

可调谐集成光波导射频滤波器研究

邹 品^{1,3} 韩秀友^{1,3} 王 瑜^{1,3} 王凌华^{1,3} 谷一英^{1,3} 王锦艳^{2,3} 蹇锡高^{2,3} 赵明山^{1,3}

¹ 大连理工大学物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116024
² 大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116024
³ 大连理工大学光子技术研究中心, 辽宁 大连 116024

摘要 针对单边带微波光传输应用要求,提出并研究了一种基于集成光波导微环谐振器与马赫-曾德尔干涉仪相结合的可调谐微波光子滤波器。分析了滤波器结构参数,包括耦合系数 κ_r 、周损耗因子 γ_1 、附加相移 $\Delta\varphi_1$ 等对滤波响应特性的影响。结果表明滤波曲线的矩形度和消光比存在相互制约的关系。基于聚合物液态聚倍半硅氧烷(PSQ-L)波导,设计出矩形度为0.8、消光比为32 dB的微波光子滤波器,通过电极热光调相该滤波器可以实现8~69 GHz范围内的可调谐射频单边带滤波功能。

关键词 集成光学;微波光子滤波器;微环谐振器;马赫-曾德尔干涉仪;单边带滤波

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1013001

Study on a Tunable Radio Frequency Filter Based on Integrated Optical Waveguide

Zou Pin^{1,3} Han Xiuyou^{1,3} Wang Yu^{1,3} Wang Linghua^{1,3} Gu Yiyang^{1,3}
Wang Jinyan^{2,3} Jian Xigao^{2,3} Zhao Mingshan^{1,3}

¹ School of Physics and Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

² School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

³ Photonics Research Center, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract A new tunable microwave photonic filter combining optical waveguide micro-ring resonator and Mach-Zehnder interferometer (MZI) is proposed to realize single sideband filtering. The influences of the filter structural parameters, such as coupling coefficient κ_r , round-trip loss γ_1 and additional phase shift $\Delta\varphi_1$, etc., on the filtering response are investigated. The result shows that there is a tradeoff between the rectangle shape and extinction ratio. According to the polymer polysilsesquioxane-liquid (PSQ-L) waveguide, a microwave photonic filter with rectangle shape factor of 0.8 and extinction ratio of 32 dB is designed, and the tunable radio frequency single sideband filtering from 8 GHz to 69 GHz can be achieved with the thermal-optic phase shifters.

Key words integrated optics; microwave photonic filter; micro-ring resonator; Mach-Zehnder interferometer; single sideband filtering

OCIS codes 130.5460; 350.2460; 350.4010

1 引言

微波光子技术的发展为微波信号的传输与处理

提供了便利的手段^[1-3],尤其对于高频微波信号,将其调制到光载波上,在光域内进行远距离传输,或进

收稿日期: 2013-04-18; 收到修改稿日期: 2013-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(60807015, 61077015)、国家高科技发展计划(2012AA040406)、教育部高校博士点基金(200801411037)、辽宁省自然科学基金(20102020)、中央高校基本科研业务费专项(DUT13JB01)

作者简介: 邹 品(1987—),男,硕士研究生,主要从事集成光波导器件设计、制备及应用等方面的研究。

E-mail: zoupin6@sina.com

导师简介: 韩秀友(1977—),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事集成光电子器件、聚合物光子学和微波光子学等方面的研究。E-mail: xyhan@dlut.edu.cn(通信联系人)

行变频、滤波等信号处理,可充分发挥光的大带宽、低损耗优势,同时可以提高系统的抗电磁干扰能力,减小体积,降低功耗^[4]。微波光纤传输(RoF)是微波光子技术领域重要的应用方向之一,其利用光纤的低损耗、大带宽优势,将微波信号调制到光波上,可实现微波信号的远距离高效传输,在宽带移动通信、无线接入网、智能交通系统等领域具有广阔的应用前景^[5-7]。通常基于强度调制的 RoF 系统,由调制器输出的是双边带(DSB)光载微波信号,其在传输过程中由于光纤色散会导致在传输一定距离后接收微波信号功率的严重衰减^[8]。采用单边带(SSB)传输技术可以有效解决光纤色散导致的微波功率衰减问题,可采用双电极马赫-曾德尔调制器、光学滤波器(如光纤光栅等)来实现单边带输出功能^[9-10]。

