

## 超高形状因子的硅基光学平顶滤波器

廖莎莎\*, 吴俊贤

重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065

**摘要** 提出一种基于绝缘体上硅的具有超高形状因子的光学平顶滤波器方案。该方案采用跑道型微环谐振器(RMRR)辅助非对称马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构,可实现的3 dB带宽为1.94 nm,相应的形状因子1(3 dB带宽与通带内功率下降10 dB时的通带宽度之比)和形状因子2(3 dB带宽与通带内功率下降15 dB时的通带宽度之比)分别为0.96和0.94,纹波因数(通带中最大功率与最小功率的比值)为2.40 dB。此外,分析了由RMRR引入的相移对该平顶滤波器性能的影响,并实验验证了通过调节施加在RMRR上的电压可以有效地调控其输出谱。该方案具有形状因子高、工艺复杂度低、体积小、质量轻、功耗低等优点,可广泛应用于高速光通信网络中。

**关键词** 光学器件; 平顶滤波器; 集成光学; 跑道型微环谐振器; 硅光子学

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231826

## 1 引言

平顶滤波器由于其独特的平顶响应特性,在波分复用系统中常被用作信道选择器。它可以减少波长间的串扰,提高对信道光学检测的速度和准确性<sup>[1-2]</sup>。关于它的实现方案有很多,如基于双折射晶体<sup>[3]</sup>、光纤<sup>[4-5]</sup>和Gires-Tournois标准具<sup>[6]</sup>等。虽然这些方案具有良好的滤波性能,但受到材料的限制,它们难以大规模集成<sup>[7-8]</sup>。幸运的是,随着互补金属氧化物半导体(CMOS)技术和绝缘体上硅(SOI)平台的兴起,近年来已有大量的集成方案被提出和证明<sup>[9-10]</sup>,如基于法布里-珀罗(F-P)腔<sup>[11]</sup>、波导光栅<sup>[12]</sup>、级联微环谐振器(MRR)<sup>[13]</sup>、级联马赫-曾德尔干涉仪(MZI)<sup>[14-15]</sup>等,但它们也存在工艺容差度较小、体积较大等不足。

随着理论的完善与技术的发展,基于MRR辅助非对称MZI(RA-MZI)结构的光学平顶滤波器方案被相继提出并予以证明。Worhoff等<sup>[16]</sup>通过非对称MZI短臂处耦合一个MRR构建了RA-MZI结构,并清晰地阐述了该结构实现平顶滤波的原理在于两个3 dB耦合器构成了臂长不等的非对称MZI。若MRR响应的波长周期性是MZI的一半,则MRR诱导的相移(以非线性方式随频率呈周期性变化)可以补偿MZI长臂上很大一部分的线性相移,最终产生一个具有平坦通带和陡峭边缘的矩形输出谱。但是,该方案并未对RA-MZI滤波器实现平顶通带响应的过程进行详细的理论分析。Huang等<sup>[17]</sup>基于准傅里叶级数构建了一

个严格、清晰的数学模型来描述该结构实现平顶通带响应的原理,这为硅基RA-MZI平顶滤波器提供了全面的指导。总的来说,RA-MZI平顶滤波器需要满足4个条件:①两个3 dB耦合器在工作带宽内具有稳定的均分光比;②在MZI短臂上传播的光能够适当地耦合进MRR;③MZI的自由功率谱范围(FSR)是MRR的2倍;④通过热光或电光等调控方式能够在MRR上实现 $\pi$ 或在MZI长臂上实现 $\pi/2$ 的外部相移。这些条件在仿真时虽然可以很好地满足,但在器件的实际制作过程中均具有一定的难度。特别地,波导有效折射率的变化和工艺误差的存在很难保证条件④的实现。为了消除该外部相移,Song等<sup>[18]</sup>使用Y分支代替第一个3 dB定向耦合器,制备出插入损耗约8 dB、串扰约-10 dB、FSR约4 nm的平顶滤波器。由于该方案中的第二个3 dB耦合器使用的是定向耦合器,其耦合比相对于波长呈正弦变化,因此,若设计波长偏离预期波长,该滤波器的滤波性能必然劣化。为此,Guan等<sup>[19]</sup>使用精心设计的3 dB绝热耦合器代替第一个3 dB定向耦合器、使用 $2 \times 2$ 多模干涉耦合器(MMI)代替第二个3 dB定向耦合器,制备出串扰约为-46 dB、FSR约为4.6 nm的平顶滤波器。但是该方案所设计的耦合间隙仅 $0.05 \mu\text{m}$ ,这对工艺精度的要求极高。此外,上述大多数方案并未对可以衡量滤波性能的关键指标作出详细的定义与分析,如表征通带平坦度的纹波因数、表征边缘陡峭度的形状因子、表征对通带以外信号抑制能力的旁瓣抑制比。

收稿日期: 2023-11-22; 修回日期: 2023-12-12; 录用日期: 2023-12-29; 网络首发日期: 2024-01-09

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202200613)、国家自然科学基金区域创新发展联合基金(U22A2018)

通信作者: \*liaoss@cqupt.edu.cn

综上所述,目前常见的几类片上平顶滤波器方案虽然也能够实现通带平坦且边缘陡峭的矩形谱输出,但大多存在一些不足,如工艺容差小、体积大、对衡量滤波性能的关键指标研究较少等。为了弥补上述不足,本文提出一种具有超高形状因子的片上光学平顶滤波器。该方案基于 SOI 平台,由跑道型 MRR (RMRR) 辅助非对称 MZI (RRA-MZI) 结构组成。在所设计的滤波器中,耦合间隙明显增加,且不需要在 RMRR 或 MZI 长臂上引入额外的  $\pi$  或  $\pi/2$  外部相移。此外,为了全面地分析该滤波器的滤波性能,研究了可以衡量滤波器性能的所有关键指标,特别是评估滤波形状的因子(3 dB 带宽与  $N$  dB 带宽之比,根据对滤波器要求的不同可取  $N=10, 15, 20$ )和纹波因数(通带内最大功率与最小功率之比)。实验结果表明,该滤波器的 3 dB 带宽为 1.94 nm,通带内功率下降 10 dB 和 15 dB 时通带宽度为 2.02 nm 和 2.06 nm,相应的形状因子 1(3 dB 带宽与通带内功率下降 10 dB 时的通带宽度之比)和形状因子 2(3 dB 带宽与通带内功率下降 15 dB 时的通带宽度之比)分别约为 0.96 和 0.94。纹波因数约为 2.40 dB、旁瓣抑制比约为 7.45 dB、插入损耗约为 1.82 dB。此外,由于该方案两个输出端口的功率谱是绝对互补的,因此在整个光传输过程中几乎没有能量损失。最后,通过研究由 RMRR 引入的相移对该平顶滤波器性能的影响,验证了调节 RMRR 上的电压可以有效地控制该滤波器的输出功率谱。该方案具有形状因子高、对工艺精度要求低、结构简单、体积小、质量轻、功耗低等优点。它不仅可以通过多级级联的方式设计成波分复用器的一部分,还可以广泛应用于高速光通信网络中。

