱不平坦^[6-7]。而与串联微环相比,由两条平行信道和多个微环构成

收稿日期: 2018-09-29; 修回日期: 2018-10-19; 录用日期: 2018-11-22

基金项目: 甘肃省建设科技攻关项目(JK2016-7)、甘肃省自然科学基金(1610RJZA046)

* E-mail: 1751843776@qq.com

的并联微环阵列中相邻微环之间无耦合,箱型光谱响应平坦^[6-8]。此外,并联微环阵列的直波导还会发生布拉格谐振。

为了使并联微环阵列的滤波信道可以灵活切换和路由,本文提出了改进型微环阵列,并研究了如何切换滤波信道及实现路由器,通过控制其发生耦合谐振诱导透明效应的相干距离,灵活切换两种器件的滤波信道。设计了 2×2 路由器,研究了传输耦合系数和微环的半径差对路由器性能的影响。

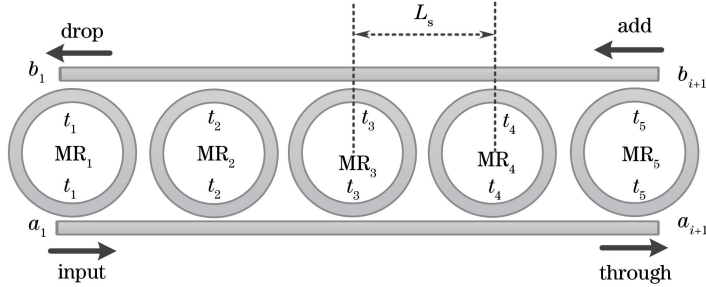


图1 并联微环阵列的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of parallel microring array

图1中, L_s 表示相邻微环的间距, a_1, b_1 分别为并联微环阵列的输入端和下载端, a_{i+1}, b_{i+1} 分别为并联微环阵列的直通端和加载端, i 为微环的个数。光在微环中传播一周的相位 $\varphi = 2\pi R_{i+1}\beta$,其中 R_{i+1} 为微环的半径, β 为传播常数。设光在微环中传播一周的增益为 Z ,则 $Z = BA$ 。其中, $B = \exp(-j\varphi)$ 为光在微环中传播一周的相位变化引起的增益, $A = \exp(-\alpha\pi R_{i+1})$ 为光在微环中传播一周的振幅衰减因子, α 为传输损耗系数。微环 MR_{i+1} 的直通端频谱强度 T_{i+1} 和下载端频谱强度 D_{i+1} 分别表示为

$$T_{i+1} = \frac{t_{i+1}(1-Z)}{1-t_{i+1}^2 Z}, \quad (1)$$

$$D_{i+1} = \frac{-k_{i+1}^2 Z^{0.5}}{1-t_{i+1}^2 Z}, \quad (2)$$

式中: k_{i+1} 为耦合系数。而微环单元传输矩阵 \mathbf{A}_{i+1} 表示为

$$\mathbf{A}_{i+1} = T_{i+1}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & -R_{i+1} \\ R_{i+1} & T_{i+1}^2 - R_{i+1}^2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

直波导传输矩阵 \mathbf{M}_i 可表示为

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} Y_i^{-1} & 0 \\ 0 & Y_i \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中:矩阵元 $Y_i = \exp(-jL_s\beta)$ 。总传输矩阵为 $\mathbf{A}_{i+1}\mathbf{M}_i$,各端口之间的关系表示为

$$\begin{bmatrix} b_{i+1} \\ a_{i+1} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{i+1}\mathbf{M}_i \begin{bmatrix} b_i \\ a_i \end{bmatrix}. \quad (5)$$

2 理论分析

2.1 并联微环结构及理论分析

并联微环阵列的结构如图1所示, $MR_1 \sim MR_5$ 分别为5个微环,加载端无输入; $t_1 \sim t_5$ 分别为各微环与波导间的传输耦合系数,微环对称耦合单元的传输耦合系数相等。波导在下载端发生布拉格谐振,类似于布拉格光栅中各反射波发生谐振^[9],输出频谱为布拉格频带,其频谱特性易受传输耦合系数的影响^[10]。