微波光子技术的发展方向是采用先进的光子集成技术将激光器、调制器、微波光子信号处理器、光电探测器等功能器件集成到同一芯片上,进而与电子器件集成,最终实现系统的小体积、轻量化与低功耗^[11-12]。对于微波光纤传输技术的发展亦是如此,在 RoF 系统的发射端机中,希望直接采用光子集成技术来获得单边带输出。虽然双电极马赫-曾德尔调制器可以实现单边带输出功能,但其双电极驱动控制较为复杂,器件成本较高。本课题组前期研究了利用聚合物集成波导微环的陷波滤波特性,来抑制光载微波双边带中的一个边带,进而获得单边带输出,实验上获得了较好的微波光纤传输效果^[13]。然而,为了获得对其中一个边带的完全抑制,需要对微环的耦合系数和环波导的损耗因子进行严格控制以达到临界耦合条件^[14],这对微环结构设计和波导器件制备工艺提出了较为苛刻的要求。尽管通过采用可调耦合器结构或在环内引入增益介质来调节波导的损耗因子可以达到匹配的临界耦合状态^[15-18],但其滤波响应波形难以获得较高的矩形度,另外增益介质的引入会增加器件结构的复杂性和制备工艺的成本。

本文提出并研究了一种由集成光波导微环谐振器(Ring)与马赫-曾德尔干涉仪(MZI)相结合而构成的新型微波光子滤波器(MZI+Ring),该滤波器利用微环谐振器对光波频率的非线性相位响应和 MZI 的干涉滤波特性,通过微环耦合系数、微环周

长与 MZI 臂长差等结构参数的优化设计,可有效实现微波调制光载波的单边带滤波功能,通过波导电极调相可以实现滤波频率的灵活调谐。对滤波器结构、基本原理和结构参数对滤波响应的影响进行了深入分析。基于聚合物液态聚倍半硅氧烷(PSQ-L)波导设计了可调谐射频(RF)单边带滤波器,该器件可以实现矩形度为 0.8,消光比达 32 dB,滤波频率在 8~69 GHz 范围内可调谐的单边带滤波功能。

2 滤波器结构

在 MZI 的一个臂上加上一个微环谐振器,构成微环谐振器与 MZI 相结合型微波光子滤波器,图 1 给出了该滤波器的结构示意图。根据波导材料和制备工艺的不同,微环可以是圆形、跑道形等结构。波导微环谐振器的归一化传递函数和相位响应函数可以表示为^[19]

$$H(\omega) = \frac{\sqrt{1-\kappa_r} - \sqrt{\gamma_1} \exp[-j(\omega T_s + \varphi_1)]}{1 - \sqrt{1-\kappa_r} \sqrt{\gamma_1} \exp[-j(\omega T_s + \varphi_1)]}, \quad (1)$$

$$\Phi(\omega) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[H(\omega)]}{\text{Re}[H(\omega)]} \right\}, \quad (2)$$

其中 κ_r 为微环波导与直波导的交叉强度耦合系数, γ_1 为波导微环的周损耗因子, $\omega = 2\pi f$, f 为光波频率, $T_s = (n_{\text{eff}} L_r)/c$ 为光波绕环一周所需的时间, n_{eff} 为波导有效折射率, L_r 为波导微环周长, φ_1 为微环波导上相移器提供的相位。微环周长 L_r 影响其滤波响应的自由光谱范围;为了获得理想的滤波效果,与微环相结合的 MZI 两臂应有一定的臂长差 ΔL 。

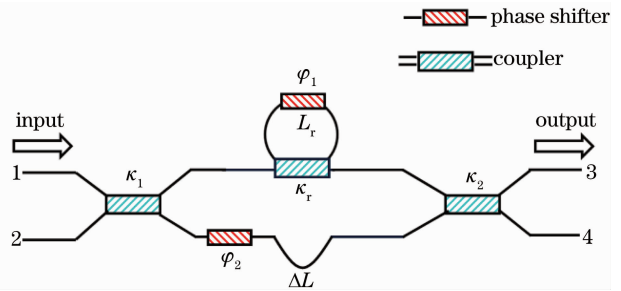


图 1 微环与马赫-曾德尔干涉仪相结合型微波光子滤波器
Fig. 1 Microwave photonic filter based on MZI combined with micro-ring