## 2 片上平顶滤波器的原理及设计

该平顶滤波器采用上硅层厚度为 220 nm、掩埋层

厚度为 2  $\mu\text{m}$  的商用 SOI 芯片进行制作。条形波导厚度为 220 nm,其三维(3D)结构示意图如图 1 所示。它包含一个非对称 MZI 和一个 RMRR,且 MZI 由一对工艺容差度较大、分光比均匀、波长灵敏度较低的  $2\times 2$  MMI 构成。输入信号被第一个 MMI 分为两束后,分别沿 MZI 的上、下臂传播,且沿 MZI 上臂传播的光信号通过与环形谐振腔耦合形成全通型 RMRR,沿 MZI 下臂传播的光信号保持不变。因此,二者在第二个 MMI 耦合时会发生干涉,进而激发出一个矩形输出谱。此外,为了研究由 RMRR 引入的相移对该平顶滤波器性能的影响,在 RMRR 上集成一个微型加热器。值得注意的是,该加热器并不是为了满足上述的条件④。考虑到条件④在器件实际制作过程中的难度及复杂性,本实验直接放弃了它并通过调控其他结构参数(如 RMRR 与 MZI 上臂的耦合间隙)来优化滤波性能。

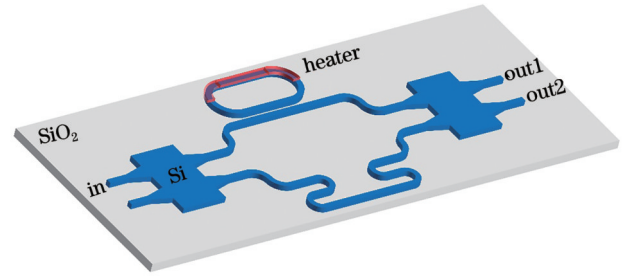


图 1 片上平顶滤波器的结构示意图

Fig. 1 Schematic of on-chip flat-top filter

若将该平顶滤波器划分为一对  $2\times 2$  MMI 和一个环形谐振器 3 个部分,则其输出功率谱可以通过传输矩阵很容易地计算出来。假设滤波器输入端口的光场强度为  $E_{in}$ ,两个输出端口的光场强度为  $E_{out1}, E_{out2}$ ,则该传输矩阵<sup>[20]</sup>可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -i\frac{\sqrt{2}}{2} \\ -i\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{MRR} & 0 \\ 0 & \exp(-i\Delta\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -i\frac{\sqrt{2}}{2} \\ -i\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $\Delta\varphi=2\pi n_{eff}\Delta L/\lambda$ 为 MZI 两个干涉臂引入的相位差, $n_{eff}$ 为波导的有效折射率, $\Delta L$ 为 MZI 两臂的长度差, $\lambda$ 为谐振波长; $T_{MRR}$ 为全通型 RMRR 的传递函数。

$$T_{MRR} = \frac{t - \alpha \exp(-i\theta)}{1 - \alpha t \exp(-i\theta)} = [t - \alpha \exp(-i\theta)] \times \sum_{k=0}^{\infty} [\alpha t \exp(-i\theta)]^k, \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 为光信号在 RMRR 内传输时的归一化损耗; $t$ 为 MZI 上臂与 RMRR 之间的传输系数(若耦合区域无损耗,则  $t$  和耦合系数  $\kappa$  满足:  $|t|^2 + |\kappa|^2 = 1$ ); $\theta=2\pi n_{eff}L_r/\lambda$ 为光在 RMRR 中循环一周的累积相位, $L_r$ 为 RMRR 的周长; $k$ 为光信号在 RMRR 的循环次数。根据式(1),该滤波器两个输出端口的透射谱可以分别表示为

$$T_1 = \left| \frac{E_{out1}}{E_{in}} \right|^2 = \frac{1}{4} \left| \frac{t - \alpha \exp(-i\theta) + \alpha t \exp(-i\Delta\varphi) \exp(-i\theta) - \exp(-i\Delta\varphi)}{1 - \alpha t \exp(-i\theta)} \right|^2 = \frac{1}{4} \left| -\frac{1}{2} \exp(-i\Delta\varphi) + [t - \alpha \exp(-i\theta)] \sum_{k=0}^{\infty} [\alpha \exp(-i\theta)]^k \right|^2, \quad (3)$$

$$T_2 = \left| \frac{E_{\text{out}2}}{E_{\text{in}}} \right|^2 = \frac{1}{4} \left| \frac{t - \alpha \exp(-i\theta) - at \exp(-i\Delta\varphi) \exp(-i\theta) + \exp(-i\Delta\varphi)}{1 - at \exp(-i\theta)} \right|^2 = \frac{1}{4} \left| \frac{1}{2} \exp(-i\Delta\varphi) + [t - \alpha \exp(-i\theta)] \sum_{k=0}^{\infty} [at \exp(-i\theta)]^k \right|^2. \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知,该滤波器两个输出端口的功率谱响应具有互补性( $T_1 + T_2 = 1$ ),且滤波特性主要由  $\alpha$ 、 $t$ 、 $L_r$  和  $\Delta L$  决定。式(3)和式(4)的最后一项可以看作函数的傅里叶级数展开形式,文献[17]的结果表明: $\alpha$  主要影响滤波器的消光比和插入损耗,且当  $\alpha = 1$  时,消光比最大、插入损耗最小; $t$  主要影响滤波器的纹波因数和形状因子,且当  $t = 0$  或 1 时,纹波因数和形状

因子最差; $L_r$  和  $\Delta L$  主要影响滤波器 out1 端口和 out2 端口的带宽分配比,且当  $L_r = 2\Delta L$  时,可实现 1:1 的对称带宽分配。

为实现通带平坦、边缘陡峭的矩形输出谱,利用 MATLAB 软件仿真了不同  $t^2$  下该滤波器的输出情况,如图 2(a)所示。此时  $n_{\text{eff}} = 3.23$ 、 $\alpha = 1$ 、 $\Delta L = 145.66 \mu\text{m}$ 、 $L_r = 291.32 \mu\text{m}$ 。可以看到,当  $t^2$  从 0.04 增加到 0.64 时,

