

激光与光电子学进展

基于微环的响应可切换微波光子滤波器

孙良辰^{1,2}, 李金野¹, 贾倩倩^{1,3}, 于文琦⁴, 戴双兴^{1,3}, 赵奕儒^{1,3}, 彭寄望^{1,3}, 李明轩¹, 刘建国^{1,3*}¹中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083;²中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049;³中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049;⁴中国电子科技集团公司第五十四研究所光通信研发中心, 河北 石家庄 050081

摘要 基于微环谐振腔和光纤布拉格光栅, 利用相位-强度调制, 实现了三种滤波响应可切换微波光子滤波器。通过改变光纤布拉格光栅反射谱、微环谐振腔陷波和光载波三者之间的相对波长, 微波光子滤波器的滤波响应可以在带通、平顶带通和高通之间切换。制备了欧拉微环并搭建了微波光子滤波器系统, 实现了上述三种响应。三种响应的带宽均具有一定的调谐能力, 其调谐范围分别为 5.56~7.68 GHz、6.23~11.92 GHz 和 5.83~10.86 GHz。三种响应下微环的插入损耗均小于 10 dB。可切换的滤波响应使该微波光子滤波器具有更高的灵活性, 在频率测量、杂散抑制等场景中具有广阔的应用空间。

关键词 集成光学; 微波光子滤波器; 微环谐振腔; 光纤布拉格光栅; 响应可切换

中图分类号 E963 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/LOP220682

Microring-Based Response-Switchable Microwave Photonic Filter

Sun Liangchen^{1,2}, Li Jinye¹, Jia Qianqian^{1,3}, Yu Wenqi⁴, Dai Shuangxing^{1,3}, Zhao Yiru^{1,3}, Peng Jiwang^{1,3}, Li Mingxuan¹, Liu Jianguo^{1,3*}¹State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;²College of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;⁴Optical Communication Research and Development Center, 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, Hebei, China

Abstract A three-filter-response switchable microwave photonic filters (MPF) based on micro-ring resonator (MRR) and fiber Bragg grating (FBG), using phase-intensity modulation, is proposed and experimentally demonstrated. By tuning the relative wavelengths of FBG reflectance spectrum, MRR notch, and optical carrier, the filter response of MPF can be switched between bandpass, flat-top bandpass, and high-pass. The bandpass, flat-top bandpass, and high-pass responses have bandwidth tuning ranges of 5.56-7.68 GHz, 6.23-11.92 GHz, and 5.83-10.86 GHz, respectively. Insertion loss of MRR under three responses is less than 10 dB. The switchable responses enable the proposed MPF to maintain higher flexibility, with a broad application such as frequency measurement and spurious suppression scenarios.

Key words integrated optics; microwave photonic filter; micro-ring resonator; fiber Bragg grating; responses switchable

1 引言

在过去的几十年中,微波光子系统受到了全世界

研究者的广泛关注^[1-13]。与传统的微波系统相比,微波光子系统具有损耗低、抗电磁干扰能力强、工作带宽大等优势^[11-20]。这使得微波光子系统具有更好的通信质

收稿日期: 2022-02-08; 修回日期: 2022-03-02; 录用日期: 2022-03-09; 网络首发日期: 2022-03-19
基金项目: 国家自然科学基金(61727815)、国家重点研发计划(2019YFB2203700、2018YFB2200504)
通信作者: *jgliu@semi.ac.cn

量和更大的通信容量^[15-17]。微波光子滤波器(MPF)是一种在光域对微波信号进行滤波处理的器件,是微波光子系统的重要组成部分,被广泛应用在航空航天、雷达探测、实时成像等多个领域^[13,15-18,21]。MPF在光域对微波信号进行滤波的方式通常有:微环谐振腔(MRR)^[17-28]、受激布里渊散射(SBS)^[9,29-32]、光纤滤波器^[33]以及延迟线^[34]等。其中,基于微环的MPF结构紧凑、调谐范围更大、集成度高,有着更加广泛的应用前景。基于单个微环的MPF一般通过相位-强度调制来实现滤波,具有较好的频率调谐性^[18-19,25-26]。Qiu等^[21]基于绝缘体上硅(SOI)上的跑道微环实现了响应带宽窄至170 MHz的MPF,其可调谐范围为16.4 GHz。但基于单一微环的MPF不能实现响应带宽的调节,而利用多个微环级联实现的MPF可以通过调整微环陷波之间的相对波长来调节响应带宽^[20-23]。Dong等^[21]基于级联双环实现了带宽可调的MPF,其中心频率和响应带宽的调谐范围分别为15 GHz和3.5 GHz。为了进一步提高系统的适用性,研究者们提出了基于微环辅助马赫-曾德尔干涉仪(RAMZI)的MPF,其通过改变MZI两臂之间的相位差可以实现带通和带阻两种滤波响应之间切换^[17,24]。Yang等^[17]基于微环辅助MZI结构实现了带通-带阻可切换的MPF,其带通响应和带阻响应的带宽调谐范围分别为5.18 GHz和2.7 GHz。然而,上述提出的基于微环的MPF最多只能实现两种滤波响应之间的切换,限制了MPF在应用中的灵活性。