利用传输矩阵法, MZI+Ring 滤波器输入、输出光场之间的关系可以写为

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-\kappa_2} & j\sqrt{\kappa_2} \\ j\sqrt{\kappa_2} & \sqrt{1-\kappa_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H(\omega) & 0 \\ 0 & \sqrt{\gamma_2} \exp[-j(\Delta\varphi + \varphi_2)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1-\kappa_1} & j\sqrt{\kappa_1} \\ j\sqrt{\kappa_1} & \sqrt{1-\kappa_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 κ_1, κ_2 为 MZI 输入、输出耦合器的交叉强度耦合系数, γ_2 为 MZI 两臂长差 ΔL 的损耗因子(这里忽略 MZI 相同长度两臂的损耗), $\Delta\varphi = 2\pi n_{\text{eff}}\Delta L/\lambda$ 为 ΔL 引起的相移, φ_2 为 MZI 干涉臂上相移器提供的相位。

假设只有端口 1 有归一化的输入信号, 即 $E_1 = 1, E_2 = 0$ 。由于输出端 3 和 4 之间具有互补性, 下面只对输出端口 3 进行讨论。端口 3 的归一化传递函数为

$$\frac{E_3}{E_1} = H(\omega) \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\kappa_2} - \sqrt{\gamma_2} \sqrt{\kappa_1\kappa_2} \exp[-j(\Delta\varphi + \varphi_2)], \quad (4)$$

端口 3 归一化输出光强为

$$I_3 = \left| \frac{E_3}{E_1} \right|^2 = \left| H(\omega) \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\kappa_2} - \sqrt{\gamma_2} \sqrt{\kappa_1\kappa_2} \exp[-j(\Delta\varphi + \varphi_2)] \right|^2. \quad (5)$$

研究发现, 当 $L_r/\Delta L=2$ 时, MZI+Ring 滤波器的上下两臂在微环反谐振频率处的相位差为 π 的整数倍, 且相邻两个反谐振频率处上下两臂相位差的值为 π 的奇数倍(如图 2 所示), 通带和阻带的带宽比为 1:1 且呈周期性变化, 可应用于单边带滤波, 所以取 $L_r/\Delta L=2$ 。

由 $L_r/\Delta L=2$, 可得 $\gamma_2 = (\gamma_1)^{1/2}$, 则端口 3 归一化输出光强为

$$I_3 = \left| \frac{E_3}{E_1} \right|^2 = \left| H(\omega) \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\kappa_2} - \gamma_1^{1/4} \sqrt{\kappa_1\kappa_2} \exp[-j(\Delta\varphi + \varphi_2)] \right|^2. \quad (6)$$

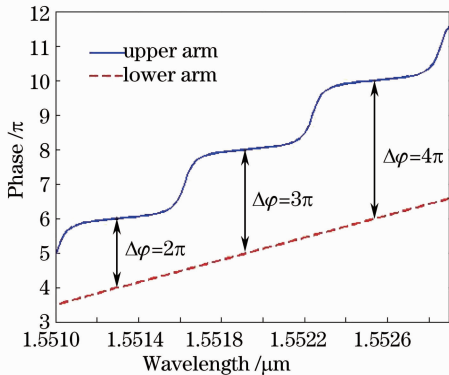


图 2 MZI+Ring 上下两臂相位曲线

Fig. 2 Phase curves of the upper and lower arms of MZI+Ring

3 滤波响应特性分析

对于普通的马赫-曾德尔干涉型滤波器, 当

输入、输出耦合器的分束比均为 3 dB 时, 其响应特性达到最佳, 因此设定 MZI+Ring 滤波器的输入、输出耦合器的耦合系数为 $\kappa_1 = \kappa_2 = 0.5$ 。根据已制备聚合物波导微环结构参数^[20], 选取 $n_{\text{eff}} = 1.5$, $L_r = 2.6$ mm, 则有 $\Delta L = 1.3$ mm。通常为了获得较理想的滤波响应, 环上的附加相位为 $\varphi_1 = \pi$, 即初始时微环上的移相器电极处于工作状态, 这对降低器件功耗是不利的。在前期波导结构设计时通过增加波导微环周长来增加 1 个 π 相移, 即 $L_r = 2.6$ mm + δL_r , $\delta L_r = 516.7$ nm(工作波长为 1551 nm), 这对于集成光波导器件的设计和制备是可以实现的(比如通过控制跑道形波导微环中直波导的长度)。在实际工作中, 环境条件(如温度、震动等)对光在波导中传输相位有一定的影响, 通过相移器进行适当微调, 可以满足 π 相移工作要求。

