

光学学报

基于级联微环辅助 Mach-Zehnder 干涉仪的带宽可调谐光滤波器的设计

赖明彬^{1,2}, 耿敏明^{1,2,3,4*}, 谭伊璇^{1,2}, 冯瑶^{1,2}, 何万才^{1,2}, 蒋佳^{1,2}, 刘婧^{1,2}, 张振荣^{1,2}

¹广西大学计算机与电子信息学院, 广西南宁 530004;

²广西多媒体通信与网络技术重点实验室, 广西南宁 530004;

³广西高校多媒体通信与信息处理重点实验室, 广西南宁 530004;

⁴广西信息科学实验中心, 广西桂林 541004

摘要 设计了一种基于绝缘体上硅的具有大带宽调谐范围的紧凑型可重构光学滤波器, 该滤波器由两级双微环谐振器辅助对称马赫-曾德尔干涉仪结构级联构成, 器件的尺寸为 $60\ \mu\text{m} \times 87\ \mu\text{m}$ 。通过控制微环谐振器的相位, 可以实现对滤波器输出带宽和中心波长的调谐。采用时域有限差分方法模拟该器件的性能, 仿真结果表明, 该滤波器的带宽调谐范围为 $1.5\sim 5\ \text{nm}$, 在调节带宽的过程中滤波器的阻带抑制制度大于 $20\ \text{dB}$, 通带损耗为 $0.73\ \text{dB}\sim 0.88\ \text{dB}$, 同时该滤波器的中心波长调谐范围可以覆盖整个自由光谱范围, 并保持 $3\ \text{dB}$ 带宽和形状因子基本不变。

关键词 集成光学; 光学滤波器; 马赫-曾德尔干涉仪; 带宽可调谐; 微环谐振器

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230431

1 引言

随着新一代信息科技革命在全球持续推进, 互联网数据流量呈指数式增长, 各个领域对网络带宽的需求越来越大。光通信系统作为网络的核心主体, 需要不断提高频谱效率和增加传输容量来满足发展需求, 因此面临着巨大的挑战。硅基光子集成技术因其具有集成度高、成本低、带宽大、与 CMOS 工艺兼容^[1]等优势得到快速发展, 被广泛应用于光纤通信^[2-3]、光传感^[4-5]、光调制^[6-7]、量子通信^[8]、光学神经网络^[9-11]等领域。其中硅光子可调谐滤波器是其中最重要的元件之一, 在光纤通信的波分复用(WDM)系统中发挥着重要作用。目前光学滤波器可分为马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型、微环谐振器(MRR)型、布拉格光栅(Bragg grating)型、阵列波导光栅(AWG)型、阶梯衍射光栅(EDG)型、微环辅助马赫-曾德尔干涉仪(MRR-MZI)型等。MZI型光学滤波器具有波长依赖性, 可以用于波长滤波; 其单级 MZI 滤波器的输出为正弦型光谱响应, 在应用上存在很大的局限性。可以通过级联 MZI 来改善单级 MZI 的滤波性能^[12-13], 但是会增大器件的面积, 提高器件结构的复杂度。MRR型光学滤波器具有尺寸小、灵活性高等优点, 但响应类似于洛伦兹曲

线^[14], 具有和 MZI 型光学滤波器相似的局限性; 可以通过级联多个微环谐振器来实现盒状光谱响应^[15], 但器件的设计和制备难度明显上升。布拉格光栅型光学滤波器具有光谱响应平坦、波长选择灵活和自由光谱范围(FSR)大^[16-17]等优点, 但其器件尺寸和调谐功耗均较大, 不利于集成度的提高。AWG型光学滤波器在全通道的多波长对准和平移方面有很大的优势^[18], 但是在某些情况下, AWG型滤波器单通道的调谐灵活性相对较弱^[19]。EDG型光学滤波器的优势与 AWG类似, 但其器件尺寸限制了集成度的提高。MRR-MZI型光学滤波器将 MZI 和 MRR 两种结构合为一体, 可以有效地改善滤波器的性能^[20-22], 即通过单独调整滤波器不同单元之间的波长间隔来调整输出带宽, 然而各个单元的带宽调谐范围有限, 且其通带损耗和形状因子通常会在调谐过程中发生明显的变化, 造成滤波器性能在调谐过程中不能满足需求。

为解决上述问题, 本文提出一种基于绝缘体上硅(SOI)材料的级联双环辅助 MZI 的可调谐滤波器, 该光学滤波器由级联的两个单元 MRR-MZI 滤波器构成, 每个单元 MRR-MZI 滤波器的输出具有良好的形状因子和阻带抑制制度。该级联双环辅助 MZI 的可调谐滤波器的光谱响应是两个单元滤波器传输光谱响应

收稿日期: 2023-01-02; 修回日期: 2023-02-12; 录用日期: 2023-02-20; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(61741504, 61965003, 61661004)、广西自然科学基金(2018GXNSFAA294133)

通信作者: *gengmm@gxu.edu.cn

的交集,其带宽由两个单元滤波器传输光谱响应的重叠范围决定,因此在保证滤波器实现带宽和中心波长可调的前提下,保证了具有良好的形状因子和通带平坦的矩形传输响应输出。仿真结果显示,该器件的阻带抑制度大于 20 dB,通带损耗小于 1 dB,其 3 dB 带宽可以在 1.5~5 nm 范围内连续调谐,中心波长可以在一个 FSR 内进行调谐,在进行带宽和中心波长调谐时滤波器仍保持着良好的阻带抑制效果和较低的通带损耗。

2 原理与理论分析

所提出的级联双环辅助 MZI 滤波器结构如图 1 所示。该结构由两部分构成,分别为第一单元滤波器和第二单元滤波器,每个单元滤波器由一个对称型 MZI 和两个微环构成,将两个微环放置在 MZI 的两臂上,

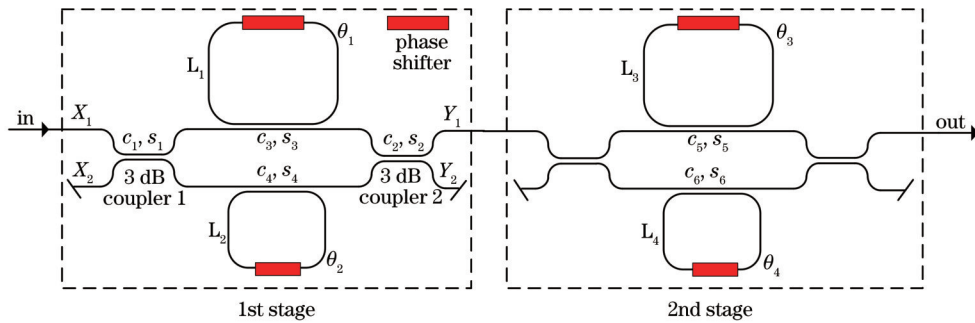


图 1 级联双环辅助 MZI 滤波器结构示意图

Fig. 1 Schematic of proposed filter consisting of cascaded double-ring-assisted MZI