本文提出了一个可切换三种滤波响应的MPF,其主要由单个微环、光纤布拉格光栅(FBG)以及相位调制器构成。该系统是基于相位-强度调制实现的,其基本原理是通过光处理器破坏特定波长边带的对称

性,使这部分信号能够被光电探测器还原。该方案中使用的微环和FBG具有结构简单、制备容易的优点。FBG和微环共同实现了MPF的滤波响应,解决了微环响应单一的问题。基于SOI制备了欧拉微环,其自由光谱范围(FSR)和调谐灵敏度分别为75 GHz和0.031 nm/V。搭建链路实现了这种三滤波响应可切换的微波光子滤波器。通过调节光载波、微环陷波以及FBG反射谱三者之间的相对波长,MPF的滤波响应可以在带通、平顶带通和高通之间切换。所提出的MPF可应对更多的应用场景,如航空航天和雷达探测等。

2 基本原理及分析

图1为提出的三滤波响应可切换MPF的示意图,其由可调谐激光器(TLD)、相位调制器(PM)、MRR、环形器、FBG、光电探测器(PD)以及偏振控制器(PC)组成。PM首先将射频(RF)信号调制到TLD产生的光载波上。在小信号条件下,调制后的光信号可以通过贝塞尔函数展开。展开后的结果(忽略高阶项)可表示为

$$A(t) = J_0(\beta) \exp(j\omega_c t) + J_1(\beta) \exp[j(\omega_c + \omega_{RF})t] - J_1(\beta) \exp[j(\omega_c - \omega_{RF})t], \quad (1)$$

式中: ω_c 和 ω_{RF} 分别为光载波和射频信号的角频率; β 为PM的调制因子; $J_n(n=0,1)$ 为 n 阶贝塞尔函数。此时原微波信号是无法被PD还原的,因为相位调制后产生的两侧边带分别与载波拍频后,得到的电流信号相位相差为 π 。这导致两电流相加时发生相消作用,无法将微波信号还原。但使用光滤波器选择性破坏相位调制信号的边带对称性后,原微波信号就可以被PD还原。这里采用微环作为光滤波器,满足谐振

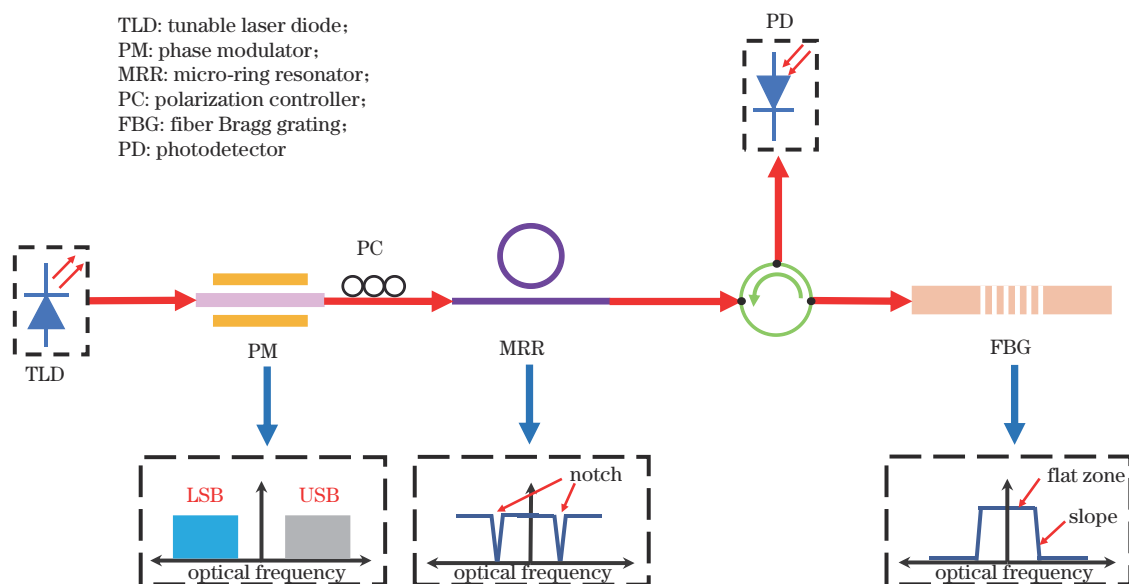


图1 基于微环和FBG的三滤波响应可切换微波光子滤波器的示意图

Fig. 1 Schematic of the three-filter-response switchable microwave photonic filter based on MRR and FBG

条件的信号将被耦合进微环从而滤除。微环滤波后的信号可以表示为

$$A(t) = J_0(\beta) \exp(j\omega_c t) T_{\text{Ring}}(\omega_c) + J_1(\beta) \exp[j(\omega_c + \omega_{\text{RF}})t] T_{\text{Ring}}(\omega_c + \omega_{\text{RF}}) - J_1(\beta) \exp[j(\omega_c - \omega_{\text{RF}})t] T_{\text{Ring}}(\omega_c - \omega_{\text{RF}}), \quad (2)$$

$$T_{\text{Ring}}(\omega) = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} = \frac{m - a \exp[j\varphi(\omega)]}{1 - am \exp[j\varphi(\omega)]}, \quad (3)$$

