

低纹波因数、高形状因子的片上光学平顶滤波器

廖莎莎^{1,2,3*}, 张甜甜¹, 刘继伟¹, 包航¹¹重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065;²东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 211189;³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 提出了一种基于绝缘体上硅的低纹波因数、高形状因子的片上光学平顶滤波器方案。该方案采用跑道型环谐振器辅助非对称马赫-曾德尔干涉仪结构, 可实现纹波因数(通带最大功率与最小功率之比)约 0.11 dB、形状因子(3 dB 带宽与 20 dB 带宽之比)约 0.79、旁瓣抑制比约 22.78 dB、插入损耗约 0.22 dB、自由光谱范围(FSR)约 5.22 nm 的滤波谱线。在不改变结构的情况下, 通过成比例缩小相关尺寸, 滤波曲线的 FSR 可相应变化。当尺寸缩小为原来的 58% 时, FSR 增加至 11.17 nm、形状因子为 0.81、插入损耗为 0.21 dB、纹波因数和旁瓣抑制比分别约 0.14 dB 和 16.83 dB。最后, 模拟了小尺寸滤波器在实际制作中工艺误差对器件滤波性能的影响, 并进一步提出和证明利用片上微型热电极对该器件进行加热可有效削弱此影响的结论。该平顶滤波器具有尺寸小、质量小、制造简单、工艺容差大、纹波因数低、形状因子高、损耗小等优势, 可广泛应用于频率梳产生、光开关等光信号处理领域。

关键词 集成光学; 光子集成电路; 平顶滤波器; 跑道型微环谐振器

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2413001

On-Chip Optical Flat-Top Filter with Low Ripple Factor and High Shape Factor

Liao Shasha^{1,2,3*}, Zhang Tiantian¹, Liu Jiwei¹, Bao Hang¹

¹ School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

² State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China;

³ State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract We propose an on-chip optical flat-top filter based on silicon-on-insulator with low ripple factor and high shape factor. Our scheme is based on a racetrack microring resonator-assisted asymmetric Mach-Zehnder interferometer, and we realize a filter with the ripple factor (the ratio of the maximum power to the minimum power in passband) of 0.11 dB, the shape factor (the ratio of 3 dB bandwidth to 20 dB bandwidth) of 0.79, the sidelobe suppression ratio of 22.78 dB, insertion loss of 0.22 dB, and the free spectral range (FSR) of 5.22 nm. The FSR can be tuned by reducing the lengths of relevant waveguides proportionally without any changes in the structure. When the size is 0.58 of the original one, the FSR increases to 11.17 nm, and the shape factor is 0.81. The insertion loss is 0.21 dB, and the ripple factor and sidelobe suppression ratio are about 0.14 dB and 16.83 dB,

收稿日期: 2021-04-30; 修回日期: 2021-05-21; 录用日期: 2021-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(61801063)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN201800605)、重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0597)、东南大学毫米波国家重点实验室开放课题(K202005)、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

respectively. Finally, we simulate the effect of the fabrication error on the performance of the smaller filter, and further verify that we can eliminate the effect of the fabrication error by embedding micro-heaters in the filter. The flat-top filter has advantages of small size, light weight, low fabrication process, large fabrication tolerance, low ripple factor, high shape factor, and low loss. It can be widely used in frequency combs generation, optical switch and some other optical signal processing fields.

Key words integrated optics; photonic integrated circuit; flat-top filter; racetrack microring resonator

OCIS codes 130.3120; 130.7408; 230.3120; 230.7408

1 引言

随着云计算时代的到来,数据流量喷井式的增长对光通信系统的传输容量和传输速率均提出了更高的要求。为经济有效地扩展信道容量,波分复用(WDM)技术应运而生。因其具有超大的传输容量、超高的系统可靠性、超灵活的扩容方法等优势,目前该项技术已在众多场景中得到了普遍应用,如光通信^[1]、分布式振动传感^[2]、数据保密传输^[3]等领域。平顶滤波器作为 WDM 系统中的重要光学元件,在信道划分方面起着重要的作用,关于它的实现方案也在不断地优化与创新。

目前,常见的片上平顶滤波器方案主要是基于 Fabry-Perot (F-P) 腔、波导光栅、微环谐振器(MRR)等不同结构。其中 F-P 腔类平顶滤波器是一种成熟的滤波器方案。通过在硅波导中刻蚀空气孔^[4-5]可以实现光子晶体型 F-P 腔平顶滤波器,该方案虽然尺寸较小,但制作完成后其滤波曲线调控困难。近年来,Sagnac 环已成为构造非光子晶体型 F-P 腔滤波器的重要结构之一。Jiang 等^[6]基于定向耦合器和由两个 Sagnac 环构成的 F-P 腔结构,获得了纹波因数(通带最大功率与最小功率之比)约 1 dB、形状因子(3 dB 带宽与 20 dB 带宽之比)约 0.70、自由光谱范围(FSR)约 1.96 nm 的紧凑型硅光子平顶滤波器,并通过热光调控的方式使谱线约以 0.08 nm/mW 的调谐效率移动。Zhou 等^[7]将上述方案中的定向耦合器替换成可调谐 MZI,实现了一个形状因子约 0.69、FSR 约 0.45 nm 的平顶滤波器。通过热光调控的方式,该方案也可实现消光比(11.80 dB~24.00 dB)及中心波长(调谐效率约 0.0193 nm/mW)的灵活可调。但 F-P 腔对对准精度的要求高,对应用场景具有一定的限制。波导光栅因尺寸小、功耗低、集成度高等优势,近年来也被逐渐用于实现平顶滤波器。Yun 等^[8]基于变迹亚波长光栅反向耦合器,实现了一个旁瓣抑制比约 12 dB、3 dB 带宽约 33.2 nm 的宽带平顶滤波器。但并未研究滤波曲线通带平坦度、边缘陡峭度等平

顶滤波器的重要指标。Liang 等^[9]利用变迹多模波导布拉格光栅,设计了一个波纹因数最大约 0.8 dB、形状因子约 0.75、旁瓣抑制比约 21.8 dB 的无光谱失真平顶滤波器,并证明级联该结构还可将旁瓣抑制比进一步增大至约 40 dB。但该类方案存在容差小且对工艺稳定性要求较高的弊端。MRR 具有功能配置灵活、结构紧凑、调谐功耗较小、易于制作等优势^[10],是构成平顶滤波器的重要结构之一。Xia 等^[11]利用 5 级级联 MRR,实现了一种波纹因数约 0.4 dB、旁瓣抑制比约 40 dB、1 dB 带宽约 2.48 nm、通带中心插入损耗约 1.8 dB \pm 0.5 dB、尺寸约 700 μm^2 的超紧凑平顶滤波器。Xu 等^[12]利用 10 级级联 MRR(半径约 40 μm)和一个光电探测器,设计了一种纹波因数小于 0.3 dB、旁瓣抑制比约 32 dB、3 dB 带宽在 0.04~0.16 nm 之间可调的微波光子滤波器。但该类方案在实现平坦通带时需要级联多个 MRR,且每个 MRR 的谐振波长需精确对准,因此具有工艺容差较小、制作困难、体积较大等不足。