图 1 中 X_1 和 X_2 为第一单元滤波器的输入端, Y_1 和 Y_2 为输出端, c_1 、 c_2 和 s_1 、 s_2 分别为 MZI 两个 3 dB 耦合器的自耦合系数和交叉耦合系数, c_3 、 c_4 和 s_3 、 s_4 分别为大环和小环与 MZI 上下臂之间的自耦合系数和交叉耦合系数, 通过传输矩阵法计算输入 X_1 、 X_2 和输出 Y_1 、 Y_2 之间的关系, 即

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_2 & -js_2 \\ -js_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1(z) & 0 \\ 0 & H_2(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 & -js_1 \\ -js_1 & c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1c_2H_1(z) - s_1s_2H_2(z) & -j(s_1c_2H_1(z) + c_1s_2H_2(z)) \\ -j(c_1s_2H_1(z) + s_1c_2H_2(z)) & -s_1s_2H_1(z) + c_1c_2H_2(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

两个 3 dB 耦合器的耦合系数分别为 K_1 和 K_2 , 且 $K_1 = K_2 = \frac{1}{2}$, 式(1)中 c_i 、 s_i ($i = 1, 2$) 与 K_i ($i = 1, 2$) 之间的关系为

$$c_i = \sqrt{1 - K_i}, s_i = \sqrt{K_i}, i = 1, 2. \quad (2)$$

由式(1)推导得到系统函数:

$$H_{Y_1}(z) = \left| \frac{Y_1(z)}{X_1(z)} \right| = c^2 H_1(z) - s^2 H_2(z), \quad (3)$$

$$H_{Y_2}(z) = \left| \frac{Y_2(z)}{X_1(z)} \right| = -j(csH_1(z) + scH_2(z)). \quad (4)$$

分析 L_1 的初始相位对单元滤波器输出的影响, 结果如图 2 所示。可以看到, L_1 的初始相位从 0 变化到 π , 滤波器响应波形逐渐变成通带平坦, 阻带抑制效果

为了提高滤波器的灵活性, 两个微环的大小不同, 其中大环与 MZI 的上臂耦合, 小环与 MZI 的下臂耦合。矩形方块代表移相器, 对应的相位变化为 $\theta_1 \sim \theta_4$ 。微环的相位可以通过调控热光、电光、等离子体色散等效应来改变, 从而实现滤波带宽和中心波长的调谐。本实验采用的 SOI 材料中的硅不具有 Pockels 效应且 Kerr 效应很微弱, 故本实验不采用基于电光效应的调谐方法。等离子体色散效应是通过自由载流子浓度的变化来改变折射率, 从而实现相位调节, 获得较快的调谐速度, 但自由载流子的吸收损耗限制了谐振波长的调节范围^[13], 因此也不适用于本实验。硅材料具有较明显的热光效应, 即波导的折射率会随着温度的改变而发生变化, 与等离子体色散效应相比, 热光效应理论上没有引入额外的损耗, 适合大范围调谐。因此, 本实验选择热光效应对滤波器进行调谐。

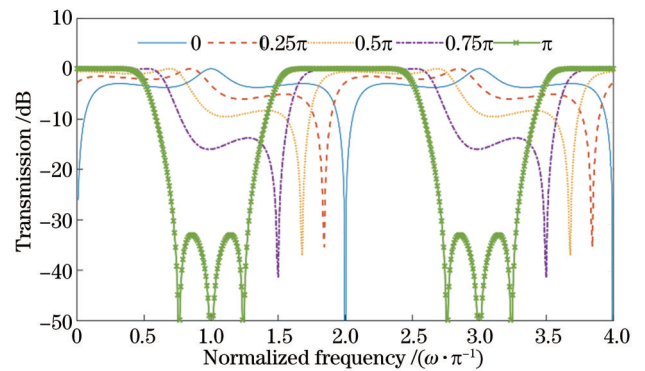


图 2 L_1 的初始相位对单元滤波器输出的影响

Fig. 2 Influence of the initial phase of L_1 on the performance of the unit filter

良好,可满足应用中的对称波形要求。

为了保证单元滤波器的输出性能, L_1 的初始相位应为 π ,式(1)中的 $H_1(z)$ 和 $H_2(z)$ 分别为 L_1 和 L_2 的传输函数,根据微环的传输矩阵法可推导出其传输函数:

$$H_1(z) = \frac{c_3 + z^{-2} \exp(-j\theta_1)}{1 + c_3 z^{-2} \exp(-j\theta_1)}, \quad (5)$$

$$H_2(z) = \frac{c_4 - z^{-1} \exp(-j\theta_2)}{1 - c_4 z^{-1} \exp(-j\theta_2)}. \quad (6)$$

综合式(2)~(6),单级双环辅助MZI滤波器的两个输出端口的系统函数可表示为

$$H_{Y_1}(z_1) = \frac{1}{2} \left[\frac{c_3 + z_1^{-2} \exp(-j\theta_1)}{1 + c_3 z_1^{-2} \exp(-j\theta_1)} - \frac{c_4 - z_1^{-1} \exp(-j\theta_2)}{1 - c_4 z_1^{-1} \exp(-j\theta_2)} \right] = \frac{1}{2} \left\{ \frac{c_3 - c_4 + (1 - c_3 c_4) \exp(-j\theta_2) z_1^{-1} + (1 - c_3 c_4) \exp(-j\theta_1) z_1^{-2} + (c_3 - c_4) z_1^{-3} \exp[-j(\theta_1 + \theta_2)]}{1 - c_4 z_1^{-1} \exp(-j\theta_2) + c_3 z_1^{-2} \exp(-j\theta_1) - c_3 c_4 z_1^{-3} \exp[-j(\theta_1 + \theta_2)]} \right\}, \quad (7)$$

$$H_{Y_2}(z_1) = -\frac{1}{2} j \left[\frac{c_3 + z_1^{-2} \exp(-j\theta_1)}{1 + c_3 z_1^{-2} \exp(-j\theta_1)} + \frac{c_4 - z_1^{-1} \exp(-j\theta_2)}{1 - c_4 z_1^{-1} \exp(-j\theta_2)} \right] = -\frac{1}{2} j \left\{ \frac{(c_3 + c_4) - (1 + c_3 c_4) z_1^{-1} \exp(-j\theta_2) + (1 + c_3 c_4) z_1^{-2} \exp(-j\theta_1) - (c_3 + c_4) z_1^{-3} \exp[-j(\theta_1 + \theta_2)]}{1 - c_4 z_1^{-1} \exp(-j\theta_2) + c_3 z_1^{-2} \exp(-j\theta_1) - c_3 c_4 z_1^{-3} \exp[-j(\theta_1 + \theta_2)]} \right\}. \quad (8)$$

由图1可知,所提出的级联双环辅助MZI滤波器的第二单元滤波器结构与第一单元滤波器结构一致,二者的传输函数表达式相同,其级联滤波器的系统函数为第一单元直通端与第二单元直通端的系统函数的乘积。