为了便于理解微环对 MZI 滤波响应改善的作用原理, 首先忽略波导的损耗, 即 $\gamma_1 = \gamma_2 = 1$, 取微环的耦合系数为 $\kappa_r = 0.5$ 。图 3 分别给出了 MZI 的滤波响应曲线, MZI+Ring 两臂相移差曲线和 MZI+Ring 的滤波响应曲线。MZI+Ring 两臂相移差曲线(即图 2 中两曲线相减)中相位变化平坦部分对应着 MZI+Ring 滤波曲线的阻带和通带, 相位变化陡峭部分对应着 MZI+Ring 滤波曲线阻带到通带的过渡部分。相位的平坦变化使得两臂干涉保持不变, 从而增大了阻带和通带的宽度和平坦度; 相位的陡峭变化使得两臂干涉发生骤变, 从而使通带快速变化到阻带。这样就获得了带内平坦、带外滚降陡峭的滤波响应。

将 MZI+Ring 滤波器应用于 RoF 系统实现单边带传输的原理如图 4 所示, 为了便于理解其滤波原理, 图中的 MZI+Ring 滤波器与电光调制器分为两个功能模块, 最终系统实现可以将二者集成在同一芯片上。基于 MZI+Ring 结构实现单边带滤波的原理是: 使得微波调制光载波双边带中的一个边带(图 4 中以右边带为例)落在滤波器的阻带内, 而另一个边带(左边带)与光载波位于滤波器的通带内, 最终经滤波器输出为单边带光载微波信号。为了获得良好的单边带滤波功能, MZI+Ring 的滤波响应曲线应具有高的带外滚降陡峭程度和大的消光比。下面来分析结构参数对 MZI+Ring 滤波响应特性的影响。

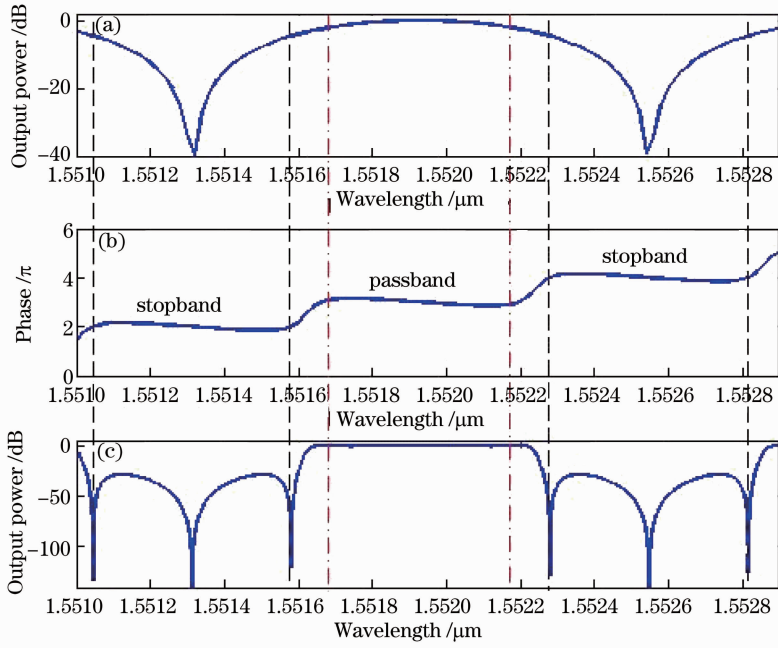


图 3 (a) MZI 滤波曲线; (b) MZI+Ring 两臂相位差曲线; (c) MZI+Ring 滤波曲线
 Fig. 3 (a) Filtering curve of MZI; (b) curve of phase difference between two arms of MZI+Ring; (c) filtering curve of MZI+Ring

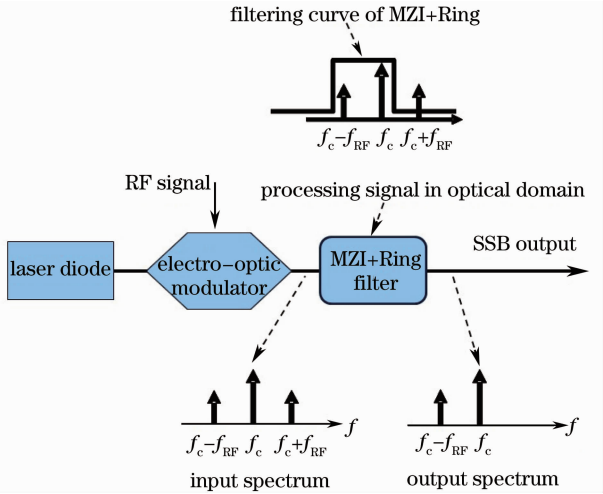


图 4 基于 MZI+Ring 滤波器实现 SSB 输出的原理图
 Fig. 4 Principle schematic of SSB output with MZI+Ring filter