综上所述,目前常见的三类平顶滤波器集成方案,虽然在宽带、通带平坦性、灵活性方面各自都具有一些优势,但也存在着一些不足,如滤波性能不稳定、制作精度要求高、工艺容差小、体积较大、成本较高等。为了解决上述不足的问题,本文提出一种新型的具有低纹波因数、高形状因子的片上平顶滤波器方案。该方案采用绝缘体上硅(SOI)芯片,由一个马赫-曾德尔干涉仪(MZI)和跑道型 MRR 构成。该平顶滤波器的纹波因数约 0.11 dB、形状因子约 0.79、旁瓣抑制比约 22.78 dB、插入损耗约 0.22 dB、FSR 约 5.22 nm,滤波器核心结构尺寸约 423 $\mu\text{m}\times$ 143.59 μm 。该滤波器可通过成比例缩小或增大尺寸的方式实现 FSR 的倍增或倍减,以适应不同频段的滤波需求。本文研究了将结构核心尺寸减小为原尺寸的 58%时滤波器的性能。此时,该滤波器的形状因子提高至 0.81、插入损耗减小至 0.21 dB、FSR 增加至 11.17 nm(约原来的 2.14 倍)、纹波因数和旁瓣抑制比分别约 0.14 dB 和 16.83 dB。

同时,本文还探究了工艺误差对较小尺寸平顶滤波器性能的影响,并利用片上微型热电极有效消除了该影响,充分展现了其可靠性高、工艺容差大的优势。该平顶滤波器具有尺寸小、质量小、制造简单、工艺容差大、纹波因数低、形状因子高、损耗小等优势,可广泛应用于频率梳产生、光开关等光信号处理领域。

2 低纹波因数、高形状因子片上平顶滤波器的原理及设计

MZI 是一种常见的硅基集成器件,在光信号处理领域中有着广泛的应用,它不仅构造光开关^[13]、可编程脉冲处理器^[14]等仪器,还可用于光学数字图案产生^[15]、神经网络性能分析^[16]等领域。对称 MZI 结构的示意图如图 1(a)所示,它一般由两个定向耦合器级联而成,从 in 端口输入的光几乎全部从 out2 端口输出。当 MZI 两臂长度不同时,两输出端口的功率随波长呈正弦波变化[如图 1(b)所示],虽然已能实现滤波功能,但通带平坦度和形状因子均不佳。为解决此问题,张振宇^[17]证明仅需将一个 MRR 放置在 MZI 短臂上,并使 MRR 与

MZI 短臂充分耦合[结构如图 1(c)所示],即可实现边界陡峭、通带平坦的输出谱。但前提是需要满足 4 个条件^[18]:1)MZI 两端耦合器的分光比在工作带宽内均为 1:1;2)MRR 周长是 MZI 两臂光程差的 2 倍;3)MRR 与 MZI 短臂间具有合适的耦合系数(约 50 nm 的耦合间隙);4)在 MRR 或 MZI 长臂上实现 π 或 $\pi/2$ 的相移。而条件 1)、3)和 4)在实际制作中均具有一定困难:常见的分光器件(如定向耦合器)的分光比随波长的变化,难以在大波长范围内保持 1:1,同时 Y 分支工艺容差较小,也难以保证信号均分;MRR 与 MZI 短臂间隔太小,工艺难度较大;器件的有效折射率随波长的变化而变化,通常只能在某一特定波长下实现 π 或 $\pi/2$ 的外部相移,而工艺误差也会导致实际相移与设计值存在偏差。因此,本文提出了一种结构简单、工艺容差大、制作难度低的平顶滤波器方案,如图 1(d)所示。方案中采用工艺容差大、波长敏感度低的对称 2×2 MMI 耦合器构造 MZI,利用跑道型 MRR 代替普通 MRR 以增大耦合间距,并放弃在实际制作中难以实现的条件 4),最后通过优化其他参数来改善滤波曲线。

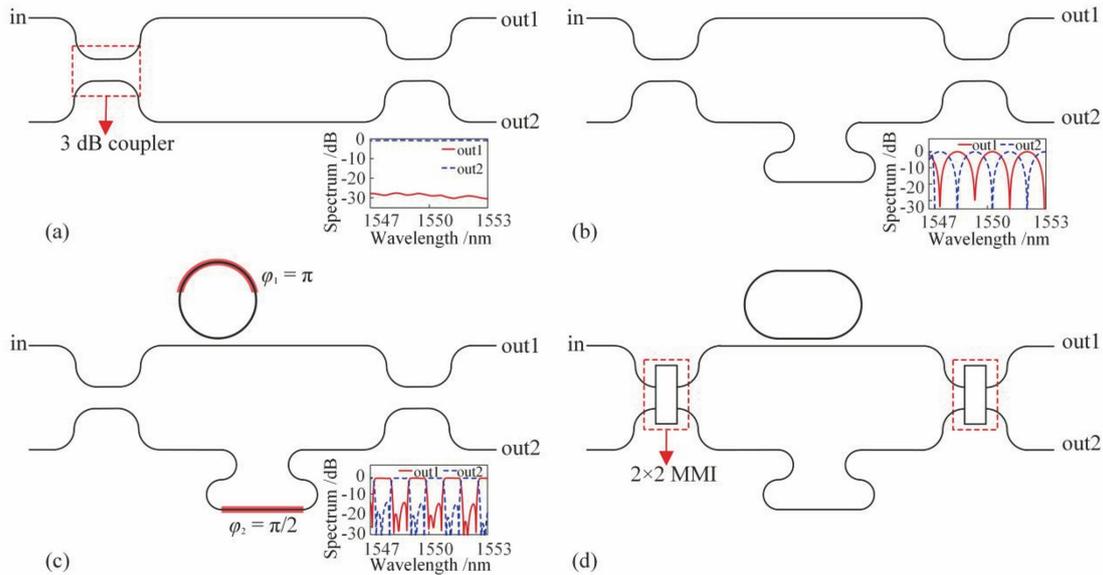


图 1 MZI 滤波器结构示意图。(a)对称 MZI 结构;(b)非对称 MZI 结构;(c)传统 MRR 辅助非对称 MZI 平顶滤波器结构;(d)跑道型 MRR 辅助非对称 MZI 平顶滤波器结构

Fig. 1 Schematic diagrams of MZI filter. (a) Symmetric MZI; (b) asymmetric MZI; (c) flat-top filter based on traditional MRR assisted asymmetric MZI; (d) flat-top filter based on racetrack MRR assisted asymmetric MZI

该滤波器的 3 维(3D)结构示意图如图 2(a)所示,其中 SOI 芯片的上硅层厚度为 220 nm,掩埋层厚度为 2 μm ,刻蚀的条形波导厚度为 220 nm。假设总输入光场强度为 E_{in} ,经第一个 MMI 分光后两支路的光场强度分别为 E_1 、 E_2 ,在第二个 MMI 会

合后前两支路的光场强度分别为 E_3 、 E_4 ,滤波器两输出端光场强度分别为 E_{out1} 、 E_{out2} ,则由图 2(b)所示的光路传输路径可表示为^[19]

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

而 E_1, E_2, E_3, E_4 间具有如下关系:

$$E_4 = E_2 \exp[-i\beta(L + \Delta l)], \quad (3)$$

$$E_3 = \left[A_2 - A_1 \exp(-i\beta l_r) \sum_{n=0}^{\infty} A_2^n \exp(-in\beta l_r) \right] \times E_1 \exp(-i\beta L), \quad (4)$$

式中: $A_1 = \kappa^2, A_2 = \sqrt{1 - \kappa^2}, \kappa$ 为 MZI 臂和跑道型 MRR 之间的耦合系数; β 为光在波导内的传播常数; n 为光在谐振器中循环的次数; L 为 MZI 短臂长度; Δl 为 MZI 两臂的长度差; l_r 为 MRR 的周长。假设光在跑道型 MRR 的循环次数为 k , 由(4)式可知, 若严格控制 $l_r = 2\Delta l$, 则结构的透射率可以表示为

$$T = \left| \frac{E_{out}}{E_{in}} \right|^2 = \frac{1}{4} \left| 1 + \frac{A_2}{i} \exp(i\beta l_r/2) - \frac{A_1}{i} \sum_{n=0}^k A_2^n \exp[-i(2n+1)\beta l_r/2] \right|^2, \quad (5)$$