同时改变4个微环谐振器的相位可以调整滤波器的中心波长,设定用于调整滤波器中心波长的大环相位为 θ_5 ,小环相位为 θ_6 ,因此加入大小环相位改变量后滤波器传输函数为

$$H_{\text{two-stage}} = \frac{1}{4} \left\{ \frac{c_3 + z_1^{-2} \exp[-j(\theta_1 + \theta_5)]}{1 + c_3 z_1^{-2} \exp[-j(\theta_1 + \theta_5)]} - \frac{c_4 - z_1^{-1} \exp[-j(\theta_2 + \theta_6)]}{1 - c_4 z_1^{-1} \exp[-j(\theta_2 + \theta_6)]} \right\} \times \left\{ \frac{c_5 + z_2^{-2} \exp[-j(\theta_3 + \theta_5)]}{1 + c_5 z_2^{-2} \exp[-j(\theta_3 + \theta_5)]} - \frac{c_6 - z_2^{-1} \exp[-j(\theta_4 + \theta_6)]}{1 - c_6 z_2^{-1} \exp[-j(\theta_4 + \theta_6)]} \right\}. \quad (9)$$

通过数值分析研究第二单元滤波器的大环 L_3 的初始相位对级联微环辅助MZI滤波器总输出响应的的影响。如图3所示,当 $c_3 = c_5, c_4 = c_6, L_3$ 的初始相位从0变化到 π 时,滤波器通带带宽逐渐增大,阻带抑制度也不断增大,响应波形从陷波状变成通带平坦的对称波形。为了保证输出波形具有通带平坦的特性, L_3 上需设置与 L_1 相同的初始相位 π 。

光学滤波器的性能指标主要有阻带抑制度(SER)、通带损耗(PL)、形状因子(1 dB带宽与10 dB带宽的比值)等。由式(7)、式(8)可知,单级MRR-MZI滤波器的输出与 c_3, c_4, θ_1 和 θ_2 有关,本节分析 c_3 和 c_4 对阻带抑制度、通带损耗、形状因子的影响。因为本实验只采用 Y_1 端作为下一级单元的输入,所以仅对 Y_1 的性能进行分析。

图4(a)~(d)展示了自耦合系数 c_3 和 c_4 对第一单元滤波器响应性能的影响。图4(a)所示为自耦合系数 c_3, c_4 对滤波器通带损耗的影响,其中 $\chi_{\text{PL,max}}$ 为通带损耗的最大值。随着 c_3, c_4 的增大,其通带损耗也增

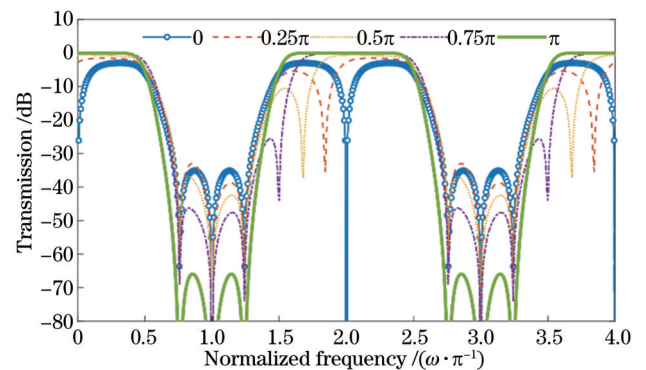


图3 L_3 的初始相位对滤波器输出响应的影响

Fig. 3 Influence of initial phase of L_3 on the performance of optical filter

大;为了满足应用的要求,滤波器通带损耗应小于1 dB,即处于A区域。图4(b)所示为 c_3, c_4 对滤波器阻带抑制度的影响,阻带抑制度的最小值用 $\alpha_{\text{SER,min}}$ 表示,为了满足应用要求, $\alpha_{\text{SER,min}}$ 应大于20 dB,即处于B

区域,其坐标表示坐标轴或者边界与虚线之间的交点。在图 4(a)、(b)中存在一些空白区域,该区域内的滤波器响应曲线会被扭曲,无法明确划分通带和阻带,不利于分析,且相应的参数不能用于滤波器设计。A、B 两个区域的重叠部分是后续设计和分析滤波器的关键。图 4(c)所示为 c_3 、 c_4 对滤波器形状因子的影响,可以看到, c_3 对形状因子的影响较大,当 c_3 增大时,滤波器响

应的形状因子逐渐变大,滤波器响应曲线趋于理想的盒状。根据滤波器的性能要求,A、B 两个区域的重叠部分限制了 c_3 和 c_4 的最大值,因此图 4(c)中 c_3 和 c_4 的最大值分别为 0.70 和 0.25。图 4(d)所示为 c_3 、 c_4 对级联双环辅助 MZI 滤波器的最大带宽调节范围 ($\zeta_{\text{BTR,max}}$) 的影响,其中 κ_{FSR} 为 FSR。可以看到,当 c_3 的取值为 0.4~0.5 时,滤波器的可调节范围最大。

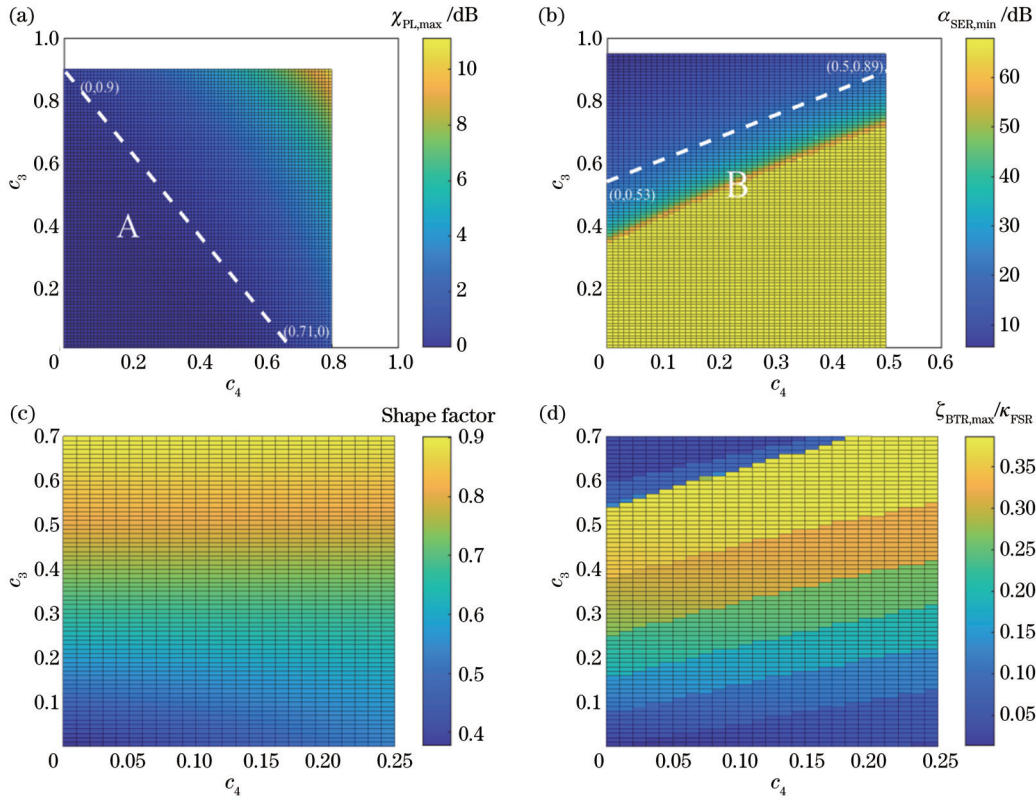


图 4 c_3 和 c_4 对单级微环辅助 MZI 滤波器输出性能的影响以及对级联微环辅助 MZI 滤波器输出性能的影响。(a) 通带损耗; (b) 阻带抑制制度; (c) 形状因子; (d) 级联滤波器的带宽调节范围