式中： m 、 a 和 φ 分别代表耦合系数、环程损耗系数以及环程相移。由于 $T_{\text{Ring}}(\omega_c + \omega_{\text{RF}})$ 与 $T_{\text{Ring}}(\omega_c - \omega_{\text{RF}})$ 不相等，微环响应波长内的边带对称性被破坏，此时对应的微波信号能够被 PD 还原。然而微环只能产生带阻滤波响应，这使得系统的响应只能是单一的带通响应。为了提高响应的多样性，将一个 FBG 串联在微环之后。此时，MPF 的响应可以表示为

$$A(t) = J_0(\beta) \exp(j\omega_c t) T_{\text{Ring}}(\omega_c) R_{\text{FBG}}(\omega_c) + J_1(\beta) \exp[j(\omega_c + \omega_{\text{RF}})t] T_{\text{Ring}}(\omega_c + \omega_{\text{RF}}) R_{\text{FBG}}(\omega_c + \omega_{\text{RF}}) - J_1(\beta) \exp[j(\omega_c - \omega_{\text{RF}})t] T_{\text{Ring}}(\omega_c - \omega_{\text{RF}}) R_{\text{FBG}}(\omega_c - \omega_{\text{RF}}), \quad (4)$$

式中： $R_{\text{FBG}}(\omega)$ 是由微扰理论得到的 FBG 反射函数^[35]。波长满足 $R_{\text{FBG}}(\omega)$ 的信号将无法通过 FBG，而是被 FBG 反射回环形器。调节光载波的波长，可以改变 FBG 对不同波长边带的反射情况。被反射回的信号经过环形器进入 PD 并被还原为微波信号。还原后的信号可表示为

$$i = \mathcal{R} \left\langle |A(t)|^2 \right\rangle, \quad (5)$$

式中： \mathcal{R} 是 PD 的响应度。通过调节微环陷波和光载波的波长，系统可以实现不同的滤波响应。为了描述方便，使用蓝色梯形和橙色三角形来表示 FBG 反射谱和微环陷波。另外，将微环陷波和 FBG 反射谱的左侧斜边定义为下降沿，右侧斜边定义为上升沿。本文分析了所提出的 MPF 的传输特性，得到了三种滤波响应：带通、平顶带通以及高通。

如图 2(a) 和 2(b) 所示，当微环陷波上升沿与 FBG 反射谱上升沿相交于 A 点时，可以获得带宽可调的带通响应。在 FBG 反射谱上升沿的波长范围内调节光载波，可以实现响应带宽的调节。当输入频率较低时，上边带和下边带都位于 FBG 反射谱上升沿，此时两者均被抑制。随着频率的增加，FBG 反射谱上升沿对下边带的抑制减弱但对上边带的抑制增加并最终完全抑制，这使得输出信号功率逐渐增加。随着输入信号频率的不断增大，下边带由 FBG 反射谱上升沿进入微环陷波的下沿，这降低了输出信号的功率。之后，下边带进入微环陷波的下沿并最终进入 FBG 带通区域。该过程导致输出信号的功率转为上升并最终稳定。如图 2(c) 所示，从频域的角度来看，系统呈现为一个带通响应。本文用 ω_{BP} 来表述光载波与微环陷波上升沿之间的频率间隔，它决定了带通响应的带宽，其值可以通过调整光载波的波长来改变。可以看出，随着光载波波长的增大，响应的带宽增大，符合分析的结论。