3.1 不同的微环耦合系数 κ_r 值

定义一个矩形度系数 S 来衡量滤波曲线的带外滚降陡峭程度^[21-22]:

$$S = \frac{\Delta f_{-1 \text{ dB}}}{\Delta f_{-10 \text{ dB}}}, \quad (7)$$

其中 $\Delta f_{-1 \text{ dB}}$ 和 $\Delta f_{-10 \text{ dB}}$ 分别表示滤波响应强度下降 1 dB 和 10 dB 所对应的带宽, S 值越趋近于 1, 表示滤波波形的矩形度越好。

图 5 给出了不同微环谐振器耦合系数下的滤波

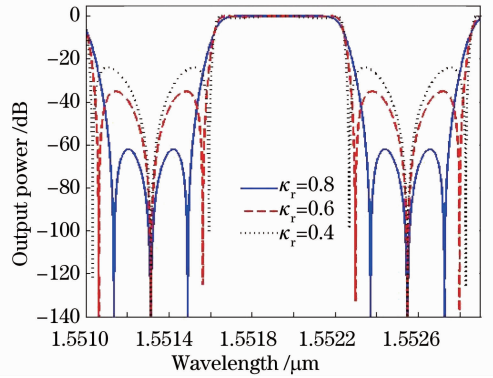


图 5 不同 κ_r 值对应的滤波曲线

Fig. 5 Filtering curves with different κ_r

响应曲线, 当 κ_r 分别为 0.8、0.6、0.4 时, 消光比分别为 61 dB、36 dB、22 dB, 矩形度系数分别为 0.81、0.89、0.95。可以看出, κ_r 值越小, 通带的矩形度越好, 而消光比越差。这是由于 κ_r 越小, 从微环谐振频率到反谐振频率过渡的相位变化越陡峭, 从而使得滤波响应曲线很快地从通带变化到阻带, 使其矩形度更好; 然而, 上下两臂的相移在相应反谐振频段的差值偏离 π 或 π 的整数倍 (κ_r 越小, 偏离相对越大), 从而使得经第二个 3 dB 耦合器干涉输出的消光比变差。因此, MZI+Ring 滤波响应的矩形度系数与消光比存在相互制约的关系, 在实际应用设计中, 在满足消光比要求的条件下, 需优化结构参数以获得最大的矩形度系数。

3.2 不同的微环周长 L_r 和臂长差 ΔL

分析 MZI+Ring 的自由光谱范围 $F_{\text{MZI+Ring}}$ 与微环谐振器的自由光谱范围 F_{Ring} 之间的关系。在波导微环谐振器耦合系数 $\kappa_r = 0.7$ (下面皆为 0.7) 的条件下,微环滤波响应曲线和 MZI+Ring 滤波响应曲线如图 6 所示。比较图 6(a)和(b)可以看出 MZI+Ring 的自由光谱范围为微环谐振器的自由光谱范围的二倍,即 $F_{\text{MZI+Ring}} = 2F_{\text{Ring}}$ 。

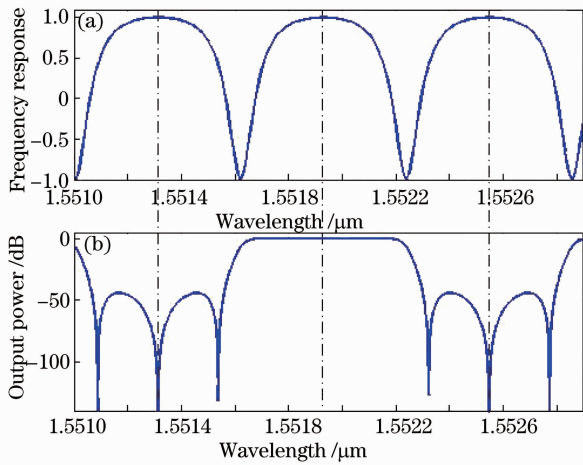


图 6 (a) 微环的频率响应曲线; (b) MZI+Ring 滤波曲线

Fig. 6 (a) Frequency response curve of micro-ring; (b) filtering curve of MZI+Ring

再来分析 MZI+Ring 自由光谱范围随环周长 L_r 的变化关系。图 7 给出了不同环周长 L_r 下 MZI+Ring 的滤波响应曲线(整个过程始终保持 $L_r/\Delta L = 2$)。由图 7 可以看出, L_r 值越大,自由光谱范围越小(即通带的 3 dB 带宽越小),而消光比和矩形度几乎不变。