总传输矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} b_{i+1} \\ a_{i+1} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{i+1}\mathbf{M}_i\mathbf{A}_i \cdots \mathbf{M}_1\mathbf{A}_1 \begin{bmatrix} b_1 \\ a_1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} b_1 \\ a_1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$, $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}$ 是 \mathbf{M} 的矩阵元素。因为加载端无输入,即 $b_{i+1} = 0$,所以直通端频谱强度 T 和下载端频谱强度 D 分别表示为^[11]

$$T = \left| \frac{a_{i+1}}{a_1} \right|^2 = \left| \frac{\det(\mathbf{M})}{m_{11}} \right|^2, \quad (7)$$

$$D = \left| \frac{b_{i+1}}{a_1} \right|^2 = \left| -\frac{m_{12}}{m_{11}} \right|^2. \quad (8)$$

当光在微环中传输时,只有波长满足微环谐振方程的光才会在微环中发生谐振,或者说只有绕微环传输一周时所产生的相位差为 2π 整数倍的光才会产生谐振^[12],谐振方程表示为

$$M_R \lambda_R = 2\pi R N_{\text{eff}}, \quad (9)$$

式中: M_R 为微环的谐振级数(取正整数); λ_R 为微环的谐振波长; N_{eff} 为微环的有效折射率。而布拉格谐振的条件是相邻两个微环环心之间的光路 $L_s N_{\text{eff}}$ 等于半波长的整数倍,其表达式为

$$M_B \lambda_B = 2L_s N_{\text{eff}}, \quad (10)$$

式中: M_B 为布拉格谐振级数(取正整数); λ_B 为布拉格波长。

根据(9)、(10)式, M_R 和 M_B 分别表示为

$$M_R = \frac{2\pi R N_{\text{eff}}}{\lambda_R}, \quad (11)$$

$$M_B = \frac{2L_s N_{\text{eff}}}{\lambda_B}. \quad (12)$$

由此可知,并联微环阵列中谐振器频带和布拉格频带相互影响,不利于路由器滤波信道的切换和路由。

2.2 改进型并联微环阵列的基本结构及理论分析

并联微环阵列很难实现滤波信道的切换和路由,如果相邻的两个微环谐振器的半径相同,信号将

由第一个环导入波导下载端,第二个环没有信号导入,从而阻止了耦合共振诱导透明(CRIT)的相干反馈的产生。而改进型微环阵列可以实现 CRIT 滤波信道的切换和路由。图 2 为改进型微环阵列示意图,MR_{i+1} 表示第 i+1 个微环。令 MR₁ 半径为 R₁,微环半径以 ΔR 递增,MR_{i+1} 半径为 R₁+iΔR。而 L_i 为第 i 对相邻环的相干距离,相邻环的相干长度都不相同,共有 i 对相邻微环,最多可产生 i 个尖锐的 CRIT 透射谱^[13]。

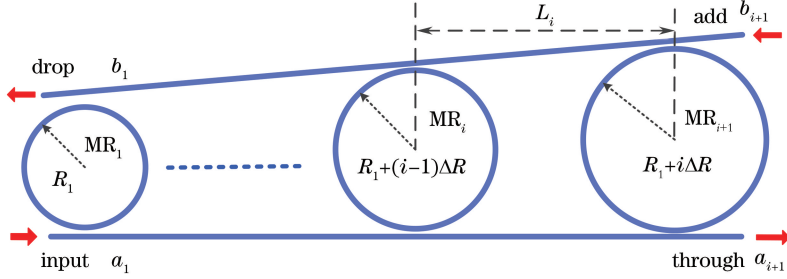


图 2 改进型微环阵列示意图

Fig. 2 Schematic of improved microring array

改进型微环阵列的微环半径不相等,每个微环的传输矩阵都不相同。设光在微环 MR₁ 中传播一周的增益为 Z,光在相邻微环路径差中传播的增益为 Z₁=Y₁A₁,其中:Y₁=exp(-j2πΔRβ)为路径差 2πΔR 中相位变化所引起的增益;A₁=exp(-απΔR)为在微环中传播一周的振幅衰减因子。则微环 MR_{i+1} 的直通端频谱响应强度 T_{i+1} 和下载端频谱响应强度 D_{i+1} 可分别表示为