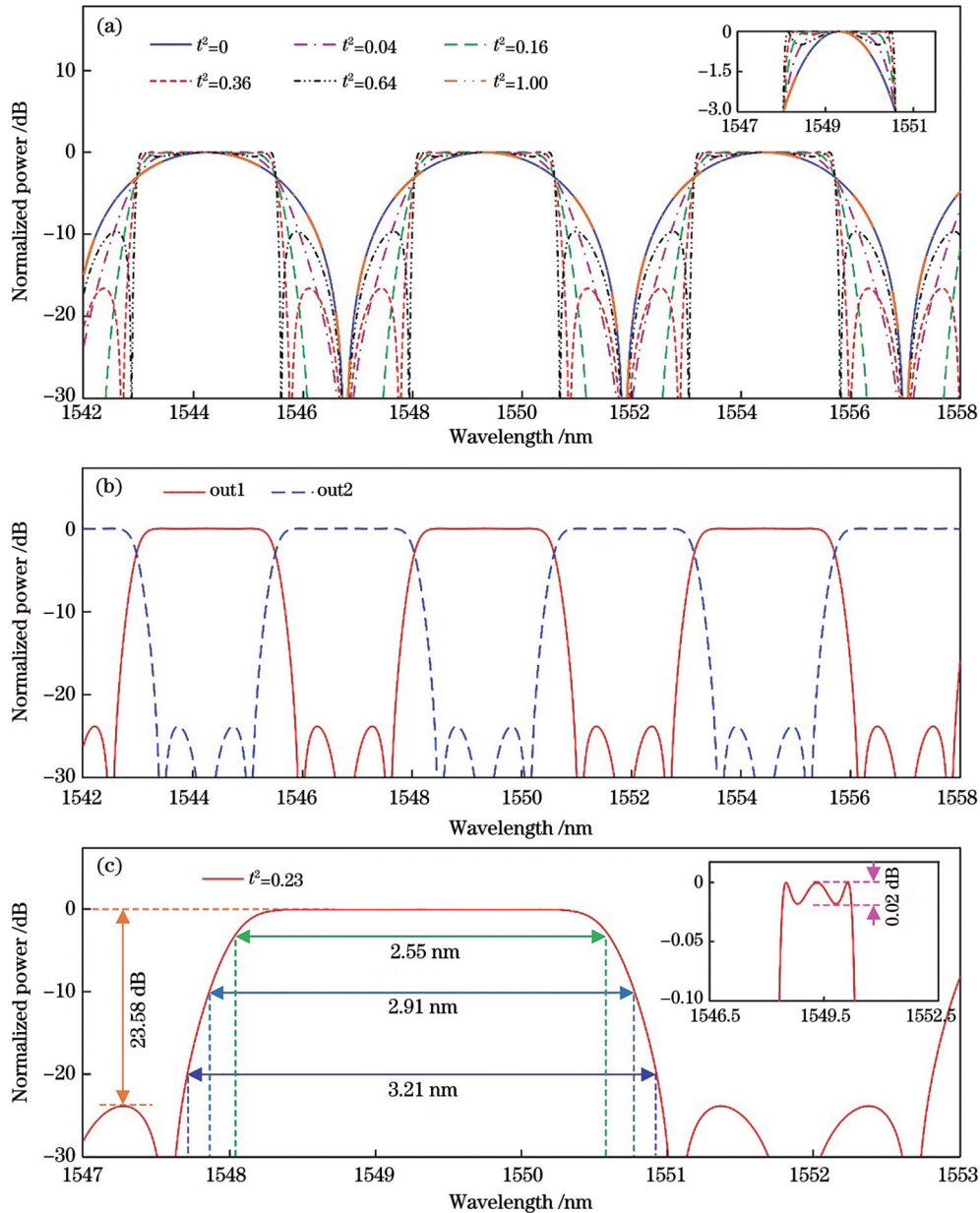


图 2 平顶滤波器在不同  $t^2$  下的模拟输出谱。(a) 不同  $t^2$  下 out1 端的功率输出谱;(b)  $t^2 = 0.23$  时两个输出端口的功率谱;(c) out1 端口的输出频谱放大图

Fig. 2 Simulated spectra of flat-top filter under different  $t^2$ . (a) Output spectra of out1 port under different  $t^2$ ; (b) spectra of the two output ports when  $t^2 = 0.23$ ; (c) enlarged view of the spectrum of out1 port

滤波器的形状因子逐渐增大,旁瓣抑制比逐渐减小。当  $t^2=0$  和  $t^2=1.00$  时,滤波器的输出谱呈余弦状,这是因为在这两种情况下 RMRR 与 MZI 上臂的耦合效果最差,整个滤波器等效于非对称 MZI 结构。为了研究滤波器的通带平坦度,进一步提取了图 2(a) 中波长为 1547~1551 nm、功率为 -3 dB~0 dB 的输出功率谱,如图 2(a) 的插图所示。可以看出,当  $t^2$  从 0.04 增加到 0.64 时,滤波器的纹波因数逐渐增大。综合分析发现,随着  $t^2$  的增大,滤波器的形状因子逐渐优化,而纹波因数与旁瓣抑制比逐渐劣化。为了均衡处理这 3 种重要的性能指标,再次对  $t^2$  进行多次仿真与优化,最终得到  $t^2=0.23$  时该滤波器的整体滤波性能最优,其两个输出端口的功率谱如图 2(b) 所示。显然,它们具有很好的互补性。因此,接下来只需要对 out1 端口的输出功率谱进行分析即可。为详细地分析该滤波器滤波性能的各项评价指标,对图 2(b) 中波长为 1547~1553 nm 的功率谱进行放大,如图 2(c) 所示。计算得到,该滤波器的 3 dB、10 dB 和 20 dB 带宽分别为 2.55 nm、2.91 nm 和 3.21 nm,相应的形状因子分别

为 0.88(形状因子 1)和 0.79(形状因子 3,即 3 dB 带宽与通带内功率下降 20 dB 时的通带宽度之比),纹波因数小于 0.02 dB,旁瓣抑制比为 23.85 dB,FSR 为 5.11 nm。

该平顶滤波器的相关结构参数如图 3 所示,其中对称  $2 \times 2$  MMI 的结构参数值来自本课题组之前的工作<sup>[21]</sup>,其输入/输出端单模波导的宽度  $w_0=500$  nm,矩形波导的长度  $l_0=10$   $\mu\text{m}$ ,锥形波导最宽处的宽度  $w_1=1.9$   $\mu\text{m}$ ,锥形波导的长度  $l=30$   $\mu\text{m}$ ,多模波导的宽度  $w_m=4$   $\mu\text{m}$ ,多模波导的长度  $l_m=56.5$   $\mu\text{m}$ ,相邻输入/输出端口的间隔  $g_0=2.068$   $\mu\text{m}$ 。此外,为防止 MZI 两臂之间的干扰,采用一对弯曲波导(弯曲半径  $r$  为 5  $\mu\text{m}$ )来增加 MZI 两臂之间的距离。假设 RMRR 中半圆形的弯曲半径为  $R_1$ 、直波导长度为  $L_1$ 、与 MZI 上臂之间的耦合间隙为  $g$ ,MZI 下臂中半圆形波导的弯曲半径为  $R_2$ 、连接两个半圆波导的直波导长度为  $L_2$ 、其他两个直波导的长度为  $L_3$  和  $L_4$ 。为了简化分析,可以令  $L_1=4L_2$ 、 $R_1=4R_2$  来满足  $L_r=2\Delta L$  ( $L_r=2\pi R_1+2L_1$ ,  $\Delta L=4\pi R_2+4L_2$ )。