(a)

式中最后一项与矩形函数的傅里叶级数一致, 因此可以实现边界陡峭、通带平坦的类矩形输出谱。平顶滤波器中相关结构参数的设置也如图 2(b)所示, 其中, 波导宽度 $w_0 = 500 \text{ nm}$, 锥形波导最宽处宽度 $w_1 = 1.9 \text{ }\mu\text{m}$, 锥形波导长度 $l = 30 \text{ }\mu\text{m}$, 矩形波导长度 $l_0 = 10 \text{ }\mu\text{m}$, 多模波导宽度 $w_m = 4 \text{ }\mu\text{m}$, 多模波导长度 $l_m = 56.5 \text{ }\mu\text{m}$, 相邻两输入/输出端口的间隔 $g_0 = 0.168 \text{ }\mu\text{m}$, 该对称 2×2 MMI 的结构参数源于我们之前的研究^[20]。为了防止 MZI 两臂相互影响, 用 $r_0 = 5 \text{ }\mu\text{m}$ 的弯曲波导增加两臂间的距离。MZI 下臂由两段长度为 $l_1 = 50 \text{ }\mu\text{m}$ 、四段长度为 l_2 、一段长度为 $l_3 = 30 \text{ }\mu\text{m}$ 的直波导以及四个半径为 r_1 的半圆形波导组成。假设 MZI 上臂与跑道型 MRR 的间距为 g_1 , 跑道型 MRR 的弯曲半径为 r_2 、直波导长度为 l_c 。由于 $l_r = 2\Delta l$ ($\Delta l = 4\pi r_1 + 4l_2$, $l_r = 2\pi r_2 + 2l_c$)、耦合系数 κ 合适均是满足平顶滤波器的关键条件, 而 κ 的取值不仅由 g_1 决定, 还与 l_c 有关。因此, 为便于分析, 不妨令 $l_c = 4l_2, r_2 = 4r_1$,

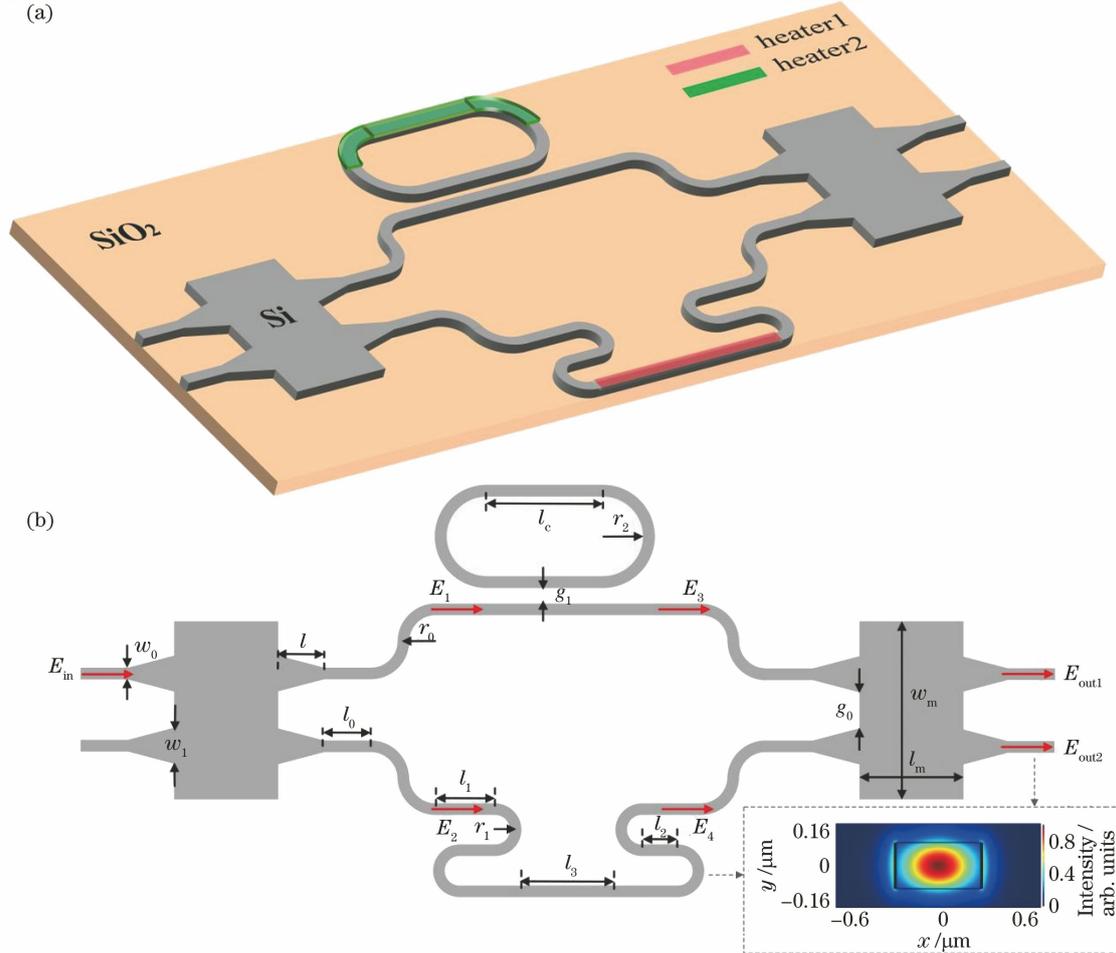


图 2 片上平顶滤波器结构示意图。(a) 3D 示意图; (b) 俯视图及相关结构参数

Fig. 2 Schematic diagram of the on-chip flat-top filter. (a) 3D view; (b) top view and related structure parameters

这样当改变 r_1, l_2 时,跑道型 MRR 的结构参数也可相应地确定。值得注意的是,该方案除 2×2 MMI 中的多模波导外,其余部分均采用的是单模波导,其模式电场如图 2(b)中的插图所示。

在此前提下,利用 Lumerical 软件对该滤波器的相关参数进行多次仿真与优化,最终发现当 $g_1 = 0.25 \mu\text{m}$ ($\kappa = 0.88$)、 $l_c = 4l_2 = 20 \mu\text{m}$ 、 $r_2 = 4r_1 = 40 \mu\text{m}$ 时,该平顶滤波器可以实现纹波因数较低、形状因子较高的矩形谱输出,如图 3 所示。其中,纵坐标采用了归一化功率,即计算出滤波器输出信号功率与输入信号功率的比值并将其转化为 dB 形式。因此,若滤波器在某波长处的归一化功率为 0 dB,则代表在此波长处输出信号功率与输入信号功率相同。此外,耦合间隙 g_1 的确定主要是在文献[18]相应尺寸的基础上通过不断增大间隙并观察输出谱

线的方式获得的。这是由于采用传统 MRR 辅助非对称 MZI 结构实现平顶滤波器,约需要 $0.05 \mu\text{m}$ 的耦合间隙[18]。而本研究采用的是跑道型 MRR,耦合区域的长度有所增加,因此若想实现相似的耦合效果,则需要大于 $0.05 \mu\text{m}$ 的耦合间隙。经过多次仿真,最终发现当 $g_1 = 0.25 \mu\text{m}$ 时器件输出谱的滤波性能最优。可以看出,此时该滤波器的模拟传输谱已十分清晰地显示出差分滤波特性,即当一个端口的透射率达到最大值时,另一个端口达到最小值。在中心波长 1549.27 nm 附近处,对 out1 端的输出谱进行计算后可得:该器件的纹波因数约为 0.11 dB 、形状因子约为 0.79 、旁瓣抑制比约为 22.78 dB 、 3 dB 带宽约为 2.55 nm 、FSR 约为 5.22 nm 、插入损耗约为 0.22 dB ,此时器件核心部分的尺寸为 $423 \mu\text{m} \times 143.59 \mu\text{m}$ 。