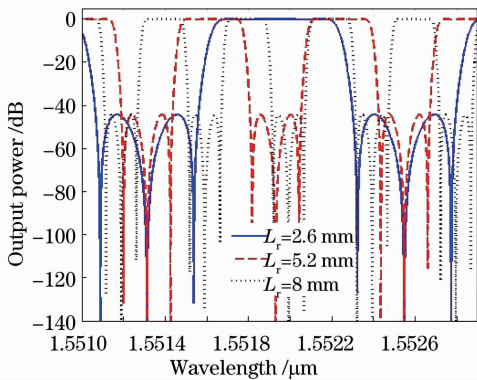


图 7 不同的 L_r 对应的滤波曲线

Fig. 7 Filtering curves with different L_r

3.3 滤波调谐特性

为了使单边带滤波功能满足更宽微波频段范围的 RoF 系统,其滤波频率应具有可调谐性能。可以

通过改变微环上的移相器 φ_1 提供的相位 $\Delta\varphi_1$,来实现滤波响应谐振频率的调谐,同时需要改变 MZI 另一臂上移相器 φ_2 的相位 $\Delta\varphi_2$,使其满足 $\Delta\varphi_1 : \Delta\varphi_2 = 2 : 1$ 的关系,以保证滤波响应波形不变。

通过对微环上的相移器进行调节,可以实现滤波频率的调谐,图 8 给出了相位改变量 $\Delta\varphi_1$ 与滤波响应中心频率变化 Δf 的关系。可以看出当 $\Delta\varphi_1 = 2\pi$ 时,频率改变量达到滤波器自由光谱范围的一半,即 $\Delta f = 0.5F_{\text{MZI+Ring}}$ 。在实际的单边带滤波应用中,微波调制光载波的左边带和光载波应位于滤波曲线的通带范围内,而右边带应位于滤波曲线的阻带范围内(如图 4 所示)。因此,在理想矩形度条件下($S \rightarrow 1$),可实现的单边带滤波调谐的微波频率范围是 $0 \sim 0.5F_{\text{MZI+Ring}}$ 。

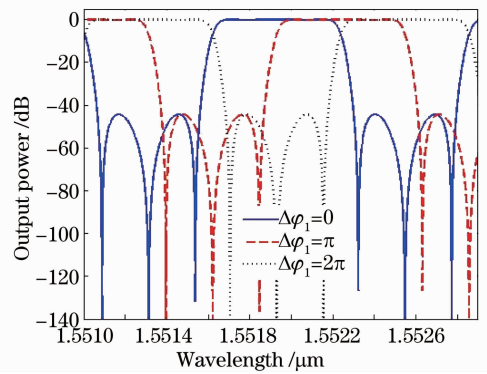


图 8 不同的 $\Delta\varphi_1$ 对应的滤波曲线

Fig. 8 Filtering curves with different $\Delta\varphi_1$

3.4 不同的微环波导损耗因子 γ_1

以上的分析中,忽略了波导的损耗。对于实际的光波导器件,由于波导材料吸收损耗、波导结构或制备工艺造成的散射或辐射损耗等,使得波导的损耗不为零,即微环波导损耗因子 $\gamma_1 \leq 1$ 。图 9 给出了微环损耗因子取不同值时,滤波器的滤波响应曲线。由图 9 可以得到,当 γ_1 分别为 1.0、0.8、0.6

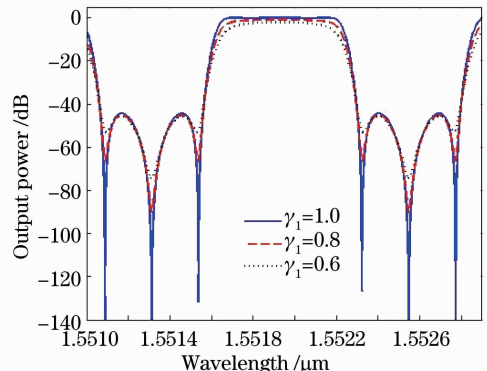


图 9 不同的损耗因子 γ_1 对应的滤波曲线

Fig. 9 Filtering curves with different γ_1

时,矩形度系数分别为 0.86、0.73、0.58,可以看出损耗越大,通带的矩形度系数越小,消光比稍微减小,但变化不是很明显。

4 滤波应用分析

通过以上的分析可以看出 MZI+Ring 滤波器的滤波响应特性受微环耦合器耦合系数、微环周长与 MZI 臂长差、附加相位、损耗因子等参数的影响,基于本课题组前期实验制备聚合物波导微环谐振器的结构参数,微环的周长 $L_r = 2.6 \text{ mm} + 516.7 \text{ nm}$,环波导的损耗因子为 $\gamma_1 = 0.8^{[21]}$,MZI 两臂臂长差 $\Delta L = 1.3 \text{ mm}$,MZI 输入、输出耦合器耦合系数为 $\kappa_1 = \kappa_2 = 0.5$,微环耦合系数为 $\kappa_r = 0.55$,环波导和 MZI 一臂上的附加相位为 $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = 0$,得到的滤波响应曲线如图 10 所示。由图 10 可得,该滤波器的消光比为 $R_E = 32 \text{ dB}$,矩形度系数为