Fig. 4 Influence of c_3 and c_4 on output performance of one-stage microring-assisted MZI and cascaded microring-assisted MZI. (a) Passband loss; (b) stopband extinction ratio; (c) shape factor; (d) bandwidth tuning range of cascaded filters

在滤波器的设计中,滤波器的阻带抑制制度、通带损耗、形状因子是相互影响的,在阻带抑制制度增加的同时其形状因子会减小,而微环谐振器的自耦合系数也决定了滤波器的带宽调节范围,因此需要对滤波器性能进行权衡,找出合适的自耦合系数。根据以上分析,取 c_3 、 c_4 为 0.44 和 0.04 时可以使得通带损耗、阻带抑制制度、形状因子和带宽调节范围尽可能达到设计目标。

单级双环辅助 MZI 滤波器的光谱响应和零极点图如图 5 所示,滤波器的通带损耗为 0.017 dB,形状因子为 0.77,阻带抑制制度大于 20 dB,可以将该结构作为级联双环辅助 MZI 滤波器的单元。

使用数值分析方法计算级联双环辅助 MZI 滤波器的频谱响应和零极点分布情况,结果如图 6 所示。从图 6(a)所示的滤波器响应曲线可以看到,级联结构放大了阻带抑制制度,通过调节大环 L_3 和小环 L_4 上的移相器,并保持 $\theta_3 = 2\theta_4$,可以实现滤波器带宽的调节,

3 dB 带宽可以在 $0.11\kappa_{\text{FSR}} \sim 0.47\kappa_{\text{FSR}}$ 范围内调节,其阻带抑制制度大于 20 dB,通带损耗小于 1 dB。图 6(b)为滤波器的零极点图,级联双环辅助 MZI 滤波器有 6 个零点和 6 个极点,分别由两个单元滤波器提供。 a 点到 b 点的曲线表示第一单元滤波器的通带范围,用 β 表示; c 点到 d 点的曲线表示第二单元滤波器的通带范围。通过调节第二单元滤波器大小环的相位,可以使该单元的零极点从初始位置旋转一定的角度,即 e 点到 g 点的曲线,用 Δf 表示。旋转后的第二单元滤波器零极点与第一单元滤波器零极点的重叠部分表示滤波器输出响应的带宽,其大小为 $\beta - \Delta f$,即 c 、 b 之间的曲线部分。

通过数值分析,研究了大环改变相位 θ_5 与小环改变相位 θ_6 之间的关系对滤波器中心波长调谐的影响, θ_6 取 $0 \sim 2\pi$ 内的任意值,当 $\theta_5 = 2\theta_6$ 时,在实现中心波长移动的同时具有较好的波形。以小环相位 θ_6 的改变

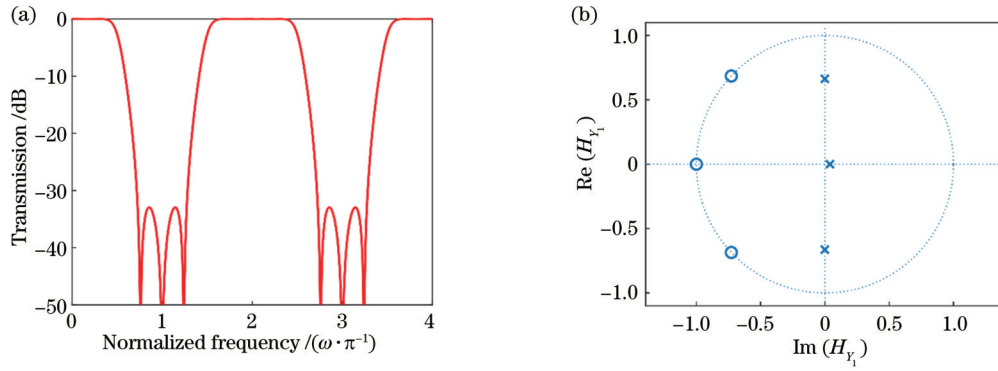


图 5 单级双环辅助 MZI 滤波器数值分析结果。(a)光谱响应;(b)零极点图

Fig. 5 Numerical analysis results of one-stage double-ring-assisted MZI filter. (a) Spectral response; (b) zero-pole plot

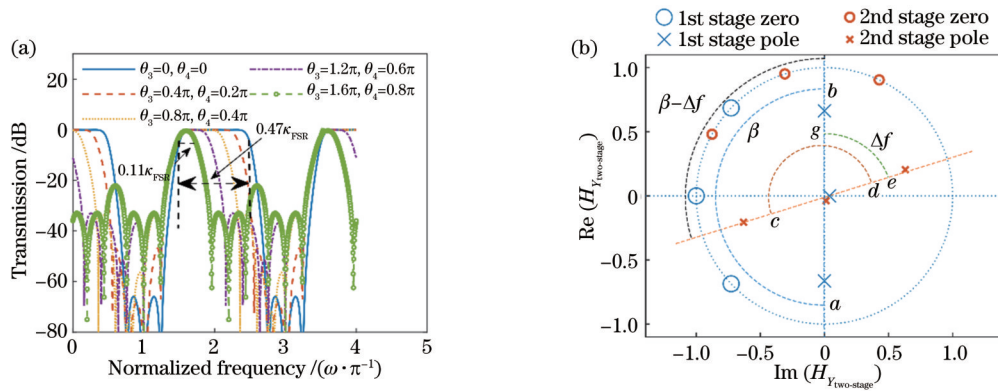


图 6 级联双环辅助 MZI 滤波器的数值分析结果。(a)光谱响应;(b)零极点图

Fig. 6 Numerical analysis results of cascaded double-ring-assisted MZI filter. (a) Spectral response; (b) zero-pole plot

量为 0.5π , 大环的相位 θ_5 从 0 改变到 π 为例进行比较和说明, 结果如图 7 所示。随着 4 个微环相位的改变, 波形向左移动, 且相对于初始波形发生了畸变。当 θ_5 为 π 时, 滤波器中心波长移动了 $0.25\kappa_{\text{FSR}}$, 但波形不发生畸变。因此, 同时改变大环和小环的初始相位, 并保证大环改变的相位为小环改变的相位的两倍时, 可以实现对滤波器中心波长的调谐。