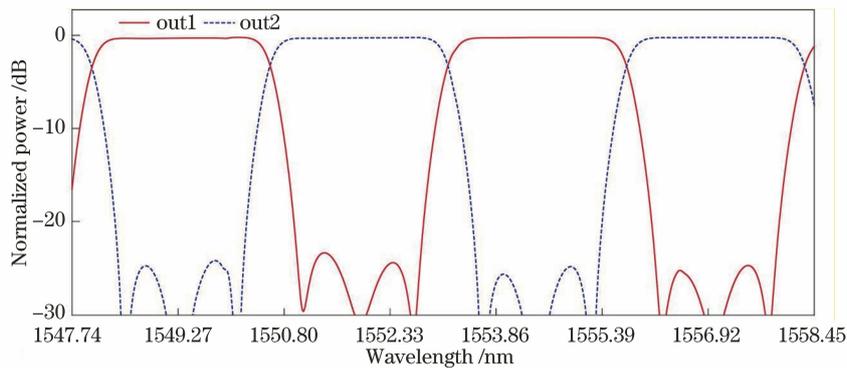


图 3 平顶滤波器两输出端口的频谱

Fig. 3 Spectra of the two output ports of the flat-top filter

3 小尺寸、大 FSR 平顶滤波器设计、工艺误差分析及补偿

本文提出的平顶滤波器可通过改变 MZI 两臂的长度差 Δl 成比例地改变滤波器的 FSR,从而使其满足不同波段的滤波需求。为了验证该结论,并提高滤波器的集成度,本文仿真了小尺寸、大 FSR 的平顶滤波器方案。由于弯曲半径过小会导致较大的传输损耗,因此令 $r_2 = 4r_1 = 20 \mu\text{m}$ 、 $l_c = 4l_2 = 4 \mu\text{m}$,此时器件尺寸减小为约原来的 58% ($423 \mu\text{m} \times 83.19 \mu\text{m}$)。值得注意的是,耦合长度 l_c 的变化导致跑道型 MRR 与 MZI 短臂的耦合间隙 g_1 也需被重新调试,以达到最佳耦合效果。由于 $0 \mu\text{m} < l_c < 20 \mu\text{m}$,因此相对应的 g_1 应处于 $0.05 \mu\text{m}$ (传统 MRR 与 MZI 上臂间的耦合间隙[18])与 $0.25 \mu\text{m}$ (第二节中跑道型 MRR 与 MZI 上臂间的耦合间隙)之间。

本研究模拟了 $g_1 = 0.10 \mu\text{m}$ 、 $0.12 \mu\text{m}$ 、 $0.15 \mu\text{m}$ 及 $0.22 \mu\text{m}$ 的情况下,滤波器 out1 端口输出功率随波长变化的曲线,如图 4(a)所示。通过观察可以看出,随着 g_1 的变化,滤波器的频谱响应表现出很大的差异。当 $g_1 = 0.22 \mu\text{m}$ 时,由于 MZI 短臂波导与跑道型 MRR 之间的距离较远,进入跑道型 MRR 的光较少,故频谱具有较大的旁瓣和纹波。当进一步对 1551.10 nm 中心波长附近的光谱进行放大时,可以发现当 $g_1 = 0.12 \mu\text{m}$ ($\kappa = 0.8$) 时平顶滤波效果最好。通过计算可得,此时该器件的纹波因数约为 0.14 dB 、形状因子约为 0.81 、旁瓣抑制比约为 16.83 dB 、 3 dB 带宽约为 5.46 nm 、FSR 约为 11.17 nm 、插入损耗约为 0.21 dB 。同样地,还模拟了该器件尺寸下, $1536.54 \sim 1560.88 \text{ nm}$ 波长范围内两输出端口的光谱响应,如图 4(b)所示。不难发现,此时的模拟传输谱也已清晰地显示了差分滤波特性。最后,为了更加直观地说明减小尺寸

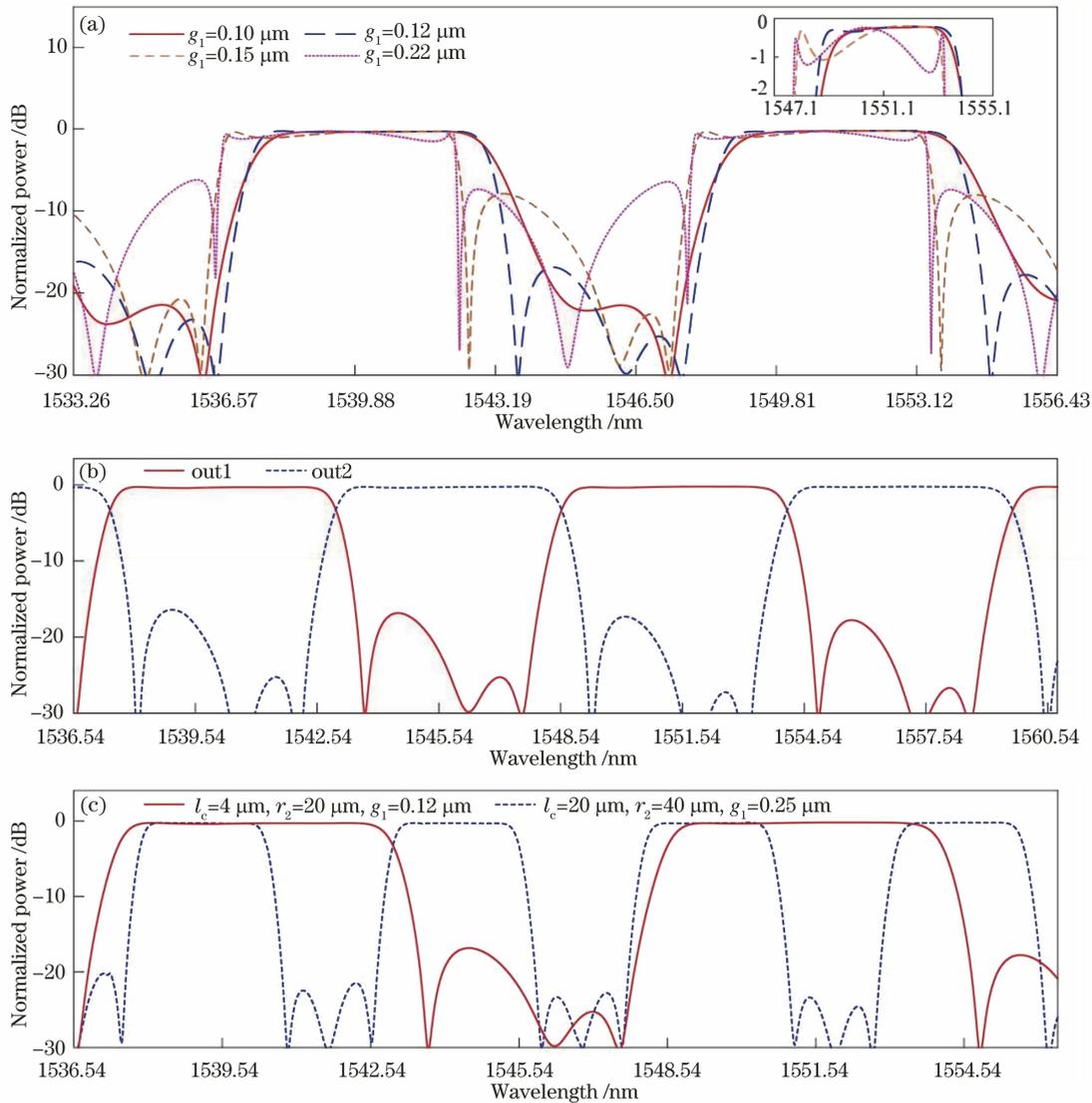


图 4 小尺寸平顶滤波器输出频谱。(a)不同 g_1 下 out1 端的功率输出谱;(b) $g_1=0.12 \mu\text{m}$ 时, 两输出端口的功率谱;(c)两种尺寸滤波器 out1 端的输出频谱对比