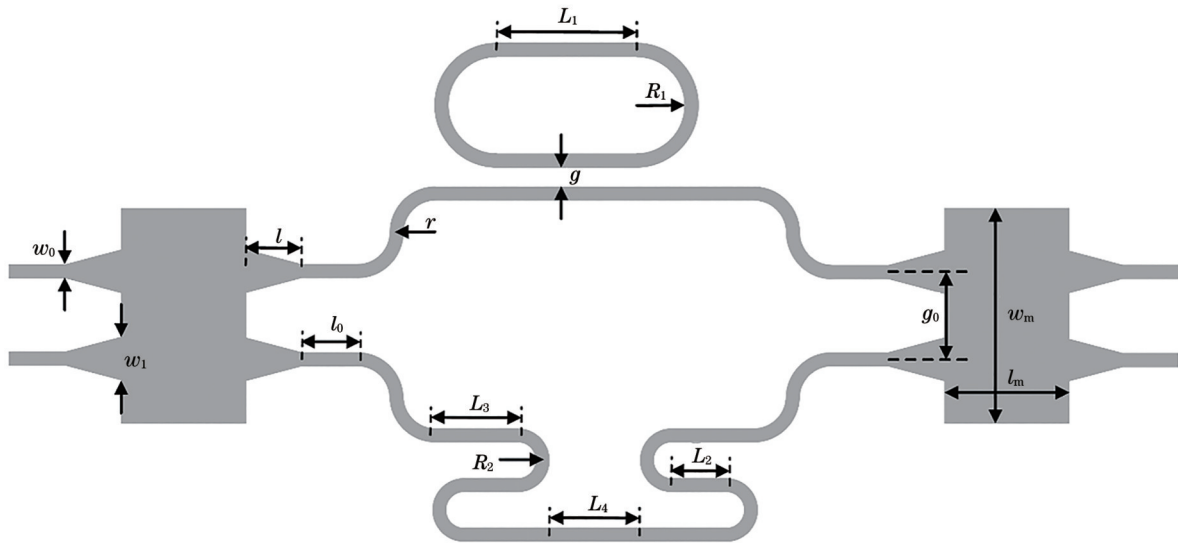


图 3 平顶滤波器的俯视图及相关结构参数

Fig. 3 Top view and related structure parameters of on-chip flat-top filter

为证明 RRA-MZI 结构较 RA-MZI 结构具有较大的工艺容差,选取文献[16]中 MRR 的结构参数,即  $R_1=4R_2=40$   $\mu\text{m}$ 。同时,为了构造 RMRR,取  $L_1=4L_2=20$   $\mu\text{m}$ 。由于耦合系数  $\kappa$  是平顶滤波器滤波性能的关键影响因素之一,且  $\kappa$  的取值由耦合间隙  $g$  和耦合长度  $L_1$  共同决定,因此在  $L_1$  固定的情况下,可以通过不断优化  $g$  的方式来达到与文献[19]相同的耦合效果。图 4(a) 展示了不同  $g$  下所设计滤波器的输出情况。可以发现,当  $g$  从 0.23  $\mu\text{m}$  增加到 0.50  $\mu\text{m}$  时,滤波器的形状因子逐渐增大,旁瓣抑制比逐渐减小,纹波因数逐渐增大。直至  $g=0.50$   $\mu\text{m}$  时,输出功率谱才

呈余弦状。因此,综合分析可得, $g=0.25$   $\mu\text{m}$  时所设计滤波器的滤波性能最优,其两个输出端口的功率谱如图 4(b) 所示,它们也具有明显的互补性。同理,为了详细地表征所设计滤波器的滤波性能,对 out1 端口处 1547~1553 nm 波长范围内的输出功率谱进行放大,如图 4(c) 所示。该滤波器的 3 dB、10 dB 和 20 dB 带宽分别为 2.55 nm、2.93 nm 和 3.24 nm,相应的形状因子分别为 0.87(形状因子 1)和 0.79(形状因子 3),纹波因数为 0.11 dB,旁瓣抑制比为 22.78 dB,插入损耗为 0.22 dB,FSR 为 5.22 nm。这与图 2 所示的结果具有很好的 consistency。

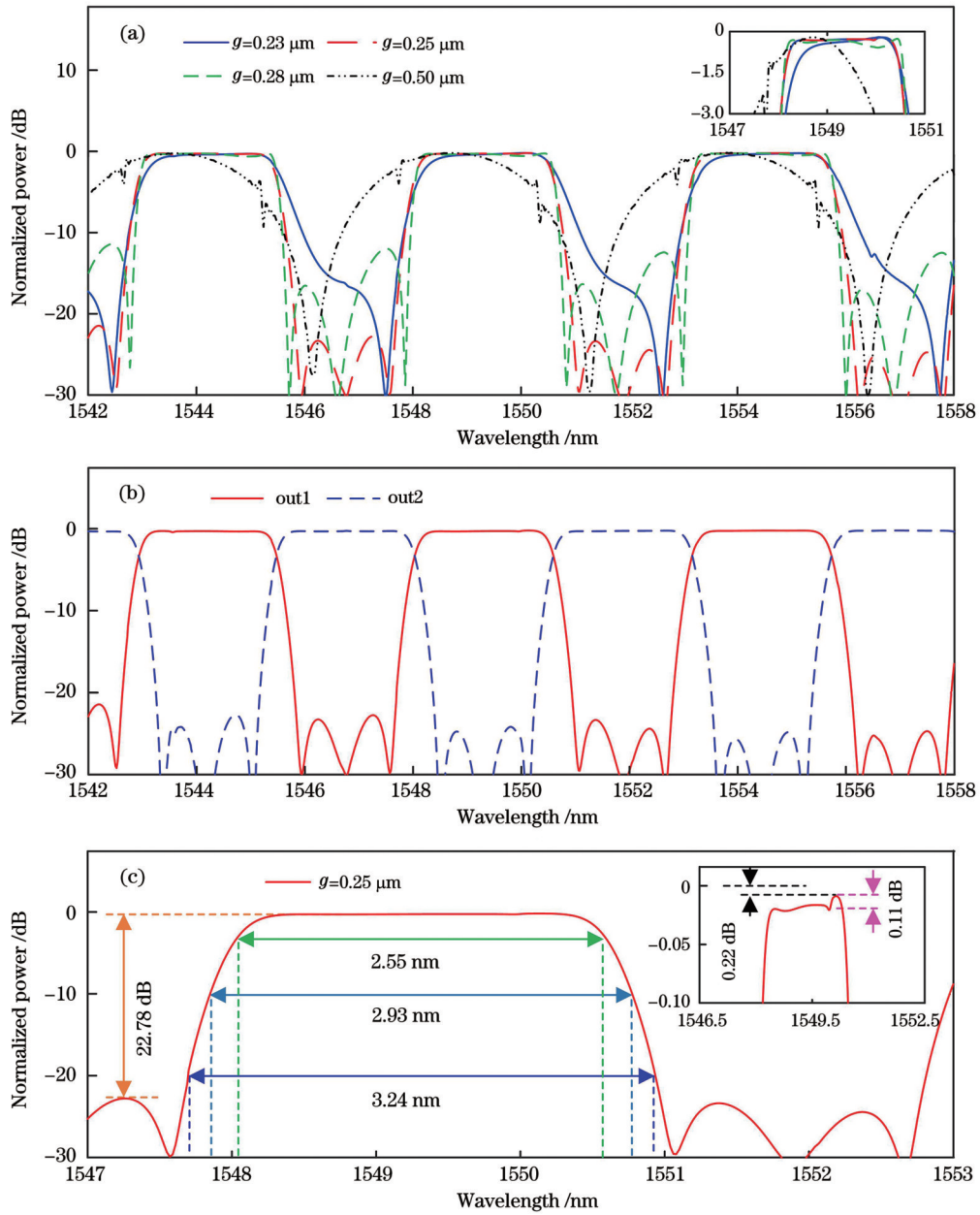


图 4 平顶滤波器在不同  $g$  下的模拟输出频谱。(a) 不同  $g$  下 out1 端的功率输出谱; (b)  $g=0.25 \mu\text{m}$  时, 两个输出端口的功率谱; (c) out1 端口的输出频谱放大图