$$T_{i+1} = \frac{t_{i+1}(1-ZZ_1^i)}{1-t_{i+1}^2ZZ_1^i}, \quad (13)$$

$$D_{i+1} = \frac{-k_{i+1}^2Z^{0.5}Z_1^{0.5i}}{1-t_{i+1}^2ZZ_1^i}. \quad (14)$$

微环 MR_{i+1} 的单元传输矩阵 A_{i+1} 表示为

$$\mathbf{A}_{i+1} = T_{i+1}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & -R_{i+1} \\ R_{i+1} & T_{i+1}^2 - R_{i+1}^2 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

相邻微环 MR_i 与 MR_{i+1} 间的直波导单元传输矩阵可表示为

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} Y_i^{-1} & 0 \\ 0 & Y_i \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中:Y_i=exp(-jL_iβ)。则总传输矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} b_{i+1} \\ a_{i+1} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{i+1} \mathbf{M}_i \mathbf{A}_i \cdots \mathbf{M}_1 \mathbf{A}_1 \begin{bmatrix} b_1 \\ a_1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} b_1 \\ a_1 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

因为加载端无输入,即 b_{i+1}=0,所以直通端频谱强度 T 和下载端频谱强度 D 可分别表示为^[14]

$$T = \left| \frac{a_{i+1}}{a_1} \right|^2 = \left| \frac{\det(\mathbf{M})}{m_{11}} \right|^2, \quad (18)$$

$$D = \left| \frac{b_1}{a_1} \right|^2 = \left| -\frac{m_{12}}{m_{11}} \right|^2. \quad (19)$$

3 路由器的设计

3.1 滤波信道的路由

改进型双微环阵列中,相干距离的改变可以控制 CRIT 信道的通过或抑制。在改进型三微环阵列中,控制相干距离可以实现两个 CRIT 信道的路由。

图 3 是改进型双微环结构的示意图,MR₁、MR₂ 为两个并行排列的微环,R₂-R₁=ΔR。其中虚线表示 MR₁、MR₂ 与直波导构成的较大的 CRIT 谐振腔。R₁、R₂ 和 ΔR 分别为 10 μm、10.005 μm 和 5 nm,系统折射率为 1.705。改进型双微环阵列可以发生 MR₁ 谐振、MR₂ 谐振、法布里-珀罗谐振以及直波导上的布拉格谐振。

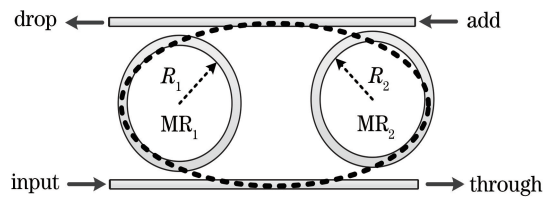


图 3 改进型双微环结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of improved double microring

定义两个微环的平均半径 R_{1,2} 为

$$R_{1,2} = \frac{R_1 + R_2}{2}. \quad (20)$$

MR₁、MR₂ 可以发生 CRIT 的条件为^[15]

$$M_C \lambda_C = 2\pi R_{1,2} N_{\text{eff}}, \quad (21)$$

式中： λ_C 为 CRIT 谐振波长； M_C 为 CRIT 谐振级数。由于 MR₁、MR₂ 半径不同，直通端输出频谱存在加宽的布拉格阻带。根据(9)、(10)式，在布拉格谐振波长 $\lambda_B = \lambda_C$ 时，若 $L_s = \pi R_{1,2}$ ，布拉格谐振级数 $M_B = M_C$ ，此时发生 CRIT 相长干涉，CRIT 信道从直通端输出，此时 $L_s = \pi R_{1,2}$ 为相长干涉距离；若 $L_s = 1.5\pi R_{1,2}$ ，则有 $2M_B = 3M_C$ ，此时发生 CRIT 相