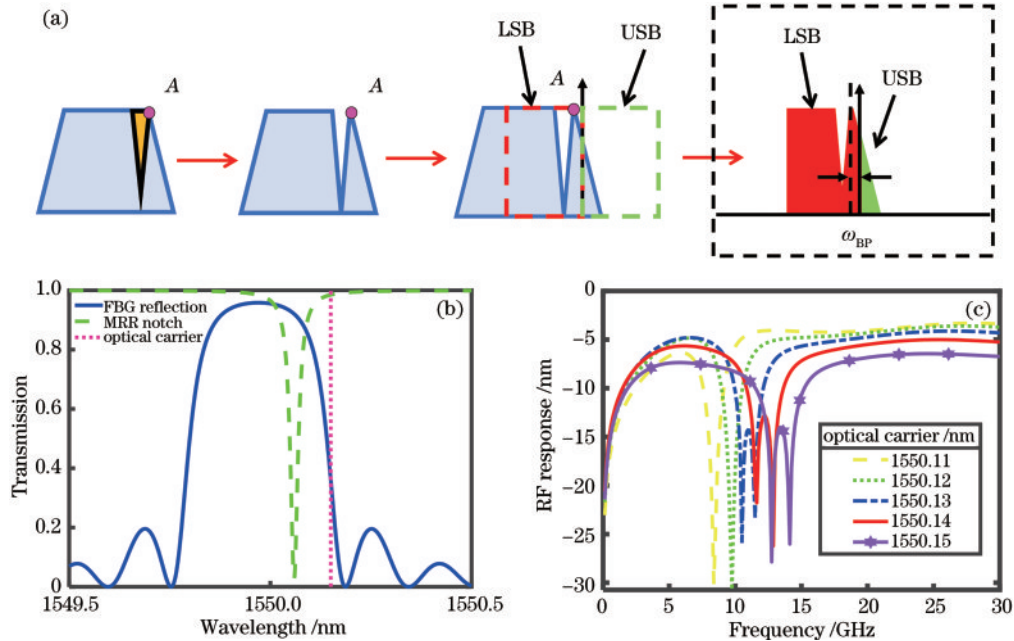


图 2 带通响应的实现方法与仿真结果。(a) 带通响应实现的基本原理；(b) 获得带通响应时，FBG 反射谱、微环陷波和光载波的相对位置；(c) 不同光载波下的 MPF 频率响应

Fig. 2 Realization and simulation of the bandpass response. (a) Realization of the bandpass response; (b) relative positions of FBG reflectance spectrum, MRR notch, and optical carrier when obtaining bandpass response; (c) MPF frequency response with the different frequencies of optical carriers

如图 3(a)和(b)所示,当光载波与FBG反射谱上升沿最低点 B 重合时,可以获得带宽可调的平顶带通响应。通过在FBG带通频率范围内调节微环陷波中心波长可以实现响应带宽的调谐。平顶带通响应的实现过程与带通响应类似。当输入信号频率较低时,上边带和下边带都被FBG反射谱上升沿抑制。随着输入信号频率的增加,上边带被完全抑制,下边带则由FBG反射谱上升沿进入带通区域。上述过程使得输

出信号的功率先上升然后保持稳定。此后,下边带先经过微环陷波的上升沿和下降沿,使得输出信号功率先下降后上升,最终再次趋于稳定。如图 3(c)所示,从频域来看系统呈现为一个平顶带通响应。 ω_{FT} 是微环陷波上升沿与FBG反射谱上升沿之间的波长间隔,决定了平顶带通响应的带宽,其值可以通过调节微环陷波中心波长来改变。可以看出,随着微环陷波中心波长的减小,响应的带宽增大,符合分析的结论。

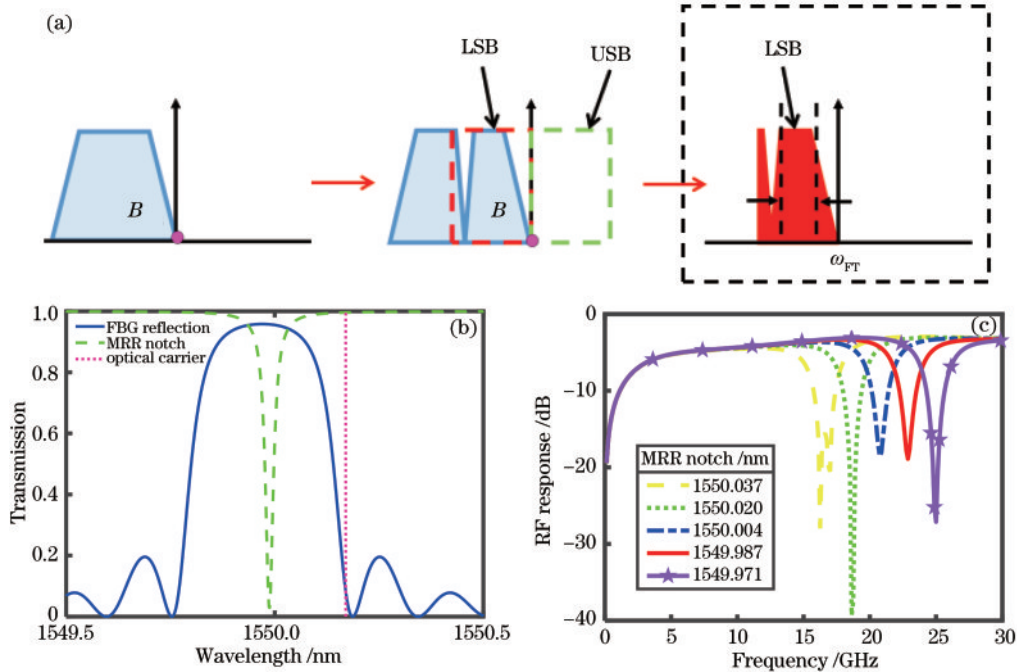


图 3 平顶带通响应的实现方法与仿真结果。(a) 平顶带通响应实现的基本原理;(b) 获得平顶带通响应时,FBG 反射谱、微环陷波和光载波的相对位置;(c) 微环陷波位于不同频率时的 MPF 频率响应

Fig. 3 Realization and simulation of the flat-top bandpass response. (a) Realization of the flat-top bandpass response; (b) relative positions of FBG reflectance spectrum, MRR notch, and optical carrier when obtaining flat-top bandpass response; (c) MPF frequency response with the different frequencies of MRR notch