Fig. 4 Simulated spectra of flat-top filter under different  $g$ . (a) Output spectra of out1 port under different  $g$ ; (b) spectra of the two output ports when  $g=0.25 \mu\text{m}$ ; (c) enlarged view of the spectrum of out1 port

### 3 片上平顶滤波器的制备、性能测试及结果分析

所提平顶滤波器采用商用 SOI 芯片进行制作, 光栅耦合器的刻蚀深度为 70 nm, 波导刻蚀深度为 220 nm。使用金相显微镜观察的形貌如图 5(a) 所示。为了削弱工艺误差的影响, 在 RMRR、耦合区域和 MZI 下臂分别集成一个微加热器。但由于电极的制作问题, 最终只有集成在 RMRR 上的加热器(加热长度为 145.66  $\mu\text{m}$ )可以工作。通过调控该加热器的温度, 分析由 RMRR 引入的相移对所设计滤波器滤波

性能的影响。其中,  $2 \times 2$  MMI 和 RMRR 的细节分别如图 5(b)、(c) 所示。值得注意的是, 为彻底防止 MZI 两臂间的干扰, 将弯曲波导的弯曲半径  $r$  提高到 20  $\mu\text{m}$ , 此时器件的核心区域(不包括光栅耦合器和电极)的面积为 483  $\mu\text{m} \times 203.40 \mu\text{m}$ 。

为了验证所提平顶滤波器具有高形状因子、低工艺复杂度等特性, 采用波长为 1530~1570 nm 的宽带光源作为输入信号源, 并将独立直流电压源产生的电压施加到微型加热器上进行温度调节, 并使用分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪测量输出端口的功率谱。所提滤波器的损耗为 2 dB, 每个端口的光栅耦合器的损

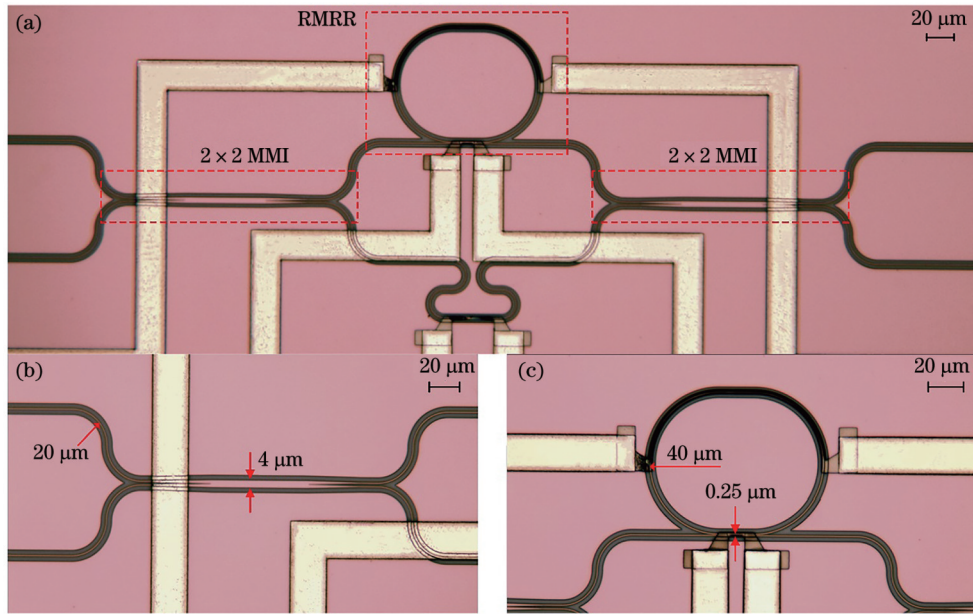


图 5 所提平顶滤波器的金相显微图。(a)整个滤波器;(b)对称的 $2 \times 2$  MMI;(c)全通 RMRR

Fig. 5 Metallographic micrograph of proposed flat-top filter. (a) Whole filter; (b) symmetrical  $2 \times 2$  MMI; (c) all-pass RMRR

耗为 17.22 dB。图 6(a)显示了未对加热器加热时,所提滤波器两个输出端口的透射谱,其与图 4(b)所示的模拟结果一样,两条功率谱正好互补。同理,为了详细

地表征该滤波器的滤波特性,对 out1 端口处 1548~1553 nm 波长范围内的功率谱进行放大,如图 6(b)所示。该滤波器的纹波因数为 2.40 dB,旁瓣抑制比为

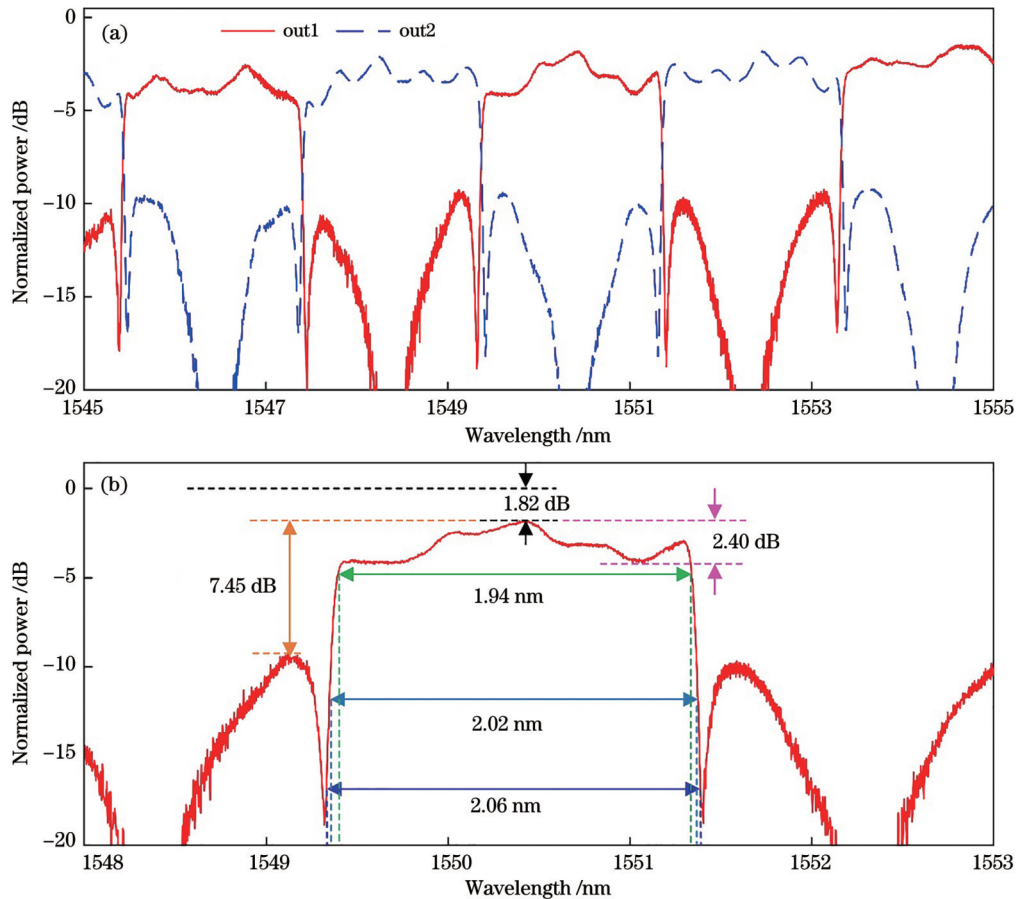


图 6 无温度变化时平顶滤波器的实测频谱。(a)两个输出端口的功率谱;(b) out1 端口的输出频谱放大图

Fig. 6 Experimental spectra of flat-top filter when there is no temperature change. (a) Spectra of the two output ports; (b) enlarged view of the spectrum of out1 port