消干涉。

图 4 为改进型三微环阵列的 CRIT 信道路由的结构图和频谱图。MR₁ 半径为 40 μm ，相邻微环半径差为 5 nm，系统折射率为 1.705。图 4(a) 中，MR₁、MR₂ 满足相消干涉条件 $L_s = 1.5\pi R_{1,2}$ ，MR₂、MR₃ 满足相消干涉条件 $L_s = 1.5\pi R_{2,3}$ ，此时两个 CRIT 信道都关闭， λ_1 、 λ_2 都不能通过，如图 4(d) 所示。图 4(b) 设置 MR₁、MR₂ 满足相长干涉条件 $L_s = \pi R_{1,2}$ ，MR₂、MR₃ 满足相消干涉条件，此时， λ_1 通过， λ_2 被抑制。反之如图 4(c)， λ_2 通过， λ_1 被抑制。

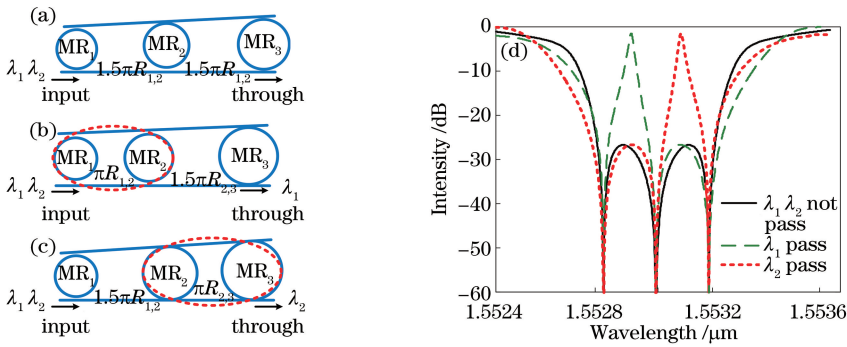


图 4 CRIT 信道路由的结构图和频谱图。(a)相消干涉；(b) MR₁、MR₂ 相长干涉；(c) MR₂、MR₃ 相长干涉；(d) 频谱图

Fig. 4 Structural diagrams and Spectra of CRIT Channel Routing. (a) Destructive interference; (b) MR₁, MR₂ constructive interference; (c) MR₂, MR₃ constructive interference; (d) output spectra

3.2 2×2 路由器的设计

图 5 是设计的 2×2 路由器示意图，由 4 个改进型微环阵列构成。根据文献[16]，当环形波导的弯曲半径 $R < 5 \mu\text{m}$ 时，TE 和 TM 偏振态的弯曲损耗都比较大；当环形波导的弯曲半径 $R > 5 \mu\text{m}$ 时，TE 和 TM 偏振态的弯曲损耗几乎趋近于 0。为了降低波导的损耗对器件输出性能的影响，将环形波导的弯曲半径选择为 10 μm ， ΔR 为 5 nm，微环与直波导之间的间距为 180 nm，微环之间的间隔为 4 μm ，中间的直波导长度为 150 μm ，芯层材料为 SiN，包层材料为 SiO₂，系统折射率为 1.705，微环损耗系数为 1 dB/cm，传输耦合系数为 0.9。CRIT₁ 信道用黑色短虚线圈出，CRIT₂ 信道用黑色长虚线圈出，端口 A、B、C、D 都是双向的。

当波长为 λ_1 的光从端口 A、B、C、D 输入时，分别从端口 C、D、A、B 输出；当波长为 λ_2 的光从端口 A、B、C、D 输入时，分别从端口 D、C、B、A 输出。

图 6 为端口 A 输入波长 λ_1 、 λ_2 的频谱图。可见，端口 A 输入的波长 λ_1 从端口 C 输出；端口 A 输入的波长 λ_2 从端口 D 输出。仿真结果表明，只有进入特定输入端口的波长才能被路由到特定的输出