$$S = \frac{\Delta f_{-1 \text{ dB}}}{\Delta f_{-10 \text{ dB}}} = \frac{\lambda_{-1 \text{ dB}_R} - \lambda_{-1 \text{ dB}_L}}{\lambda_{-10 \text{ dB}_R} - \lambda_{-10 \text{ dB}_L}} = \frac{1.552225 - 1.551735}{1.552287 - 1.551673} = 0.8.$$

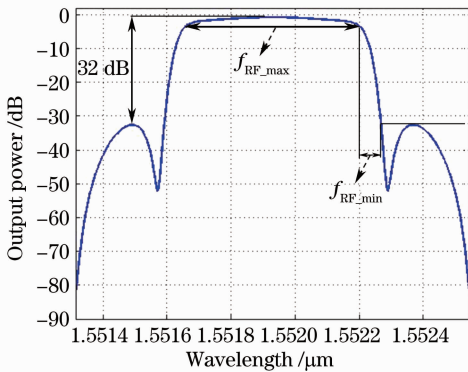


图 10 基于聚合物 PSQ-L 波导的 MZI+Ring 滤波响应曲线

Fig. 10 Filtering curve of MZI+Ring based on PSQ-L waveguide

上一节的分析中,在理想的矩形度条件下 ($S \rightarrow 1$),可实现单边带滤波调谐的微波频率范围是 $0 \sim 0.5F_{\text{MZI+Ring}}$ 。对于图 10 所示的 MZI+Ring 滤波响应曲线,其可实现单边带滤波的最高 RF 频率为 3 dB 带宽对应的频率差:

$$f_{\text{RF_max}} = \frac{c}{\lambda_{-3 \text{ dB}_L}} - \frac{c}{\lambda_{-3 \text{ dB}_R}} = \frac{3 \times 10^8}{1551.705 \times 10^{-9}} - \frac{3 \times 10^8}{1552.225 \times 10^{-9}} \approx 69 \text{ GHz}.$$

可实现单边带滤波的最低 RF 频率,根据滤波响应由 -3 dB 下降至 -32 dB 的频率差为

$$f_{\text{RF_min}} = \frac{c}{\lambda_{-3 \text{ dB}_R}} - \frac{c}{\lambda_{-32 \text{ dB}_R}} = \frac{3 \times 10^8}{1552.225 \times 10^{-9}} - \frac{3 \times 10^8}{1552.318 \times 10^{-9}} \approx 8 \text{ GHz}.$$

由以上的分析可以看出,基于已有波导微环来构成 MZI+Ring 的滤波器,其消光比为 32 dB,矩形度为 0.8,通过热光调相可实现在 8~69 GHz 范围内可调的 RF 单边带滤波功能。若想要滤除更高的频率,需要减少微环的周长(增大滤波曲线的自由光谱范围),由于实际微环的制备受其结构参数、制备工艺的限制,尺寸不可能无限小,因此滤波器所能滤除的最高频率有一定的上限;若想要滤除更低的频率,需要减小微环谐振器与直波导的耦合系数 κ_r (增大滤波曲线的矩形度),在理想的情况下(矩形度因子 $S=1$ 时),可滤除的频率可以无限小,但是理想的情况很难达到,因此滤波器所能滤除的最低频率有一定的下限,此时消光比也会相应减小。

对于实际工作中的集成光波导 RF 滤波器,需要考虑环境温度、应力等因素对其工作稳定性的影响,尤其是对光波传输相位的影响,因为相位的微小变化会影响到最终器件滤波响应的特性,如中心频率、矩形度、消光比等。因此器件的封装过程中要减少这些因素的影响,如采取一定的恒温、抗震等措施,保证器件工作的稳定性。