改变微环谐振器相位调谐中心波长时得到的结果如图 8 所示, 两个微环谐振器的相位发生改变时, 波形

从右往左移动, 当 θ_6 为 2π 时, 中心波长的移动范围为整个 FSR, 两条曲线 ($\theta_6 = 2\pi$ 与 $\theta_6 = 0$) 重合。

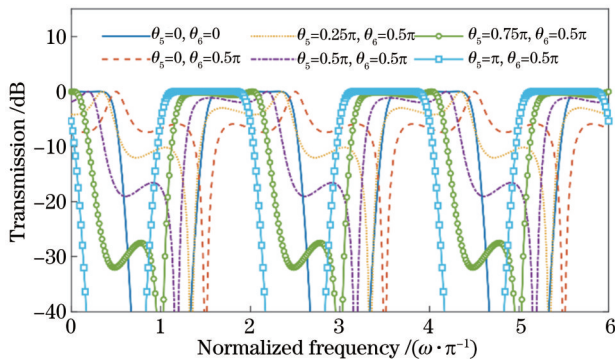


图 7 θ_5 和 θ_6 之间的关系对中心波长调谐的影响

Fig. 7 Influence of the relationship between θ_5 and θ_6 on center wavelength tuning

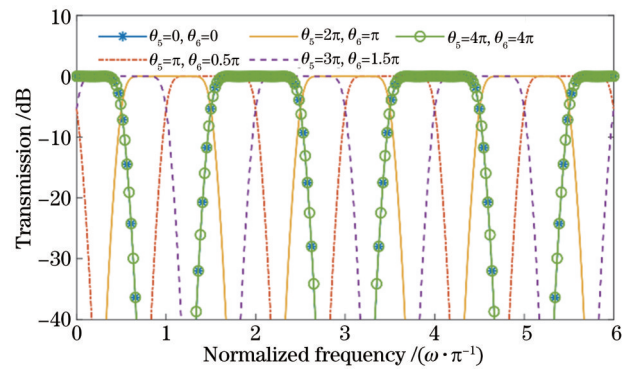


图 8 中心波长随着微环谐振器相位的变化发生偏移

Fig. 8 Normalized center frequency shifted with phase change of microring resonators

3 结构设计与仿真优化

3.1 结构设计与优化

前文从理论上分析了滤波器的工作原理、滤波性能与关键参数的可取范围, 并未涉及滤波器的具体结构, 也没有考虑色散效应对滤波器性能参数的影响。本节将通过仿真计算分析讨论这些问题。

所提出的滤波器可分为 MZI 和微环两个部分,其中 MZI 为对称性 MZI,微环为跑道型结构,如图 9 所示,由 4 个半径为 $R_{B/S}$ 的圆弧、2 个长度为 $L_{B/S}$ 的水平波导和 2 个长度为 $l_{B/S}$ 的垂直波导构成,其中下标 B 表示大环的参数,下标 S 表示小环的参数。 W_{idth} 、 $L_{B/S}$ 、 G_{ap} 是 c_3 、 c_4 、 c_5 、 c_6 的关键影响因素,根据前文的分析, c_3 和 c_5 取 0.44, c_4 和 c_6 取 0.04,同时利用时域有限差分 (FDTD) 方法对滤波器微环结构进行设计和优化^[20],因此选择高度为 220 nm、宽度为 0.4 μm 的矩形波导,微环与耦合臂的间隙 G_{ap} 为 0.13 μm ,大环耦合臂长度 L_B 为 2.1 μm ,小环耦合臂长度 L_S 为 4.8 μm 。

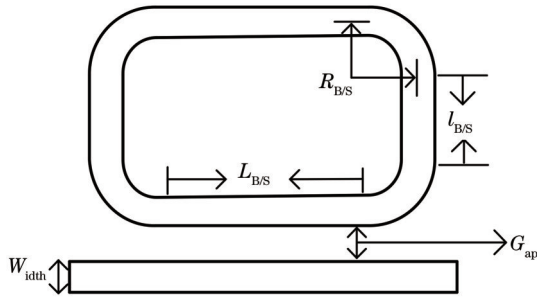


图 9 跑道型微环谐振器的结构

Fig. 9 Structure of race-track microring resonator

为了使滤波器实现最好的输出效果,设置每个单元滤波器的大环初始相位为 π ,此次仿真通过热光效应改变微环谐振器的有效折射率来实现初始相位 π 。当工作波长为 1550 nm 左右,加热温度 T 为 300~600 K 时,硅的热光系数与温度的关系^[23]为

$$\frac{dn}{dT} = 9.48 \times 10^{-5} + 3.47 \times 10^{-7} \times T - 1.49 \times 10^{-10} \times T^2. \quad (10)$$

通过仿真得到大环初始相位与折射率变化量之间的关系,如图 10 所示,当微环的折射率的变化量 Δn 为 0.007 时,大环的初始相位为 π 。根据式 (10),当温度为 300 K 时,计算出对应的热光系数为 1.855×10^{-4} ,因此当折射率变化量为 0.007 时,对应的波导温度变

化为 38 K。

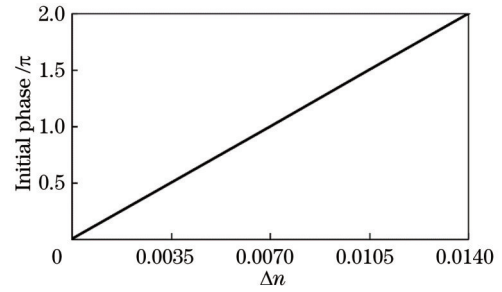


图 10 大环初始相位与 Δn 的关系

Fig. 10 Relationship between initial phase of big ring and Δn

3.2 仿真结果

所设计级联双环辅助 MZI 滤波器的结构参数如表 1 所示,其器件尺寸为 60 μm \times 87 μm 。利用光学仿真软件 RSoft 并采用 FDTD 方法模拟器件的性能,光源采用 TE 模式。

表 1 级联双环辅助 MZI 滤波器参数

Item	Value	Item	Value
Waveguide type	Channel	$R_B / \mu\text{m}$	10
Waveguide height / μm	0.22	$R_S / \mu\text{m}$	5
Refractive index of silicon	3.477	$W_{\text{idth}} / \mu\text{m}$	0.4
Refractive index of silica	1.444	$G_{\text{ap}} / \mu\text{m}$	0.13
Polarization	TE	$l_B / \mu\text{m}$	15.34
$L_B / \mu\text{m}$	2.1	$l_S / \mu\text{m}$	3.92
$L_S / \mu\text{m}$	4.8		

通过调整第二单元滤波器微环的相位并使大环改变的相位量是小环的 2 倍,即保持 $\theta_3 = 2\theta_4$,可以实现滤波器带宽的调谐,计算结果如图 11(a) 所示。由于采用热光效应来实现微环相位的调节,因此在仿真过程中,通过改变第二单元滤波器微环的折射率来实现对微环相位的控制。由图 11(b) 可知,滤波器在实现