如图 4(a)和(b)所示,当光载波位于FBG通带中心 C 的右侧时,可以获得带宽可调的高通响应。其响应带宽可以通过调节微环陷波中心波长来实现。高通响应实现的原理与其他两种响应不同。由于光载波处于FBG带通区域,当输入信号的频率较低时上边带和下边带均不受抑制,此时输出信号的功率较低。随着输入信号频率的增加,上边带逐渐受到微环陷波和FBG上升沿的抑制,而下边带一直位于FBG带通区域中不被抑制。这使得输出信号的功率不断增加,最终到达最高点并保持稳定。如图 4(c)所示,从频域来看系统呈现为一个高通响应,通过调节微环陷波中心波长可以改变高通响应的带宽。当微环陷波移动到FBG通带以外时,上边带仅受FBG反射谱上升沿的抑制。而当微环陷波进入FBG通带后,上边带在受到FBG反射谱上升沿抑制前就已经受到微环陷波下降沿的抑制,这使得响应的带宽增大。

综上所述,通过调节光载波、微环陷波和FBG反

射谱三者之间的相对波长可以选择性地改变边带的对称性,进而实现带通、平顶带通和高通三种滤波响应的切换。此外,上述分析过程是基于FBG反射谱上升沿进行的。由于FBG通带和相位调制产生的边带都具有对称性,所以基于FBG反射谱下降沿同样可以实现三种响应及其切换。

3 实验与分析

为了验证上述分析与仿真,首先制备了微环。图 5(a)为制备的微环的光学显微镜和扫描电子显微镜图像。为了降低波导损耗,采用了欧拉微环结构,其耦合区和非耦合区的波导宽度分别为 500 nm 和 2 μm 。此外,微环的半径和波导厚度分别设置为 170 μm 和 220 nm,以确保单一的传输模式和合适的自由光谱范围。该微环的品质因子为 4.6×10^4 ,FSR 约为 70 GHz,如图 5(b)所示。另外,还在制备的微环结构上沉积了氮化钛热电极以实现微环陷波中心波长的调谐。如

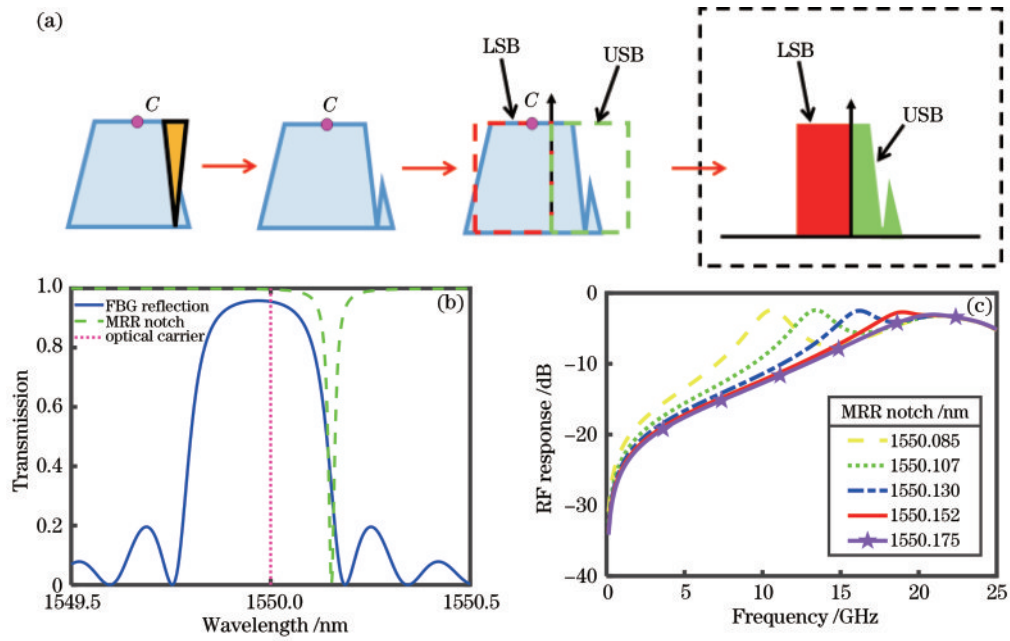


图 4 高通响应的实现方法与仿真结果。(a) 高通响应实现的基本原理；(b) 获得高通响应时,FBG 反射谱、微环陷波和光载波的相对位置；(c) 微环陷波位于不同频率时的 MPF 频率响应

Fig. 4 Realization and simulation of the high-pass response. (a) Realization of the high-pass response; (b) relative positions of FBG reflectance spectrum, MRR notch, and optical carrier when obtaining high-pass response; (c) frequency response of MPF with the different frequencies of MRR notch