7.45 dB, 插入损耗为 1.82 dB, FSR 为 3.94 nm。此实验结果与图 4(c) 所示的模拟结果略有不同: 1) 该滤波器的纹波因数略有增大, 旁瓣抑制比有所减小, 这主要是因为工艺误差导致耦合系数  $\kappa$  与设计值不符; 2) 滤波器的 FSR 略微减小, 这主要是因为工艺误差导致  $\Delta L$ 、波导宽度和波导刻蚀深度等偏离了设计值。通过调节集成在芯片上的微型加热器, 可以有效削弱工艺误差带来的影响, 但不幸的是, 由于电极的制作问题, 目前只有一个加热器可以工作, 无法进一步改善滤波效果。虽然滤波器的旁瓣抑制比小于 10 dB, 已不再适合滤波器 10 dB 和 15 dB 带宽的测量, 但该问题可以通过提升电极制作水平得到解决, 因此, 本文仍然按照图 4(b) 的方法计算滤波器的形状因子。该滤波器的 3 dB 带宽为 1.94 nm, 通带内功率下降 10 dB 和 15 dB 时, 通带宽度分别为 2.02 nm 和 2.06 nm。根据上述参数计算得到的形状因子 1 为 0.96, 形状因子 2 为 0.94。在后续的分析中, 采用相同的方法测量滤波器的两个形状因子。

为了研究由 RMRR 引入的相移对所提平顶滤波器性能的影响, 及验证通过调节施加在 RMRR 上的电压可以有效控制该滤波器的输出谱, 对集成在 RMRR 上的微型加热器进行加热, 测量了不同电压情况下该平顶滤波器的输出功率谱。随着电压升高, 所提滤波器的中心波长逐渐红移, 红移量与电压的变化关系如表 1 所示; 在电压升高的过程中, 所提滤波器的滤波性能呈劣化  $\rightarrow$  优化  $\rightarrow$  劣化的周期性变化, 这主要是因为 RMRR 引入的相移会随温度升高呈周期性变化, 且当相移为  $\pi$  的奇数倍时, 该滤波器的滤波性能最优。此外, 由于滤波器的中心波长红移量与温度变化成正比, 可以推断出电压与温度的关系, 如图 7 所示。

图 8 所示为不同温度下所提滤波器的输出谱。考虑到滤波器性能呈周期性变化, 接下来只对前两个周期中的最优和最差滤波性能进行详细分析。在第一个周期中, 未加热时, 所提滤波器的性能最优, 如图 8(a)

表 1 中心波长红移量与电压的关系

Table 1 Relationship between redshift of central wavelength and voltage

Voltage /mV	Redshift /nm	Voltage /mV	Redshift /nm
0	0	5.0	2.20
1.0	0.08	5.5	2.68
1.5	0.18	6.0	3.21
2.0	0.42	6.5	3.77
2.5	0.54	7.0	4.44
3.0	0.77	7.5	5.15
3.5	1.04	8.0	5.88
4.0	1.38	8.5	6.14
4.5	1.76		

的实线所示, 性能指标如上所述; 当加热温度为 8.80 °C 时, 滤波器性能最差。计算可得, 其形状因子 1 为 0.31、纹波因数为 12.78 dB、旁瓣抑制比为 3.20 dB。幸运的是, 随着温度的不断升高, RMRR 引入的相移再次逐渐被调整回  $\pi$  的奇数倍, 滤波器性能逐渐得以改善。在第二个周期中, 当温度为 18.53 °C 时, 滤波器性能最优。计算可得, 其形状因子 1 为 0.96、纹波因数为 2.39 dB、旁瓣抑制比为 5.92 dB。当温度为 26.91 °C 时, 滤波器性能最差。计算可得, 其形状因子 1 为 0.28、纹波因数为 13.77 dB、旁瓣抑制比为 4.09 dB。显然, 随着温度升高, 滤波器的性能会再次优化后劣化, 这充分表明通过调节 RMRR 引入的相移可以有效地控制滤波器的输出功率谱。随着温度的增加, 滤波器的插入损耗先增大再保持不变最后减小, 这主要是因为归一化损耗  $\alpha$  呈不定向变化(插入损耗随  $\alpha$  的减小而逐渐增大); 滤波器的纹波因数整体上逐渐增大, 这主要是受到环境扰动的影响(环境扰动随损耗的增加而逐渐增大)。此外, 通过非对称 MZI 的干涉臂上集成更多的 MRR, 可以进一步提升滤波器的滤波性