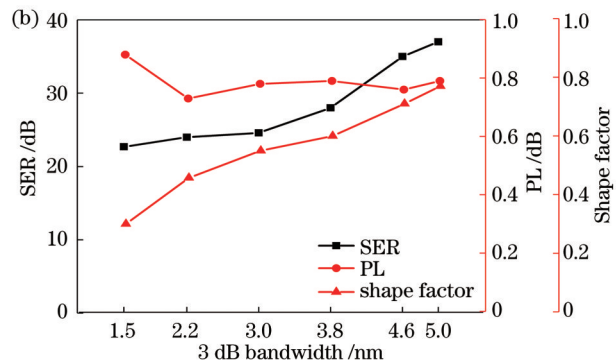
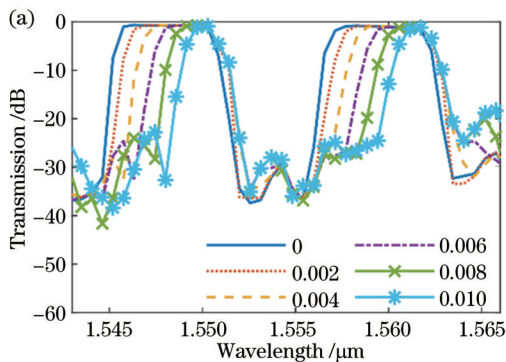


图 11 滤波器带宽调节结果。(a) 滤波器输出带宽随着微环折射率的变化;(b) 不同输出带宽下的阻带抑制度、通带损耗、形状因子
Fig. 11 Filter bandwidth tuning results. (a) Output bandwidth of filter changed with refractive index of microring; (b) stopband extinction ratio, passband loss, and shape factor under different output bandwidths

带宽调节的过程中通带损耗为 0.73 dB~0.88 dB,表明滤波器的阻带抑制制度一直大于 20 dB,形状因子为 0.3~0.8,满足光纤通信的需求。

图 12 所示为验证级联双环辅助 MZI 滤波器的中心波长可调谐性结果,同时改变 4 个微环的相位并保证大环相位变化量是小环相位变化量的 2 倍,可以实现对滤波器中心波长的调谐:当小环的相位从 0 变化到 2π 时,大环相位从 0 变化到 4π 。对应微环的折射率改变量从 0 增大到 0.029 时,滤波器中心波长从 1548.05 nm 调谐

到 1559.6 nm,波长偏移量为 11.55 nm,移动范围约为一个 FSR。随着中心波长的调整,形状因子从 0.78 减小到 0.60,其 3 dB 带宽从 5.0 nm 减小到 4.6 nm。这是因为在器件仿真过程中存在色散效应等影响滤波器性能的因素,它们对滤波器输出响应的 3 dB 带宽和形状因子有一定的影响,其影响主要是由有效折射率随波长变化这一现象造成的。但是在滤波器中心波长的调谐过程中可以控制两个微环的温度变化相同,从而保证形状因子和 3 dB 带宽基本不变。

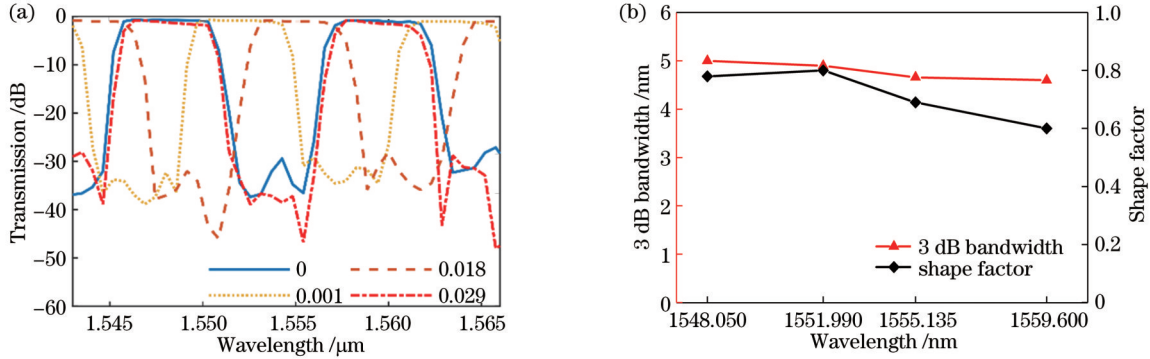


图 12 级联双环辅助 MZI 滤波器中心波长调谐结果。(a) 光谱响应;(b) 形状因子和 3 dB 带宽的变化

Fig. 12 Center wavelength tuning results of cascaded double-ring-assisted MZI filter. (a) Spectral response; (b) changes in shape factor and 3 dB bandwidth

在波导器件制造过程中,制造误差会导致波导长度、宽度以及间隙偏离设计值,而波导器件尺寸小,因此制造误差对滤波器性能的影响较大。本节分析滤波器中制造误差对滤波器性能的影响,主要模拟两种制造误差引起的滤波器输出性能变化。第一种是在其他器件参数不变的情况下,假设微环波导宽度与对应的耦合臂波导宽度 W_{idth} 存在 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 的偏差,其结果如图 13 所示。当 W_{idth} 存在偏差时,滤波器输出的阻带抑制制度小于 20 dB,其输出曲线不能用于信号滤波。这是因为 W_{idth} 存在的偏差导致微环与对应耦合臂之间的自耦合系数偏离设计值,同时对微环的相位产生影响,因此滤波器的滤波性能变差。

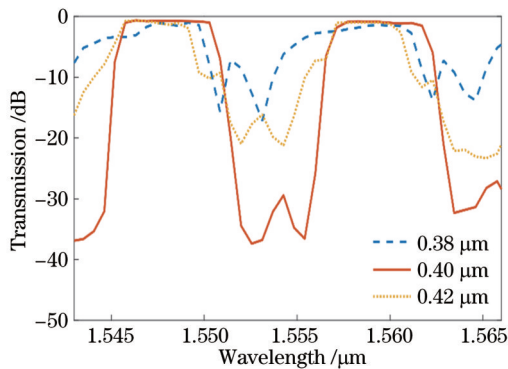


图 13 微环波导宽度与对应的耦合臂波导宽度 W_{idth} 存在偏差时滤波器的输出结果

Fig. 13 Output results of filter with deviation in waveguide width W_{idth} of microring and its corresponding coupling arm

第二种是在其他器件参数不变的情况下,假设耦合间隙 G_{ap} 存在 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 的偏差,滤波器的输出结果如图 14 所示。可以看到,当 G_{ap} 分别为 $0.11 \mu\text{m}$ 和 $0.15 \mu\text{m}$ 时,滤波性能明显变差,其中 G_{ap} 为 $0.15 \mu\text{m}$ 时的性能最差:通带损耗为 7.68 dB,远大于通信要求的 1 dB;其阻带抑制制度小于 20 dB,形状因子较差,不能满足滤波要求。