Fig. 4 Spectra of the small flat-top filter. (a) Output spectra of out1 port under different g_1 ; (b) spectra of the two output ports when $g_1=0.12 \mu\text{m}$; (c) comparison of spectra of out1 ports between the two different size filters

(即减小 Δl)对平顶滤波器性能的影响,本研究将这两种滤波器的 out1 端口输出结果进行了比较,如图 4(c)所示。通过计算可得,FSR 增大为原来的 2.14 倍,3 dB 带宽也相应地增大为原来的 2.14 倍,而插入损耗仅减小约 0.01 dB,这是由于我们采用的仿真软件默认 MRR 弯曲波导的侧壁是完全平滑的,因此当 MRR 的弯曲半径大于 $5 \mu\text{m}$ 时,损耗的变化将会非常小。此外,还可以清晰地看到,减小器件尺寸虽然可以改善该滤波器的形状因子,但也会导致纹波因数略增大及旁瓣抑制比略减小,因此二者需作均衡处理。同时这也说明,对于小尺寸、大带宽、高形状因子、高通带平坦度的应用场景,本文设

计的平顶滤波器也能够满足需求。

器件制作过程中存在的工艺误差,会导致波导的长度、宽度等偏离设计值。而器件本身的尺寸越小,工艺误差对滤波性能的影响越大,因此,需要着重分析小尺寸平顶滤波器中工艺误差对滤波器性能造成的影响,并提出相应的改善方案。本研究分别模拟了该滤波器在 5 种不同工艺误差引起的不同失配条件下 out1 端口的输出光谱。第一种是其他参数不变时,假设 l_2 和 l_c 都存在 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 的偏差。为了直观地表征该偏差对滤波性能的影响,绘制了如图 5 所示的二维图,其中:图 5(a)表征了滤波器的纹波因数,颜色越红则纹波因数越大、通带越不平

坦;图 5(b)表征了该器件的形状因子,颜色越蓝则形状因子越小、滤波曲线边缘陡峭度越低;图 5(c)表征了旁瓣抑制比,颜色越蓝则抑制比越低。通过对比可以看出,当 $l_2 = 1 \mu\text{m}$ 、 $l_c = 3.8 \mu\text{m}$ 时,该滤波器的滤波性能最差。此时纹波因数约 4.23 dB、形状因子约 0.13、旁瓣抑制比约 2.34 dB、插入损耗约 0.28 dB,该滤波器已无法满足实际应用。Si 因其热光系数高达 $1.84 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,是一种十分高效的热光材料,因此可以通过对滤波器局部升温的方式改善滤波曲线。我们在滤波器中设置了两个微型热光电极[如图 2(a)中 heater1 和 heater2 所示],通过调控 heater1,适当调节 MZI 下臂波导的折射率,能够改善滤波器 out1 端的频谱输出,其结果如图 5(d)所示。通过观察可以发现,随着温度的升高,该器件的性能得以明显改善。当温度变化量为 $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,器件的滤波性能可以达到最优。此时该器件的纹波因数约 0.41 dB、形状因子

约 0.81、旁瓣抑制比约 10.28 dB、插入损耗约 0.30 dB。第二种是其他参数不变的情况下,假设 r_1 和 r_2 都存在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 的偏差,此时滤波器的输出情况如图 6 所示。通过观察可以看出,当 $r_1 = 4.2 \mu\text{m}$ 、 $r_2 = 19.5 \mu\text{m}$ 时,该滤波器的滤波性能最差。此时器件的纹波因数约 4.27 dB、形状因子约 0.14、旁瓣抑制比约 4.03 dB、插入损耗约 0.22 dB。通过调控 heater2,可以优化滤波器性能,其结果如图 6(d)所示。通过观察可以发现,当温度变化量为 $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,滤波性能已经得到明显改善。通过计算可知,此时器件的纹波因数减小至约 0.51 dB、形状因子增大至约 0.78、旁瓣抑制比增大至约 6.02 dB、插入损耗约 0.25 dB。这两种情况均是假设波导长度存在工艺误差,但在实际器件的制作过程中一般不会出现数百 nm 的长度误差,所以通过调控 heater1 和 heater2 能有效消除波导长度误差带来的影响。

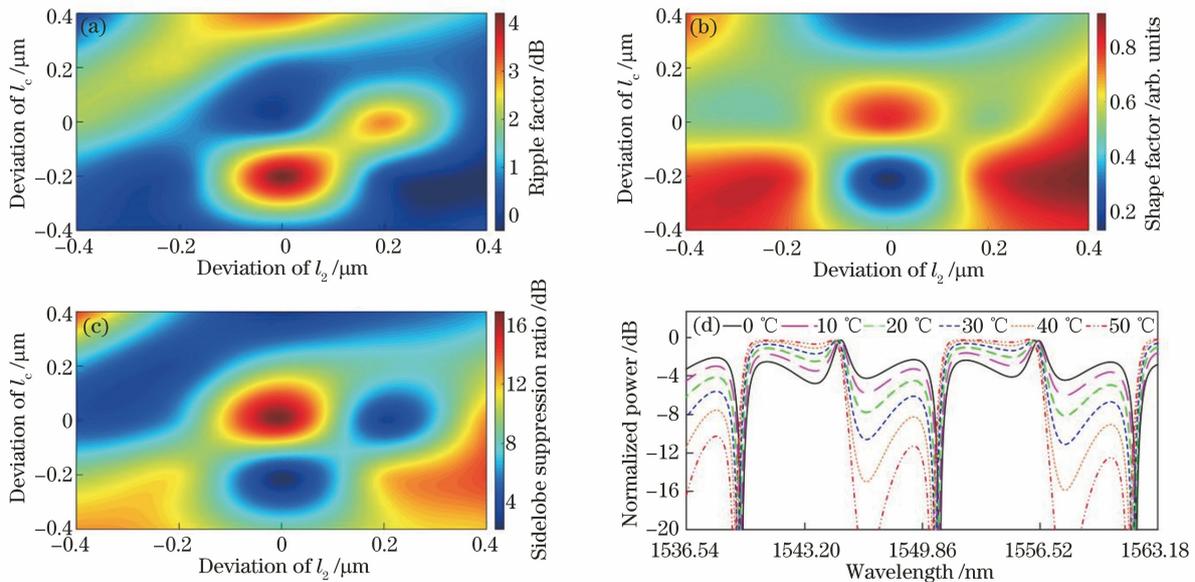


图 5 l_2 和 l_c 存在偏差时,滤波器的滤波性能。(a)纹波因数;(b)形状因子;
(c)旁瓣抑制比;(d)调控 heater1 时 out1 端口的输出谱

Fig. 5 Performance of filter when there are deviations between l_2 and l_c . (a) Ripple factor;
(b) shape factor; (c) sidelobe suppression ratio; (d) output spectra of out1 port when tuning heater1

接下来,又分别模拟了波导宽度误差对滤波性能的影响,其大致也可分为两类。第三种是其他参数不变的情况下,假设 MZI 上臂波导宽度存在 $\pm 0.04 \mu\text{m}$ 的偏差,此时该器件 out1 端口的输出情况如图 7(a)所示。通过观察可以看出,当波导宽度为 $0.52 \mu\text{m}$ 时,滤波性能最差。此时纹波因数约 4.67 dB、形状因子约 0.10、旁瓣抑制比约 1.80 dB、插入损耗约 0.29 dB。适当调控 heater1 可有效改