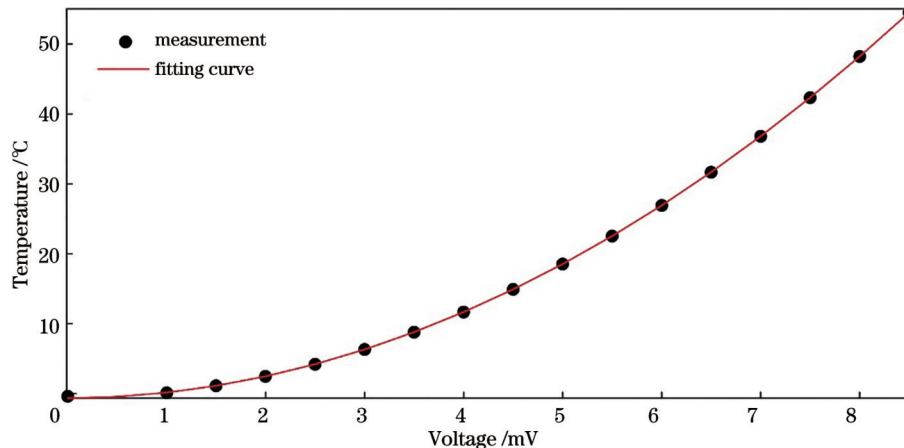


图 7 电压和温度之间的关系

Fig. 7 Relationship between voltage and temperature

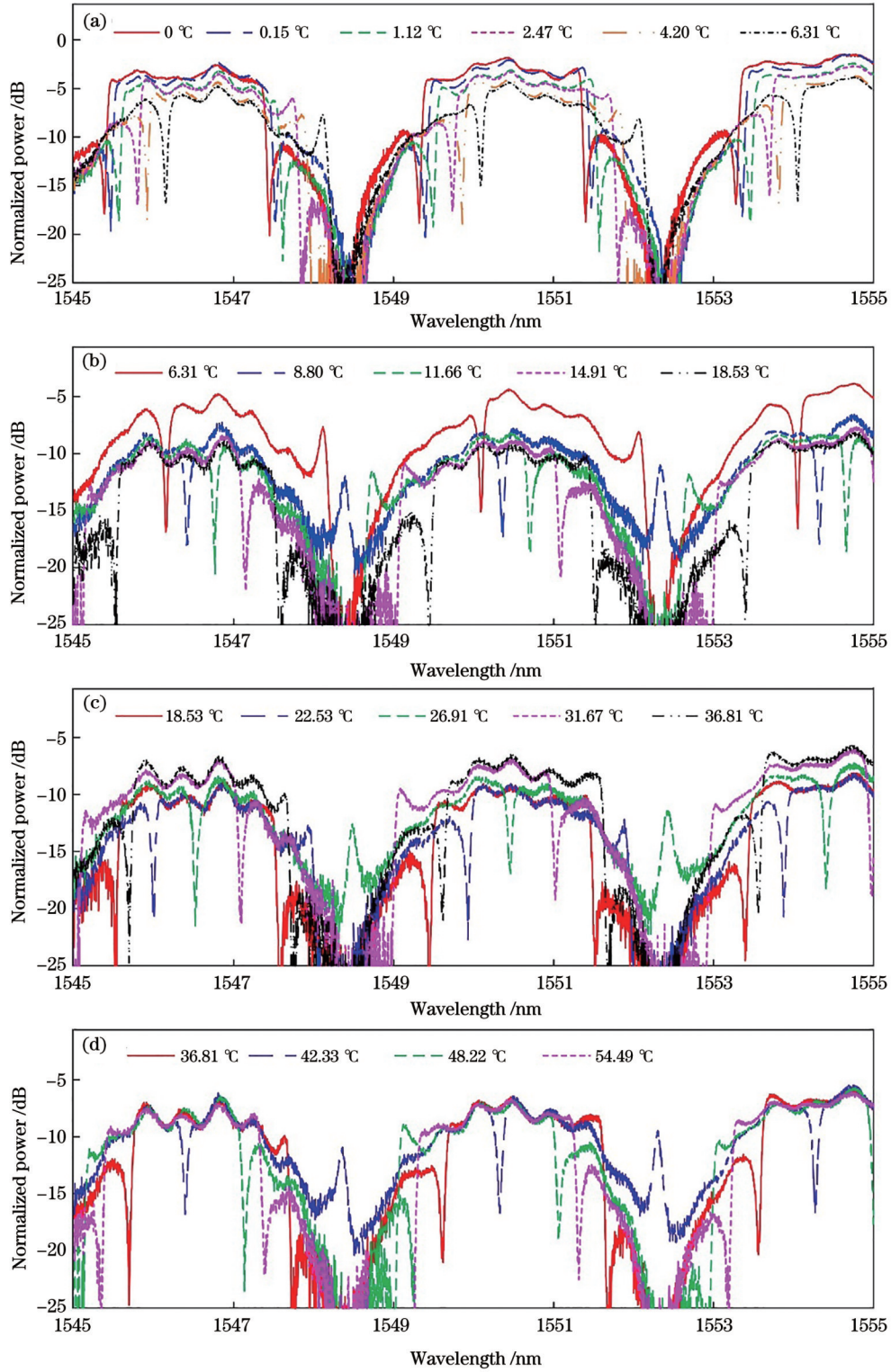


图 8 加热温度变化时,平顶滤波器的输出频谱。(a) 0~6.31 °C; (b) 6.31~18.53 °C; (c) 18.53~36.81 °C; (d) 36.81~54.49 °C  
 Fig. 8 Output spectra of flat-top filter when heating temperature changes. (a) 0~6.31 °C; (b) 6.31~18.53 °C; (c) 18.53~36.81 °C; (d) 36.81~54.49 °C

能<sup>[22]</sup>,而通过多级级联该结构可以设计出具有可重构功能的波长复用器<sup>[23]</sup>。

## 4 结 论

提出一种采用RMRR辅助非对称MZI结构的超

高形状因子硅基光学平顶滤波器方案,并详细分析了平顶滤波器滤波性能的主要评价指标,特别是可以评价滤波形状的形状因子和纹波因数。实验结果表明,该滤波器的3 dB带宽为1.94 nm,通带内功率下降10 dB和15 dB时通带宽度为2.02 nm和2.06 nm,相



应的形状因子 1 和形状因子 2 分别为 0.96 和 0.94, 纹波因数为 2.40 dB、旁瓣抑制比为 7.45 dB、插入损耗为 1.82 dB。此外, 通过研究由 RMRR 引入的相移对该平顶滤波器性能的影响, 证明了通过调节施加在 RMRR 上的电压可周期性地改变滤波器的滤波性能。该方案具有形状因子高、工艺复杂度低、体积小、质量轻、功耗低等优点; 由于该滤波器的两个输出端口的功率谱是互补的, 在光信号传输过程中几乎没有能量损失。此外, 该平顶滤波器也可以通过多级级联的方式成为波分复用器的一部分, 广泛地应用于高速光通信网络中。

## 参 考 文 献

- [1] 蔡晓, 左玉华, 王启明. 平顶响应的热光可调谐 Fabry-Perot 滤波器[J]. 光电子·激光, 2004, 15(10): 1144-1148.  
Cai X, Zuo Y H, Wang Q M. Fabry-Perot thermo-optical tunable filter of flat-top response[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2004, 15(10): 1144-1148.
- [2] 忻伶俐, 周雪芳, 毕美华, 等. 通道间隔可切换的双 Lyot 滤波器的结构设计 with 性能分析[J]. 中国激光, 2022, 49(21): 2106002.  
Xin L Y, Zhou X F, Bi M H, et al. Structural design and performance analysis of dual Lyot filter with switchable channel interval[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(21): 2106002.
- [3] Pan X X, Luo F G, Deng L. Structure design of interleaver based on birefringent-crystals[C]//2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), November 13-16, 2011, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2011.
- [4] Lu H W, Zhang B G, Li M Z, et al. A novel all-fiber optical interleaver with flat-top passband[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(13): 1469-1471.
- [5] 李璇, 应康, 苏庆帅, 等. 光学滤波器用超窄带光纤光栅的光谱性能研究[J]. 中国激光, 2023, 50(14): 1406002.  
Li X, Ying K, Su Q S, et al. Study on spectral properties of ultra-narrow-band fiber Bragg gratings for optical filters[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(14): 1406002.
- [6] Hsieh C H, Lee C W, Huang S Y, et al. Flat-top and low-dispersion interleavers using gires-tournois etalons as phase dispersive mirrors in a Michelson interferometer[J]. Optics Communications, 2004, 237(4/5/6): 285-293.
- [7] Zhong C Y, Li J Y, Lin H T. Graphene-based all-optical modulators[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2020, 13(2): 114-128.
- [8] Mu H R, Liu Z K, Bao X Z, et al. Highly stable and repeatable femtosecond soliton pulse generation from saturable absorbers based on two-dimensional Cu<sub>3-x</sub>P nanocrystals[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2020, 13(2): 139-148.
- [9] Mustonen P, MacKenzie D M A, Lipsanen H. Review of fabrication methods of large-area transparent graphene electrodes for industry[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2020, 13(2): 91-113.
- [10] 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.
- [11] Jiang X H, Zhang H X, Zhang Y, et al. Compact CWDM interleaver based on an interfering loop containing a one-dimensional Fabry-Perot cavity[J]. Optics Letters, 2018, 43(5): 1071-1074.
- [12] Liang X, Cheng R, Shen X Q, et al. Spectral-distortionless, flat-top, drop-filter based on complementarily-misaligned multimode-waveguide Bragg gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(23): 6600-6604.
- [13] Ding Y H, Ou H Y, Xu J, et al. Linear all-optical signal processing using silicon micro-ring resonators[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2016, 9(3): 362-376.
- [14] Wang Q, He S L. Optimal design of a flat-top interleaver based on cascaded M-Z interferometers by using a genetic algorithm[J]. Optics Communications, 2003, 224(4/5/6): 229-236.
- [15] 王鹏飞, 程威, 苍昭, 等. 基于级联微环的微波光子滤波器带宽压缩[J]. 光学学报, 2023, 43(22): 2213001.  
Wang P F, Cheng W, Cang Z, et al. Bandwidth compression of microwave photonic filter based on cascaded micro rings[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(22): 2213001.
- [16] Worhoff K, Roeloffzen C G H, de Ridder R M, et al. Design and application of compact and highly tolerant polarization-independent waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(5): 1276-1283.
- [17] Huang Z C, Meng X, Osgood R. A theoretical analysis of a resonator-assisted silicon photonic interleaver[C]//2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10-15, 2020, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [18] Song J F, Fang Q, Tao S H, et al. Passive ring-assisted Mach-Zehnder interleaver on silicon-on-insulator[J]. Optics Express, 2008, 16(12): 8359-8365.
- [19] Guan H, Liu Y, Li Z Z, et al. Passive silicon ring-assisted Mach-Zehnder interleavers operating in the broadband spectral range[J]. Applied Optics, 2020, 59(27): 8349-8354.
- [20] 张振宇. 微谐振环辅助马赫-曾德尔波长交错滤波器的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.  
Zhang Z Y. Study of interleaver based on ring resonator assisted Mach-Zehnder interferometer[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [21] Liao S S, Bao H, Zhang T T, et al. Integrated optical power splitter with continuously adjustable power splitting ratio[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(6): 7801513.
- [22] Chang S J. Wide passband optical interleaver based on double-ring-assisted Mach-Zehnder interferometer[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010, 52(4): 954-956.
- [23] Li S X, Shu H W, Jin M, et al. Broadening flat-passband DWDM filter design based on ring-assisted silicon asymmetric Mach-Zehnder interferometer[C]//2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), November 2-5, 2019, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2019.