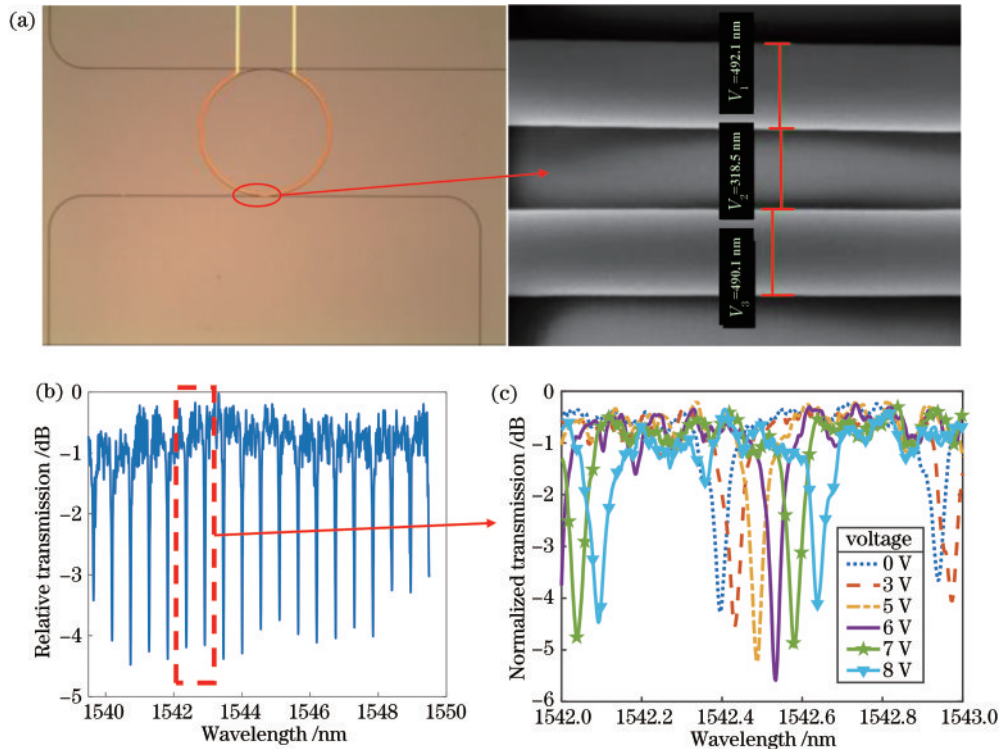


图 5 制备的微环的测试。(a) 制备的微环的光学显微镜图像和扫描电子显微镜图像；(b) 制备的微环的传输响应；(c) 微环的热调谐特性
Fig. 5 Examination of the prepared MRR. (a) Light microscope image and scanning electron microscope image of the fabricated MRR; (b) transmission response of the fabricated MRR; (c) thermal tuning properties of the MRR

图 5(c) 所示,当施加电压为 8 V 时,产生的波长偏移为 0.248 nm。因此,可以计算得到该区间内的平均调谐灵敏度为 0.031 nm/V。

之后,基于制备的微环搭建了如图 6 所示的链路。PM(Eospace, 调制带宽为 20 GHz)将矢量网络分析仪(VNA, ZNB40)产生的射频信号调制到 TLD

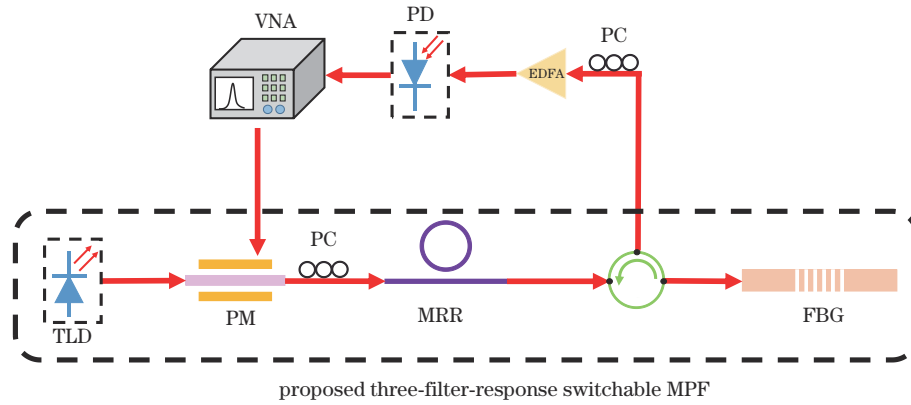


图 6 基于微环和FBG的三滤波响应可切换微波光子滤波器的测试链路

Fig. 6 Test link of the three-filter-response switchable microwave photonic filters based on MRR and FBG

(TSL550)产生的光载波上。随后,PM产生的相位调制信号依次通过微环和FBG进行滤波。波长位于FBG反射谱的调制信号将被反射回环形器,并送入掺铒光纤放大器(EDFA,Thorlabs)进行放大。最后,调制信号由PD(Finisar)还原并送入VNA分析。实验中还使用了两个PC来调节光信号的偏振态,以降低系统的插入损耗。