善滤波性能,out1 端的输出结果如图 7(b)所示。通过计算可得,当温度变化量为 $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,纹波因数减小至约 0.51 dB、形状因子增大至约 0.85、旁瓣抑制比增大至约 9.69 dB、插入损耗约 0.23 dB。第四种是其他参数不变的情况下,假设 MZI 下臂波导宽度存在 $\pm 0.04 \mu\text{m}$ 的偏差,此时滤波性能如图 8(a)所示。通过观察可以看出,当波导宽度为 $0.54 \mu\text{m}$ 时,滤波性能最差。此时纹波因数约 1.85 dB、形状

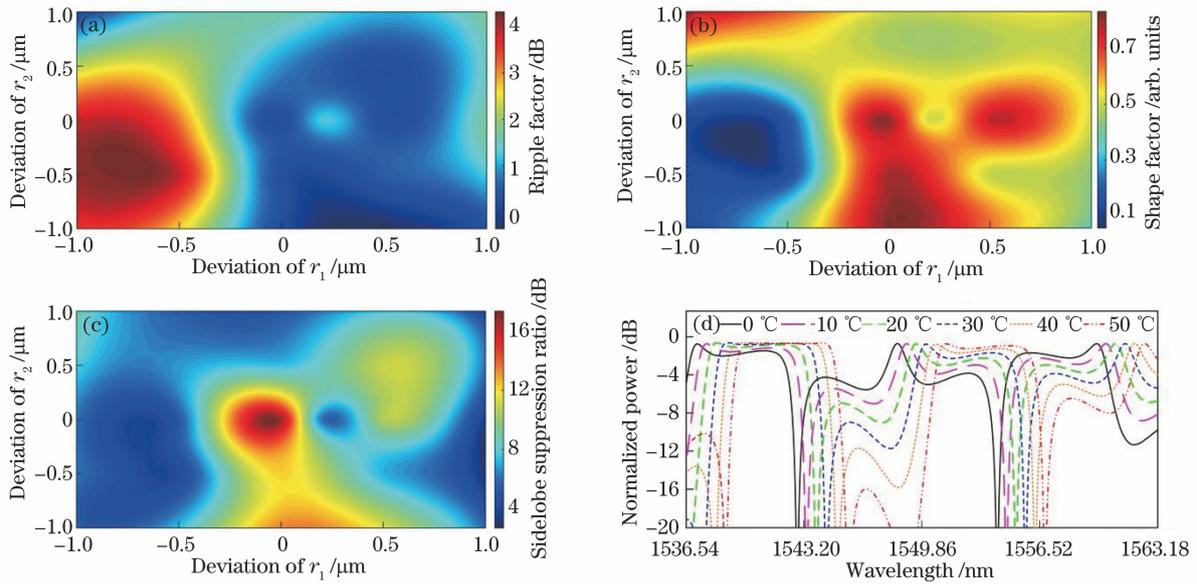


图 6 r_1 和 r_2 存在偏差时,滤波器的滤波性能。(a)纹波因数;(b)形状因子;
(c)旁瓣抑制比;(d)调控 heater2 时 out1 端口的输出谱

Fig. 6 Performance of filter when there are deviations between r_1 and r_2 . (a) Ripple factor;
(b) shape factor; (c) sidelobe suppression ratio; (d) output spectra of out1 port when tuning heater2

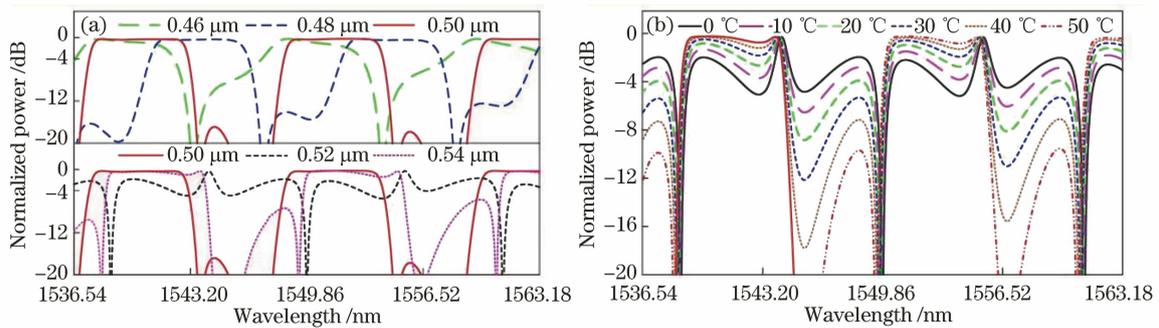


图 7 MZI 上臂波导宽度存在偏差时,滤波器的滤波曲线。(a)不同波导宽度下 out1 端的输出谱;
(b)调控 heater1 时 out1 端的输出谱

Fig. 7 Spectra of the filter when there is deviation in the width of the MZI upper arm waveguide. (a) Output spectra of out1 port with different widths of waveguide; (b) output spectra of out1 port when tuning heater1

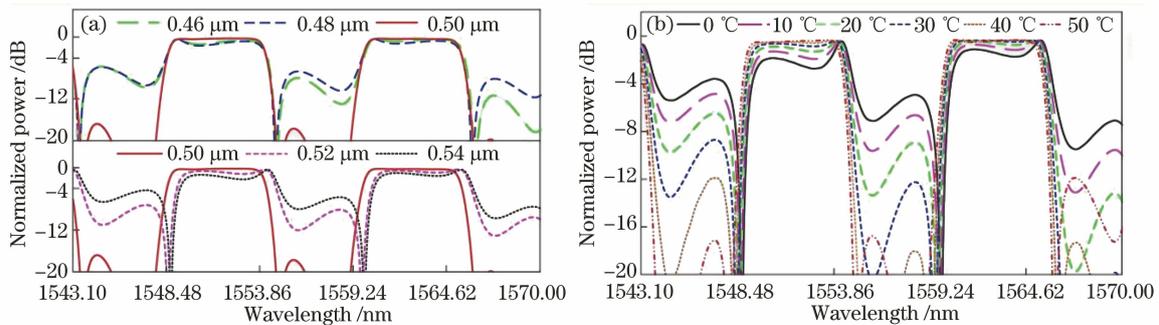


图 8 MZI 下臂波导宽度存在偏差时,滤波器的滤波曲线。(a)不同波导宽度下 out1 端的输出谱;
(b)调控 heater1 时 out1 端的输出谱

Fig. 8 Spectra of the filter when there is deviation in the width of the MZI lower arm waveguide. (a) Output spectra of out1 port with different widths of waveguide; (b) output spectra of out1 port when tuning heater1

因子约 0.51、旁瓣抑制比约 4.36 dB、插入损耗约 0.42 dB。同样地,适当调控 heater1,out1 端口的输出结果如图 8(b)所示。通过计算可得,当温度变化量为 50 °C 时,纹波因数减小和插入损耗分别减小至约 0.19 dB 和 0.36 dB、形状因子和旁瓣抑制比分别增大至约 0.83 和 16.78 dB。所以通过调控 heater1 能有效消除波导宽度误差带来的影响。