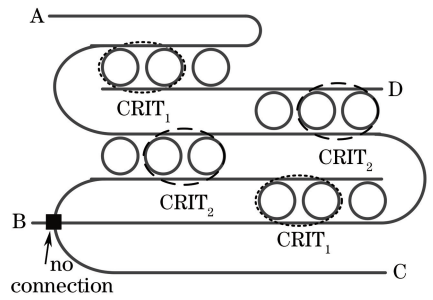


图 5 2×2 路由器示意图

Fig. 5 Schematic of 2×2 router

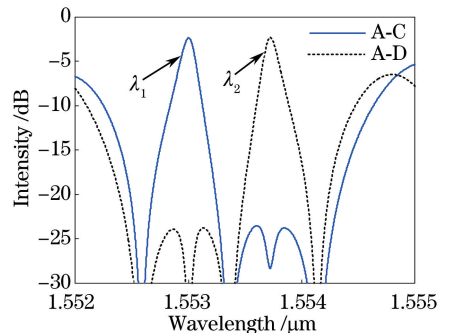


图 6 路由器频谱图

Fig. 6 Spectra of router

端口,输入输出端口是一一对应的。该路由器单个信道半峰全宽(FWHM)为0.15 nm,插入损耗为-2.4 dB,阻带串扰小于-24 dB,由光的频率和波长的关系可知,该器件可以对带宽约为18 GHz的信号进行处理。

3.2.1 传输耦合系数对路由器性能的影响

图7为传输耦合系数对路由器性能的影响。仿真结果表明,当传输耦合系数为0.87时,路由器单个信道FWHM为0.08 nm,对应的信道带宽为10 GHz,插入损耗为-3.7 dB,串扰小于-27 dB;当传输耦合系数为0.93时,路由器单个信道FWHM为0.22 nm,对应的信道带宽为27.5 GHz,插入损耗为-1.4 dB,串扰<-19 dB。结果表明,随着传输耦合系数的增大,通带由尖锐变平缓,路由器FWHM变宽,插入损耗减小,串扰增加。在实际设计中,通过设置恰当的传输系数,权衡插入损耗与信道串扰,使路由器性能达到最优。

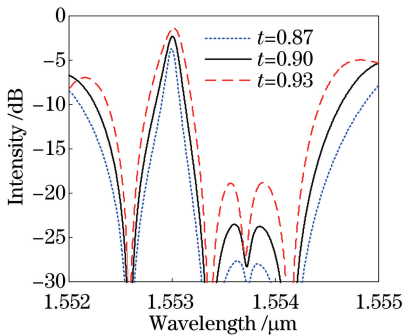


图7 传输耦合系数对路由器性能的影响

Fig. 7 Effect of transmission coupling coefficient on router performance

3.2.2 微环半径差对路由器性能的影响

图8为半径差对路由器性能的影响。仿真结果表明,当半径差为4 nm时,路由器单个信道FWHM为0.1 nm,对应的信道带宽为12.5 GHz,插入损耗为-4 dB,阻带串扰小于-27 dB;当半径差为6 nm时,路由器单个信道FWHM为0.3 nm,对应的信道带宽为37.5 GHz,插入损耗为-2 dB,阻带串扰小于-22 dB。结果表明,随着半径差的增大,谐振波长向右移动,路由器的FWHM变宽,对应的信道3 dB带宽增大,插入损耗减小,阻带串扰增加。

4 结 论

为了实现并联微环阵列的滤波信道的灵活切换和路由,基于改进型并联微环阵列,推导了产生

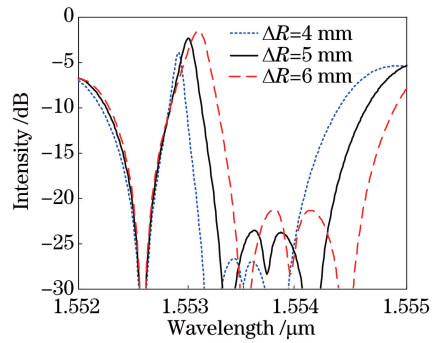


图8 ΔR 对路由器影响

Fig. 8 Effect of ΔR on router

CRIT的相干距离。当微环间距为相邻微环平均半径的 π 倍时,相邻微环发生相长干涉,直通端输出CRIT信道;当微环间距为相邻微环平均半径的 1.5π 倍时,相邻微环发生相消干涉,直通端无CRIT信道输出。利用改进型微环阵列级联,设计了 2×2 路由器,并研究了传输耦合系数和半径差对路由器性能的影响。结果表明,随着传输耦合系数的增大,通带由尖锐变平缓,路由器FWHM变宽,插入损耗减小,串扰增加;而随着半径差的增大,谐振波长向右移动,路由器的FWHM变宽,对应的信道3 dB带宽增大,插入损耗减小,阻带串扰增加。