由于微环的相位和耦合系数均对工艺误差非常敏感,且均对滤波器的输出性能有较大影响,因此需要优化工艺才能提高基于微环结构的光器件的实用性。

表 2 所示为近年来采用不同结构方案的带宽可调谐滤波器的性能,与其他方案相比,所提出的级联双环

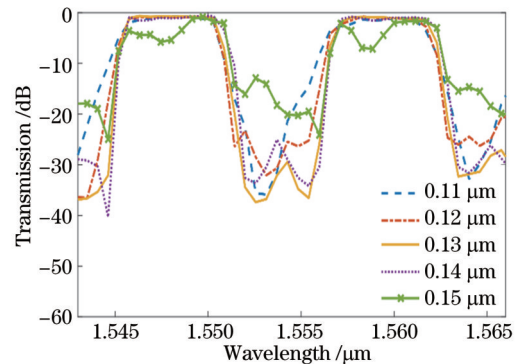


图 14 耦合间隙 G_{ap} 存在偏差时滤波器的输出结果

Fig. 14 Output results of the filter with deviation in the coupling gap G_{ap}

辅助 MZI 滤波器具有 3 dB 带宽大、带宽调节范围大的基本优点。在 3 dB 带宽方面,所提滤波器的 3 dB 带宽最大值为 5 nm,同时滤波器带宽可以从 1.5 nm 调谐到

5 nm,明显优于其他方案。同时,所提滤波器阻带抑制制度也优于其他方案。因此,所提滤波器在光信号处理中更具吸引力。

表 2 不同结构的带宽可调滤波器性能比较

Table 2 Performance comparison of bandwidth-adjustable filters with different structures

Scheme	Max bandwidth / nm	FSR / nm	Tunable bandwidth / nm	SER / dB	Ref.
Two-stage cascaded MRR-MZI	5	11.55	1.5-5	22.7-37	This work
Three-stage MRR- MZI (six rings)	0.113 (simulation)	0.2336 (simulation)	0.011-0.114 (simulation)	23-54 (simulation)	[24]
Second-order micro-ring	0.824	1.73	0.072-0.824	10-18	[25]
Multiple micro-ring based Vernier filter	1.2	>40	0.3-1.2	17-21	[26]
MRR-MZI	1.35	9	0.3-1.35	>20	[27]

4 结 论

设计了一种级联双环辅助 MZI 滤波器,该滤波器是一种具有大带宽调谐范围的可重构滤波器。利用传输矩阵法推导出该滤波器的系统传输函数并对滤波器进行了理论分析和性能仿真优化。仿真结果表明,所设计滤波器的阻带抑制制度大于 20 dB,通带损耗小于 1 dB,器件的尺寸为 $60\ \mu\text{m} \times 87\ \mu\text{m}$,通过热光效应改变微环谐振器的折射率,可以实现中心波长在一个 FSR 内移动以及输出带宽在 1.5~5 nm 范围内调整,从而满足不同波长信号的筛选要求。该滤波器具有尺寸小、带宽调节范围大、损耗小等优势,可广泛应用于光开关、光信号处理等领域。

参 考 文 献

- [1] Zhang Y, Samanta A, Shang K P, et al. Scalable 3D silicon photonic electronic integrated circuits and their applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(2): 8201510.
- [2] 雒洲,王晨,王凯辉,等. 32.768 Tbit/s 净速率 1000 km 少模光纤波分复用系统[J]. 光学学报, 2023, 43(10): 1006004.
Ju Z, Wang C, Wang K H, et al. 1000 km few-mode fiber wavelength division multiplexing transmission system with a net data rate of 32.768 Tbit/s[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(10): 1006004.
- [3] 孙林,刘宁,蔡轶,等. 多芯光纤通信海缆的能效理论及系统参数优化[J]. 光学学报, 2022, 42(15): 1506005.
Sun L, Liu N, Cai Y, et al. Power efficiency theory and system parameter optimization for multicore fiber-based submarine cables[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 1506005.
- [4] 范俊豪,杨祥文,罗彬彬,等. 基于色散拐点微纳光纤耦合器的通孔悬臂梁振动传感器[J]. 光学学报, 2022, 42(15): 1528001.
Fan J H, Yang X W, Luo B B, et al. Through-hole cantilever beam vibration sensor based on dispersion-turning-point optical microfiber coupler[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 1528001.
- [5] Li D R, Wang N N, Zhang T Y, et al. Label-free fiber nanograting sensor for real-time *in situ* early monitoring of cellular apoptosis[J]. Advanced Photonics, 2022, 4(1): 016001.
- [6] 袁华江,孙崇磊,赵佳. 高速异型掺杂的硅基槽波调制器[J]. 光学学报, 2023, 43(7): 0723002.

Yuan H J, Sun C L, Zhao J. High speed hetero-doped silicon modulator based slot waveguide[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(7): 0723002.

- [7] 刘海达,黑小兵,杨洋,等. 用于水下光通信高维调制与解调的轨道角动量叠加态研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 60(9): 0901001.
Liu H D, Hei X B, Yang Y, et al. Research of orbital angular momentum in superposition state for high-dimensional modulation and demodulation of underwater optical communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 60(9): 0901001.
- [8] 彭柏语,袁晨智,张瑞明,等. 用于量子通信的增益开关半导体激光器研究进展[J]. 光学学报, 2022, 42(3): 0327007.
Peng B Y, Yuan C Z, Zhang R M, et al. Progress in gain-switched semiconductor lasers for quantum communication[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(3): 0327007.
- [9] 栾海涛,陈希,张启明,等. 人工智能纳米光子学: 光学神经网络与纳米光子学[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823005.
Luan H T, Chen X, Zhang Q M, et al. Artificial intelligence nanophotonics: optical neural networks and nanophotonics[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823005.
- [10] Zuo Y, Li B H, Zhao Y J, et al. All-optical neural network with nonlinear activation functions[J]. Optica, 2019, 6(9): 1132-1137.
- [11] Jha A, Huang C R, Prucnal P R. Reconfigurable all-optical nonlinear activation functions for neuromorphic photonics[J]. Optics Letters, 2020, 45(17): 4819-4822.
- [12] Horst F, Green W M J, Assefa S, et al. Cascaded Mach-Zehnder wavelength filters in silicon photonics for low loss and flat pass-band WDM (de-) multiplexing[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 11652-11658.
- [13] Munk D, Katzman M, Kaganovskii Y, et al. Eight-channel silicon-photonic wavelength division multiplexer with 17 GHz spacing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(5): 8300310.
- [14] Bogaerts W, de Heyn P, van Vaerenbergh T, et al. Silicon microring resonators[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(1): 47-73.
- [15] Feng S, Lei T, Chen H, et al. Silicon photonics: from a microresonator perspective[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(2): 145-177.
- [16] Ikeda K, Konoike R, Suzuki K, et al. 2×2 16-ch silicon photonics wavelength-selective switch based on waveguide gratings[J]. Optics Express, 2020, 28(18): 26861-26869.
- [17] St-Yves J, Bahrami H, Jean P, et al. Widely bandwidth-tunable silicon filter with an unlimited free-spectral range[J]. Optics Letters, 2015, 40(23): 5471-5474.
- [18] Zou J, Jiang X X, Xia X, et al. Ultra-compact birefringence-compensated arrayed waveguide grating triplexer based on silicon