最后,模拟了 g_1 偏离设计值对滤波性能的影响。第五种是其他参数不变情况下,假设 g_1 存在 $\pm 0.02 \mu\text{m}$ 的偏差,此时 out1 端的输出情况如图 9(a)所示。通过观察可以看出,当 g_1 为 $0.10 \mu\text{m}$ 时滤波性能最差。此时纹波因数约 0.44 dB、形状因子约 0.52、旁瓣抑制比约 9.67 dB、插入损耗约 0.27 dB。为了改善此问题,可以通过调控 heater2 来修正 MZI 上臂与 MRR 间的耦合系数,如图 9(b)所示。可以看出,当温度改变量在 50 °C 以内时,滤波性能逐渐恶化;当温度改变量为 60 °C 时,输出谱线呈翻转状态;当温度改变量增加至 100 °C 时,该滤波器的滤波性能才得以优化。通过计算可得,此时纹波因数减小至约 0.09 dB、形状因子增大至约 0.69、旁瓣抑制比增大至约 26.24 dB、插入损耗减小至约 0.23 dB。若温度改变量继续增加至 110 °C 时,输出谱线再次变为原始

状态,故 110 °C 可以看作一个循环周期。因此若想改善 g_1 工艺误差对滤波性能造成的影响,至少需要使 heater2 温度变化 100 °C。然而,这远远超出了实际可能的升高温度(50 °C),这是由于设计的耦合长度 l_c 过小所致。因此,在器件的实际制作过程中,可以通过适当增加耦合长度 l_c ,在温度变化 $< 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时实现滤波性能的明显优化。值得注意的是,只要在增加 l_c 的同时,成比例增大 l_2 、微调耦合间隙 g_1 ,并成比例减小 r_1 和 r_2 ,就可以在不增大滤波器总体尺寸下实现相同的滤波频谱。此外,考虑到实际制作中 r_2 的弧度误差对耦合系数也具有影响,还可以在耦合区域上也制作一个微型热电极来进一步对 g_1 进行微调,以抵消 r_2 的弧度误差的影响。综上所述,利用片上微型热电极可以有效地抵消或削弱常见工艺误差对滤波器性能的影响,这很好地证明了该器件具有工艺容差大这一特性。对于硅材料对环境温度敏感,环境变化导致滤波器输出谱变化的情况,我们可以利用机器学习的相关方法提取滤波器输出谱线的特征点,实时判断谱线漂移情况,然后利用计算机控制芯片中微型热电极上的加载电压,实现稳定输出。在实际应用中,还可以采取热光调制与电光调制相结合的调控方式,来实现低损耗和快速调控。

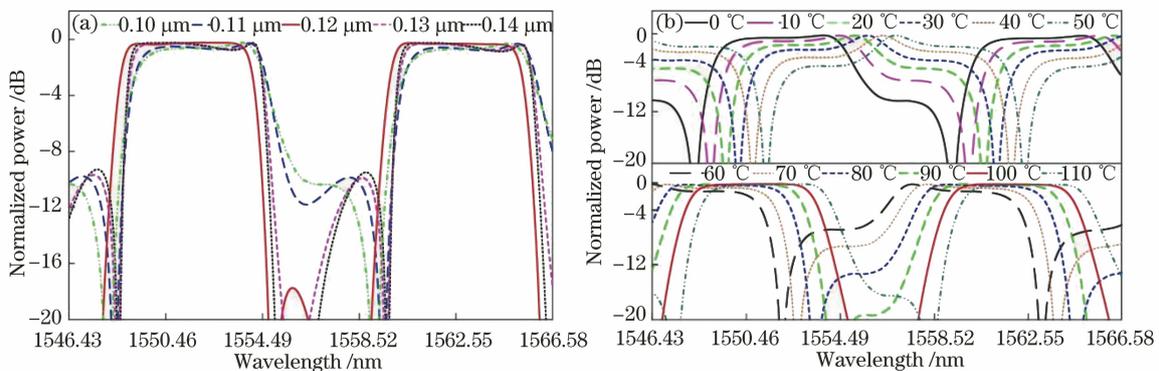


图 9 耦合间隙 g_1 存在偏差时,滤波器的滤波曲线。(a)不同 g_1 下 out1 端的输出谱;
(b)调控 heater2 时 out1 端的输出谱

Fig. 9 Spectra of the filter when there is deviation in the coupling gap g_1 . (a) Output spectra of out1 port with different g_1 ; (b) output spectra of out1 port when tuning heater2

此外,MZI 双臂的非对称性损耗也会对该器件的滤波性能造成一定的影响,特别是由侧壁粗糙度及 MRR 谐振所引起的损耗。但由于本方案是采用 Lumerical 软件进行模拟分析的,其默认波导侧壁完全平滑,因此本研究用 Matlab 软件分析了这两种损耗对器件性能造成的影响,结果如图 10 所示。其中,图 10(a)是由侧壁粗糙度引起的损耗的分析结

果[假设光仅在 MZI 下臂波导传输过程中存在一定的传输损耗(损耗系数为 α ,无损情况下 $\alpha = 1$)],图 10(b)及图 10(c)是由 MRR 谐振引起的损耗的分析结果[分别假设光在 MRR 内部传输和耦合区域耦合时具有一定的损耗(传输损耗系数为 α_r ,无损情况下 $\alpha_r = 1$;耦合损耗系数为 α_c ,无损情况下 $\alpha_c = 0$)]。针对这两种损耗情况,则(3)式、(4)式及