另外,波导的传输损耗也会对性能有所影响,损耗系数增大会使谐振器插入损耗增大,形状因子降低,带宽变窄。因此,在实际设计中,要设置恰当的传输耦合系数、半径差和传输损耗系数,提高制作工艺,权衡插入损耗与信道串扰,使路由器性能达到最优。

参 考 文 献

- [1] Ying Y H. Design of new kind of tunable micro ring resonator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0620002.
- [2] Gui L, Zuo J C, Wu Z L, *et al.* A steady model of silicon based microring including nonlinear optical effects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0419001.
桂林, 左健存, 吴中林, 等. 一种包含非线性光学效应的硅基微环稳态模型[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0419001.
- [3] Chen Y W, Zhang H B, Liu F Y, *et al.* An optimization framework for routing on optical Network-on-Chips (ONoCs) from a networking perspective[C] // 2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and

- Computing, September 19-22, 2015, Ningbo, China. New York: IEEE, 2015: 1-5.
- [4] Pan P, Li L L, Cai X Y. Design and error analysis of silica on silicon based polarization beam splitter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 122301.
潘盼, 李伶俐, 蔡雪原. 硅基二氧化硅偏振分束器的设计及误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 122301.
- [5] Hazura H, Nadia A. A, Hanim A R. *et al.* Optical routers based on microring resonator for optical networks-on-chip[J]. Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, 2016, 8(1): 41-44.
- [6] Wang M. Characteristics and application of silicon micro-ring resonators [D]. Jinan: Shandong University, 2015.
王勉. 硅基微环谐振器的特性及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [7] Lian L, Fu J, Yang C S, *et al.* Research and application of output spectrum of parallel five-microring resonator frequency band [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 032302.
连乐, 付杰, 杨超山, 等. 并联五微环谐振器频带的输出频谱研究与应用[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 032302.
- [8] Yan H, Feng X, Zhang D K, *et al.* Compact optical add-drop multiplexers with parent-sub ring resonators on SOI substrates[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(15): 1462-1465.
- [9] Tong C Z, Wang L J, Tian S C, *et al.* Study on Bragg reflection waveguide diode laser[J]. Chinese Journal of Optics, 2015, 8(3): 480-498.
佟存柱, 汪丽杰, 田思聪, 等. 布拉格反射波导半导体激光器的研究[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 480-498.
- [10] Heebner J E, Chak P, Pereira S, *et al.* Distributed and localized feedback in microresonator sequences for linear and nonlinear optics[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2004, 21(10): 1818-1832.
- [11] Zhang X B, Huang D X, Hong W, *et al.* Transfer matrix method for analyzing transmission characteristics of microring resonator arrays[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(9): 1585-1592.
张小贝, 黄德修, 洪伟, 等. 传输矩阵法分析微环谐振器阵列传输特性[J]. 光学学报, 2007, 27(9): 1585-1592.
- [12] Bogaerts W, De Heyn P, Van Vaerenbergh T, *et al.* Silicon microring resonators[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(1): 47-73.
- [13] Mancinelli M, Guider R, Bettotti P, *et al.* Coupled-resonator-induced-transparency concept for wavelength routing applications[J]. Optics Express, 2011, 19(13): 12227-12240.
- [14] Li C T, Zheng L J, Zheng Y, *et al.* Topology and analysis of an N-stage cascaded polymer eight-port microring optical router with 7N channel wavelengths [J]. Optoelectronics Letters, 2015, 11(1): 36-40.
- [15] Li G. Research of tunable slow light in the double coupled ring resonator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
李赓. 双环耦合谐振器中的慢光光速可调研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [16] Geng M M. Research on silicon-based integrated reconfigurable optical add/drop multiplexer [D]. Beijing: Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, 2009.
耿敏明. 硅基集成化可重构光插分复用器的研究[D]. 北京: 中国科学院半导体研究所, 2009.