- on-insulator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(12): 1935-1940.
- [19] Pathak S, Vanslebrouck M, Dumon P, et al. Optimized silicon AWG with flattened spectral response using an MMI aperture[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(1): 87-93.
- [20] 蒋佳, 耿敏明, 刘婧, 等. 基于三环辅助 Mach-Zehnder 干涉仪的带宽可调滤波器设计[J]. *光子学报*, 2021, 50(7): 0713002
Jiang J, Geng M M, Liu Q, et al. Design of a reconfigurable optical filter based on triple-ring-assisted Mach-Zehnder interferometer with large bandwidth tuning capability[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(7): 0713002.
- [21] Kohli N, Sang B L, Nabki F, et al. Tunable bandpass filter with serially coupled ring resonators assisted MZI[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(4): 6600608.
- [22] Orlandi P, Morichetti F, Strain M J, et al. Photonic integrated filter with widely tunable bandwidth[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(5): 897-907.
- [23] Cocorullo G, Della Corte F G, Rendina I. Temperature dependence of the thermo-optic coefficient in crystalline silicon between room temperature and 550 K at the wavelength of 1523 nm[J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(22): 3338-3340.
- [24] Li J C, Yang S G, Chen H W, et al. Reconfigurable rectangular filter with continuously tunable bandwidth and wavelength[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(4): 6601309.
- [25] Pouloupoulos G, Giannoulis G, Iliadis N, et al. Flexible filtering element on SOI with wide bandwidth tunability and full FSR tuning[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(2): 300-306.
- [26] Dai T G, Wang G C, Jiang J F, et al. Bandwidth tunable filter with large bandwidth and wavelength tuning range[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [27] Ren Y, Jiang Z P, Van V. A general variable bandwidth microring filter for lossless bandwidth tuning[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(14): 4745-4751.

Optical Filter Design Based on Cascaded Double-Ring-Assisted Mach-Zehnder Interferometers with Bandwidth Tuning Capability

Lai Mingbin^{1,2}, Geng Minming^{1,2,3,4*}, Tan Yixuan^{1,2}, Feng Yao^{1,2}, He Wancai^{1,2}, Jiang Jia^{1,2},
Liu Qiang^{1,2}, Zhang Zhenrong^{1,2}

¹*School of Computer, Electronics and Information, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China;*

²*Guangxi Key Laboratory of Multimedia Communications and Network Technology, Nanning 530004, Guangxi, China;*

³*Key Laboratory of Multimedia Communications and Information Processing of Guangxi Higher Education Institutes, Nanning 530004, Guangxi, China;*

⁴*Guangxi Experiment Center of Information Science, Guilin 541004, Guangxi, China*

Abstract

Objective As the revolution of new-generation information technology continues to advance around the world, the data traffic of the Internet is growing exponentially, and the demand for network bandwidth in various fields is increasing. The optical communication system, the core of networks, should continuously improve the frequency spectrum efficiency and the transmission capacity to meet the demands of future development. Hence, it faces great challenges. Silicon-based photonic integration technology has been developing rapidly due to its advantages of high integration, low costs, large bandwidth, and compatibility with CMOS technology. It is widely applied in optical fiber communication, optical sensing, optical modulation, quantum communication, optical neural networks, and other fields. The tunable silicon photonic filter is one of the most important components and plays a vital role in the wavelength division multiplexing (WDM) system of optical fiber communication. Optical filters include the Mach-Zehnder interferometer (MZI), microring resonator (MRR), Bragg-gratings, arrayed waveguide grating (AWG), echelle diffraction grating (EDG), and MRR-assisted MZI (MRR-MZI). However, these filters have limitations in the size of devices, power consumption, flexibility, and adjustable range. Therefore, a tunable filter based on SOI material is proposed. The bandwidth and center wavelength of the filter can be tuned by the cascading of two filter units of the double-ring-assisted MZI, which guarantees that the filter output has a good shape factor and a flat passband.

Methods The tunable filter of the cascaded double-ring-assisted MZI based on SOI material proposed in this paper is composed of two cascaded MRR-MZI filters. The spectral response of the tunable filter is the intersection of the transmission spectrum response of two double-ring-assisted MZI filters, and its bandwidth is determined by the overlapping region of the transmission spectrum response of the two units. Therefore, on the premise that the bandwidth and center wavelength of the filter can be adjusted, the output with a good shape factor and a flat passband is guaranteed.

In design, the transmission function of the filter is calculated by the transmission matrix method, and the mathematical model of the filter structure is built by MATLAB. The appropriate range of the self-coupling coefficient between microring and MZI arm can be found when the stopband extinction ratios (SER), passband loss (PL), shape factor, and bandwidth tuning range of the filter output are used as the performance criteria. At the same time, MATLAB is employed to analyze the phase of the microring and obtain the appropriate phase to ensure that the output performance of the filter meets the design requirements. Considering the influence of loss and dispersion on the performance of the filter, we leverage the optical simulation software RSoft and the finite-difference time-domain (FDTD) method to simulate the performance of the component. The structural parameters of the microring are determined according to the self-coupling coefficient obtained by mathematical analysis. The effective refractive index of the microring is changed to simulate the phase control of the microring and achieve the bandwidth and center wavelength tuning of the filter, which is realized by changes in the temperature of the microring.

Results and Discussions The bandwidth of the cascaded double-ring-assisted MZI filter proposed in this paper can be tuned by simultaneous changes in the phase of the microring in the second unit filter (Fig. 11). As the effective refractive index of the microring increases, the 3 dB bandwidth of the filter changes from 5 nm to 1.5 nm, and the passband loss is between 0.73 dB and 0.88 dB, which meets the needs of optical fiber communication. The center wavelength of the filter can be tuned from 1548.05 nm to 1559.6 nm (Fig. 12) when the phase of the four microrings of the cascaded double-ring-assisted MZI filter is simultaneously changed, and the phase change in the big ring keeps twice as much as that in the small ring. During the center wavelength tuning, the shape factor changes from 0.78 to 0.60, and the 3 dB bandwidth changes from 5.0 nm to 4.6 nm, both of which remain unchanged.

Conclusions We propose a tunable filter with a large bandwidth tuning range of the cascaded double-ring-assisted MZI filter. The system transmission function of the filter is derived by the transmission matrix method, and the theoretical analysis and performance simulation optimization are carried out. The simulation results show that the SER of the filter is greater than 20 dB, and the PL is less than 1 dB; the size of the device is $60\ \mu\text{m} \times 87\ \mu\text{m}$. When the thermal-optical effect changes the refractive index of the microring resonator, the center wavelength can move in the whole free spectral range, and the output bandwidth can be tuned between 1.5 nm and 5 nm, which meets the requirements of different wavelength signal screening. The filter has the advantages of small size, wide bandwidth adjustment range, and low loss and can be widely applied in optical switching and optical signal processing.

Key words integrated optics; optical filter; Mach-Zehnder interferometer; tunable bandwidth; microring resonator