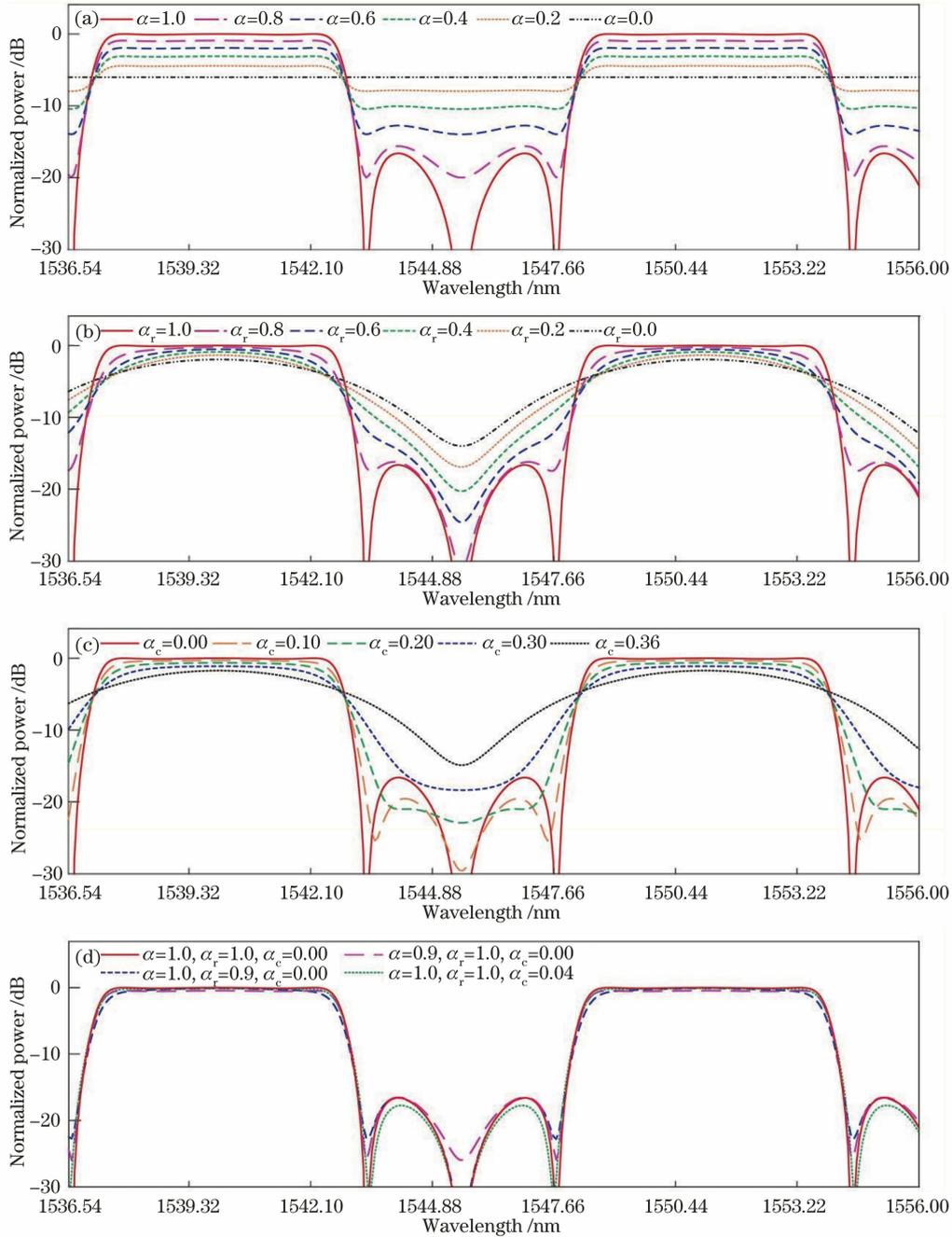


图 10 MZI 双臂存在非对称性损耗时,滤波器的滤波曲线。(a) MZI 下臂不同传输损耗下 out1 端的输出谱;(b) MRR 内部不同传输损耗下 out1 端的输出谱;(c) MZI 与 MRR 间不同耦合损耗下 out1 端的输出谱;(d)将损耗系数控制在 10%以内时 out1 端的输出谱

Fig. 10 Spectra of the filter when there is asymmetric loss in the arms of MZI. (a) Output spectra of out1 port with different transmission losses in the lower arm of MZI; (b) output spectra of out1 port with different internal transmission losses in MRR; (c) output spectra of out1 port with different coupling losses between MZI and MRR; (d) output spectra of out1 port when the variation of the loss coefficients are controlled within 10%

A_1 与 A_2 的关系可分别变为

$$E_1 \exp(-i\beta L), \quad (7)$$

$$E_4 = E_2 \alpha \exp[-i\beta(L + \Delta l)], \quad (6)$$

$$A_1 + A_2^2 = 1 - \alpha_c. \quad (8)$$

$$E_3 =$$

$$\left[A_2 - A_1 \alpha_r \exp(-i\beta l_r) \sum_{n=0}^{\infty} A_2^n \alpha_r^n \exp(-in\beta l_r) \right] \times$$

可见,随着 α 减小,MZI 下臂损耗逐渐增大,输出谱逐渐劣化。当 $\alpha=0$ 时,整体器件结构类似于一个过耦合全通型 MRR 结构,输出谱近似为一条直

线(MRR 凹陷峰的深度过)。随着 α_r 的减小或 α_c 的增大, MRR 的谐振损耗逐渐增大, 滤波性能也逐渐劣化。当 $\alpha_r=0$ 或 $\alpha_c=0.36$ 时, 损耗达到最大, 整体结构类似于一个非对称 MZI, 其输出谱类似余弦函数变化。对于这两种损耗, 虽然无法用热光调制的方式对其进行补偿, 但可以通过热氧化的方式削弱其对器件性能的影响。此外, 通过观察可以发现, 若将损耗系数控制在 10% 以内(即 $\alpha > 0.9, \alpha_r > 0.9$ 或 $\alpha_c < 0.04$), 则也可以获得与无损情况下几乎重叠的滤波器输出谱线(实线), 如图 10(d) 所示。

4 结 论

提出一种低纹波因数、高形状因子片上平顶滤波器方案, 该方案将硅基非对称 MZI 和跑道型 MRR 相结合。模拟表明, 该平顶滤波器在中心波长 1549.27 nm 附近的纹波因数约 0.11 dB、形状因子约 0.79、旁瓣抑制比约 22.78 dB、插入损耗约 0.22 dB、FSR 约 5.22 nm。该滤波器可以通过成比例缩小或增大相关尺寸获得可变的 FSR, 满足不同频段的滤波需求。当减小器件核心尺寸至原来的 58% 时, FSR 增加至 11.17 nm(约原来的 2.14 倍), 滤波器插入损耗减小至 0.21 dB、形状因子提高至 0.81、纹波因数和旁瓣抑制比分别约为 0.14 dB 和 16.83 dB。为了研究缩小尺寸后, 工艺误差对滤波性能的影响, 本文模拟了不同工艺误差情况下, 小尺寸结构平顶滤波器滤波性能的劣化情况。并进一步提出和证明利用片上微型热电极对该器件进行加热可消除工艺误差影响的结论。该平顶滤波器具有尺寸小、质量小、制造简单、工艺容差大、纹波因数低、形状因子高、损耗小等优势, 可广泛应用于频率梳产生、光开关等光信号处理领域。

参 考 文 献

- [1] Sayed A F, Mustafa F M, Khalaf A A M, et al. An enhanced WDM optical communication system using a cascaded fiber Bragg grating [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(3): 1-21.
- [2] Sun Z S, Liu K, Jiang J F, et al. Distributed vibration sensing with high frequency response by using WDM based integrated scheme [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(15): 155106.
- [3] Senkans U, Bobrovs V, Ivanovs G, et al. Research of hybrid WDM-PON data transmission system with embedded ASE-powered stealth channels for steganography applications [J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 58: 102300.
- [4] Frandsen L H, Elesin Y, Guan X W, et al. Flat-top drop filter based on a single topology optimized photonic crystal cavity [C] // 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10-15, 2015, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 1-2.
- [5] 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.
- [6] Jiang X H, Yang Y X, Zhang H X, et al. Design and experimental demonstration of a compact silicon photonic interleaver based on an interfering loop with wide spectral range [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(17): 3765-3771.
- [7] Zhou N, Zheng S, Long Y, et al. Reconfigurable and tunable compact comb filter and (de)interleaver on silicon platform [J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4358-4369.
- [8] Yun H, Hammood M, Chrostowski L, et al. Wideband, flat-top, SOI filter using an apodized sub-wavelength-grating contra-directional coupler [C] // 2019 IEEE 16th International Conference on Group IV Photonics (GFP), August 28-30, 2019. Singapore, Singapore. New York: IEEE Press, 2019: 1-2.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Xia F N, Rooks M J, Sekaric L, et al. Ultra-compact high order ring resonator filters using submicron silicon photonic wires for on-chip optical interconnects [J]. *Optics Express*, 2007, 15(19): 11934-11941.
- [12] Xu L, Hou J, Tang H T, et al. Silicon-on-insulator-based microwave photonic filter with widely adjustable bandwidth [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(2): 110-115.
- [13] 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.
- [14] Zhao Y H, Wang X, Gao D S, et al. On-chip programmable pulse processor employing cascaded MZI-MRR structure [J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2019, 12(2): 148-156.

- [15] Ghasemi M, Hamidi S M, Dehzangi A, et al. Double-stadium Si-MZI racetrack microring resonator circuits: way to generate optical digital patterns[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, 37(5): 1434-1446.
- [16] Shokraneh F, Geoffroy-Gagnon S, Liboiron-Ladouceur O. The diamond mesh, a phase-error- and loss-tolerant field-programmable MZI-based optical processor for optical neural networks [J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23495-23508.
- [17] Zhang Z Y. Study of interleaver based on ring resonator assisted Mach-Zehnder interferometer[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
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.
- [18] 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.
- [19] Huang Z C, Meng X, Osgood R. A theoretical analysis of a resonator-assisted silicon photonic interleaver[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 10-15, 2020, Washington, DC. Washington, D.C.: OSA, 2020: 1-2.
- [20] 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): 1-13.