# Silicon-Based Optical Flat-Top Filter with Ultrahigh Shape Factor

Liao Shasha\*, Wu Junxian

*School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China*

## Abstract

**Objective** Flat-top filters have been widely employed as channel selectors in wavelength division multiplexing systems due to their unique flat-top response characteristics, which can reduce the crosstalk among wavelengths and improve the rapidity and accuracy of channel optical detection. A large number of integrated schemes have been proposed and demonstrated in recent years, and most of them are based on silicon-on-insulator (SOI) platforms due to their capability for integration with electronics. However, these schemes have some disadvantages, with the schemes based on photonic crystal, waveguide grating, and cascaded microring resonators having a small fabrication tolerance. Meanwhile, schemes based on multistage cascaded Mach-Zehnder interferometer (MZI) have large footprints. Schemes based on microring resonator (MRR)-assisted MZI are proposed to achieve flat-top passband and small footprints, but in most previous schemes, an external phase shift of  $\pi$  or  $\pi/2$  should be applied on the MRR or the long arm of MZI, which is difficult to achieve in practical fabrication due to the variations of effective refractive index and fabrication error. Additionally, some performance indexes such as the shape factor and ripple factor are not analyzed in these schemes. Therefore, we theoretically analyze and experimentally verify a flat-top filter with a high shape factor and low-complexity fabrication processing. Our scheme is based on the SOI platform and consists of a racetrack MRR (RMRR) and an asymmetric MZI. In our scheme, no external phase shift is needed. In addition, we analyze all key indicators of the filtering performance of a flat-top filter, especially the indicators that evaluate the filter shape including the shape factor and the ripple factor. Our scheme features a high shape factor, low-complexity fabrication processing, small size, light weight, and low power consumption. It can not only be widely adopted in high-speed optical network communication but also be designed as a part of the wavelength multiplexer by multi-stage cascading.

**Methods** Our flat-top filter consists of an asymmetric MZI coupler and an RMRR, with the MZI consisting of a pair of  $2 \times 2$  multi-mode interferometers (MMIs). The input signal is divided into two light beams by the first MMI and transmits along the upper and lower arms of the MZI. The light beam in the upper arm is coupled into the RMRR to form an all-pass RMRR, and then the output light beam interferes with the light beam in the lower arm at the second MMI. A rectangular spectrum is generated ultimately. Due to the difficulty in realizing a phase shift of  $\pi$  or  $\pi/2$  in practical fabrication, we ignore it and optimize the performance of our filter by adjusting other structural parameters such as the gap between RMRR and the short arm of MZI or the length of the coupling waveguide. A micro-heater is fabricated on the RMRR to investigate the effect of the phase shift introduced by RMRR on the performance of our flat-top filter.

**Results and Discussions** The bandwidth of 3 dB of our filter is 1.94 nm. The ripple factor and the sidelobe suppression ratio are about 2.40 dB and 7.45 dB respectively. The insertion loss and FSR are about 1.82 dB and 3.94 nm respectively (Fig. 6). It is irrational to measure the bandwidths of 10 dB and 15 dB under the sidelobe suppression ratio of less than 10 dB. However, the shape factor is a crucial performance indicator of the flat-top filter, and the sidelobe suppression ratio can be significantly improved by controlling the micro-heater fabricated on the coupling area of RMRR. Therefore, we still calculate the shape factor by the same method in the simulation. The widths of the passband are 2.02 nm and 2.06 nm when the passband power declines by 10 dB and 15 dB respectively. As a result, the shape factor is 0.96 (1.94/2.02) and 0.94 (1.94/2.06). Additionally, we also measure the output spectra while tuning the voltage applied on the RMRR. The central wavelength of our filter gradually experiences redshift, and the filtering performance periodically varies in the trend of degradation, improvement, and degradation, which is mainly because of the periodical variation of the phase shift introduced by RMRR with the increasing temperature. It indicates that tuning the phase shift introduced by RMRR can effectively control the output spectra of the filter.

**Conclusions** We propose and demonstrate a flat-top filter with a high shape factor and low-complexity fabrication processing, and analyze all key indicators of the filtering performance of the flat-top filter, especially the indicators that evaluate the filter shape including the shape factor and the ripple factor. A filter with 3 dB bandwidths of 1.94 nm is realized. The corresponding shape factor 1 and shape factor 2 are 0.96 and 0.94 respectively. The ripple factor, the sidelobe suppression ratio, and the insertion loss are about 2.40 dB, 7.45 dB, and 1.82 dB respectively. Our scheme does not have

energy loss throughout the transmission process as the spectra of the two output ports are complementary. Furthermore, we investigate the influence of the phase shift introduced by RMRR on the performance of our flat-top filter and verify that the performance of our filter will vary periodically by adjusting the voltage applied to the RMRR. Our scheme is characterized by a high shape factor, low-complexity fabrication processing, small size, light weight, and low power consumption. Additionally, it can not only be widely utilized in high-speed optical network communication but also be designed as a part of the wavelength multiplexer by multi-stage cascading.

**Key words** optical devices; flat-top filter; integrated optics; racetrack microring resonator; silicon photonics