首先对FBG的反射谱进行了表征。如图7(a)所

示,FBG的反射率、3 dB带宽和10 dB带宽分别为95%、0.192 nm和0.260 nm。之后测试了MPF的传输特性。首先将微环陷波的中心波长移至1542.082 nm,此时微环陷波下降沿的最高点接近FBG反射谱下降沿的最高点。同时将光载波的波长由1542.004 nm逐渐减小至1541.978 nm。如图7(b)所示,此时系统呈现为带通响应,其3 dB带宽随波长变化由5.56 GHz逐渐增加至7.68 GHz。之后,将光载波的波长固定为

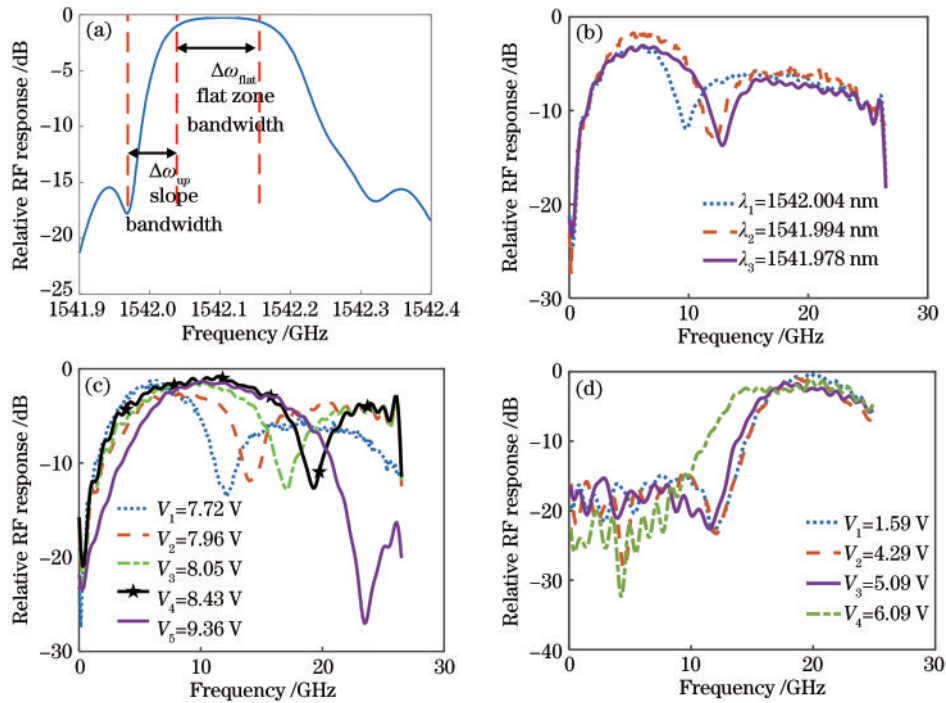


图 7 光纤布拉格光栅反射谱及基于微环和FBG的三滤波响应可切换微波光子滤波器的测试结果。(a)光纤布拉格光栅的反射光谱;(b)微环陷波中心波长固定为1542.082 nm,不同光载波时得到的带通响应;(c)当光载波的波长固定为1541.994 nm,微环施加不同电压时获得的平顶带通响应;(d)当光载波的波长固定为1542.110 nm,微环施加不同电压时获得的高通响应

Fig. 7 Reflection spectrum of FBG and test results of three-filter-response switchable microwave photonic filters based on MRR and FBG. (a) Reflection spectrum of FBG; (b) obtained bandpass responses under different optical carrier wavelengths, when the wavelength center of MRR notch is 1542.082 nm; (c) obtained flat-top bandpass responses of MRR under different voltages, when wavelength of optical carrier is 1541.994 nm; (d) obtained high-pass responses of MRR under different voltages, when wavelength of optical carrier is 1542.110 nm

1541.994 nm, 该波长接近 FBG 反射谱下降沿的最低点。同时将电压从 7.72 V 逐渐增加至 9.36 V。如图 7(c) 所示, 此时系统呈现为平顶带通响应, 其 3 dB 带宽从 6.23 GHz 逐渐增加到 11.92 GHz。当电压为 9.36 V 时响应的抑制比最大, 分析是因为旁瓣影响及微环陷波与 FBG 反射谱上升沿重合从而对上边带的抑制增强。最后, 将光载波的波长固定为 1542.110 nm, 该波长位于 FBG 通带中心的左侧。同时将电压从 1.59 V 逐渐增加至 6.09 V。如图 7(d) 所示, 此时系统呈现为高通响应, 其 3 dB 带宽随电压变化从 5.83 GHz 逐渐增加至 10.86 GHz。