5 结 论

提出了一种波导微环谐振器与 MZI 相结合微波光子滤波器以实现 RF 单边带滤波功能,给出了该滤波器滤波的原理,对结构参数如矩形度、消光比、自由光谱范围、可调谐等特性的影响进行了较为深入的研究,结果表明滤波曲线的矩形度和消光比存在相互制约的关系。基于聚合物 PSQ-L 波导设计了可调谐 RF 滤波器,该器件可以获得矩形度为 0.8,消光比达 32 dB,RF 频率在 8~69 GHz 范围内可调谐的单边带滤波功能。

参 考 文 献

- 1 José Capmany, Dalma Novakr. Microwave photonics combines two worlds [J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.
- 2 Yao Jianping. Microwave photonics [J]. J Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
- 3 Xie Shizhong, Chen Minghua, Chen Hongwei. Advance in microwave photonics [J]. ZTE Communications, 2009, 15(3): 6-10.
- 4 谢世钟, 陈明华, 陈宏伟. 微波光子学研究的进展 [J]. 中兴通讯技术, 2009, 15(3): 6-10.
- 5 J Capmany, J Mora, I Gasulla, et al.. Microwave photonic signal processing [J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(4): 571-586.

- 5 E I Ackerman, C H Cox. RF fiber optic link performance [J]. IEEE Microwave Magazine, 2001, 2(4): 50–58.
- 6 Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng, *et al.*. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(4): 481–488.
方祖捷, 叶青, 刘峰, 等. 毫米波副载波光纤通信技术的研究进展[J]. 中国激光, 2006, 33(4): 481–488.
- 7 David Wake, Anthony Nkansah, Nathan J Gomes. Radio over fiber link design for next generation wireless systems [J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(16): 2456–2464.
- 8 U Gliese, S Ngrskov, T N Nielsen. Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links [J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 1996, 44(10): 1716–1724.
- 9 Graham H Smith, Dalma Novak, Zaheer Ahmed. Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators [J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 1997, 45(8): 1410–1415.
- 10 J Park, W V Sorin, K Y Lau. Elimination of the fibre chromatic dispersion penalty on 1550 nm millimetre-wave optical transmission [J]. Electron Lett, 1997, 33(6): 512–513.
- 11 D A I Marpaung, C G H Roeloffzen, R G Heideman, *et al.*. Integrated microwave photonics [J]. Laser Photonics Rev, DOI: 10.1002/lpor.201200032, 2013.
- 12 Charles H Cox, Edward I Ackerman. Microwave photonics: past, present and future [C]. 2008 International Topics Meeting on Microwave Photonics, 2008. 9–11.
- 13 Xiuyou Han, Jianing Zhang, Linghua Wang, *et al.*. Quasi single sideband radio over fiber transmission with a polymer-based waveguide microring resonator [J]. Opt Eng, 2011, 50(12): 124601.
- 14 A Yariv. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides [J]. Electron Lett, 2000, 36(4): 321–322.
- 15 Zhang Jianing, Han Xiuyou, Song Hongyan, *et al.*. Study on time delay characteristics of integrated waveguide microring resonator with tunable coupler [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2098–2103.
张佳宁, 韩秀友, 宋红妍, 等. 可调耦合器结构集成波导微环谐振腔延时特性研究[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2098–2103.
- 16 Xiaoyang Zhang, Tong Zhang, Xiaojun Xue, *et al.*. Resonant frequency shift characteristic of integrated optical ring resonators with tunable couplers [J]. J Opt A: Pure Appl Opt, 2009, 11(8): 085411.
- 17 V M Menon, W Tong, S R Forrest. Control of quality factor and critical coupling in microring resonators through integration of a semiconductor optical amplifier [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(5): 1343–1345.
- 18 Han Xiuyou, Pang Fufei, Sun Guoyong, *et al.*. Analysis on filter characteristics of active waveguide ring resonator [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(10): 1357–1361.
韩秀友, 庞拂飞, 孙国勇, 等. 有源波导环形谐振腔滤波特性分析[J]. 中国激光, 2005, 32(10): 1357–1361.
- 19 Zhang Jianing. Time Delay and Filtering Properties of Waveguide Microring Resonator [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
张佳宁. 波导微环谐振器光延时及滤波特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- 20 Teng Jie. Polymer-Based Optical Waveguide Devices [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
滕捷. 聚合物基光波导器件研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- 21 Y Yanagase, S Suzuki, Y Kokubun, *et al.*. Box-like filter response and expansion of FSR by a vertically triple coupled microring resonator filter [J]. J Lightwave Technol, 2002, 20(8): 1525–1529.
- 22 Zhang Zhenyu. Study on Interleaver Based on Ring Resonator Assisted Mach-Zehnder Interferometer [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
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, 2010.

栏目编辑: 韩峰