综上所述可以得出结论, 搭建的 MPF 链路可以实现带通响应[图 7(b)]、平顶带通响应[图 7(c)]和高通响应[图 7(d)]。三种响应的切换是通过调节光载波、微环陷波以及 FBG 反射谱的相对波长实现的, 其本质是选择性地破坏了边带的对称性。实验结果与仿真结果具有较好的一致性。为方便描述, 将下降(上升)沿带宽定义为 $\Delta\omega_{\text{slope}}$, 带通带宽定义为 $\Delta\omega_{\text{flat}}$ 。当微环陷波下降沿最高点接近 FBG 反射谱下降沿最高点时, 系统响应为带宽可调的带通响应, 其带宽调谐范围主要取决于 $\Delta\omega_{\text{slope}}$ 。由于光载波需要在 FBG 反射谱下降沿上进行调谐, 所以当 $\Delta\omega_{\text{slope}}$ 增大时光载波的可调谐范围增大, 从而扩大了带通响应的带宽调谐范围。此外, 当光载波波长接近 FBG 反射谱下降沿最低点时, 系统响应为平顶带通响应, 其带宽调谐范围主要由 $\Delta\omega_{\text{flat}}$ 决定。由于微环陷波需要在 FBG 带通区域进行调谐, 所以当 $\Delta\omega_{\text{flat}}$ 增加时微环陷波的调谐范围增大, 从而增加了平顶带通响应的带宽调谐范围。最后, 当光载波固定在 FBG 通带中心的左侧时, 可以实现高通响应。与另外两种响应不同, 高通响应的带宽调谐范围主要取决于微环陷波的带宽。此外, 还发现当微环陷波和 FBG 反射谱下降沿重合时系统也可以实现高通响应。此时通过在 FBG 带通区域调节光载波的波长可以实现响应带宽的调节。由于光载波的调谐范围主要取决于 $\Delta\omega_{\text{flat}}$, 因此该方案具有较好的可调性。

4 结 论

本文提出了一种基于微环和 FBG 的 MPF, 可以实现带通响应、平顶带通响应以及高通响应三者之间的切换, 并且三种响应的带宽均具有一定的可调性。微环和 FBG 对相位调制光信号进行级联处理, 共同实现了 MPF 的滤波响应, 其本质是调节光载波、微环陷波以及 FBG 反射谱三者之间的相对波长来选择性改变边带的对称性。实验验证了提出系统的可行性。获得的带通响应的带宽可以从 5.56 GHz 调节至 7.68 GHz, 平顶带通响应的带宽可以从 6.23 GHz 调节至 11.92 GHz, 高通响应的带宽可以从 5.83 GHz 调节至 10.86 GHz, 均与分析和仿真的结果吻合。可切换的三种滤波响应显著地提高了 MPF 的灵活性和适用性, 在航空航天、雷

达探测等领域有着更加广阔的应用空间。

然而, 目前的系统仍有一些需要改进之处。首先, 与仿真结果相比实验结果的抑制比更低。这是因为制备的微环的消光比较低。这一问题可以通过优化微环设计、改进制备工艺、使用微环辅助 MZI 的结构来解决^[27]。并且, 光信号经过 EDFA 放大后仍有近 10 dB 的插入损耗。通过优化芯片与光纤之间的耦合可以缓解这一问题。此外, 该 MPF 仍可以进一步集成。链路中采用的 FBG 和环形器可以用波导光栅和 2×2 多模干涉器代替, 进而实现片上的全集成^[36-37]。通过对设计与制备工艺进一步的优化, 将有望实现一种高抑制比、三波可切换以及单片集成的 MPF。

参 考 文 献

- [1] Capmany J, Ortega B, Pastor D. A tutorial on microwave photonic filters[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(1): 201-229.
- [2] Seeds A J, Williams K J. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4628-4641.
- [3] Yao J P. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [4] Marpaung D, Roeloffzen C, Heideman R, et al. Integrated microwave photonics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(4): 506-538.
- [5] Zhang W F, Yao J P. Silicon-based integrated microwave photonics[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2016, 52(1): 0600412.
- [6] Marpaung D, Yao J P, Capmany J. Integrated microwave photonics[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(2): 80-90.
- [7] Liu Y, Choudhary A, Marpaung D, et al. Integrated microwave photonic filters[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(2): 485-555.
- [8] 梅理, 崇毓华, 朱宇鹏, 等. 基于可调光延迟线的微波光子零中频接收机研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(9): 0906001.
Mei L, Chong Y H, Zhu Y P, et al. Optical delay line-based microwave photonic zero-intermediate-frequency receiver[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0906001.
- [9] 黄蓝锋, 李勇军, 赵尚弘, 等. 基于单光路偏振复用的微波瞬时频率测量方案[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 1929002.
Huang L F, Li Y J, Zhao S H, et al. Microwave instantaneous frequency measurement based on single lightpath polarization multiplexing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1929002.
- [10] 刘元, 李晶, 贺永娇, 等. 基于双平行马赫-曾德尔调制器和平衡光电探测器的四倍频可调对称三角形函数波形信号发生器[J]. *光学学报*, 2021, 41(19): 1906005.
Liu Y, Li J, He Y J, et al. Generator of signals with quadruple frequency and triangular waveform tunable in symmetry based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator and balanced photodetector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(19): 1906005.

- [11] Atabaki A H, Moazeni S, Pavanello F, et al. Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip[J]. *Nature*, 2018, 556(7701): 349-354.
- [12] 韩一石, 罗吴金, 谢胜超, 等. 基于双平行相位调制器的微波光子波形成研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(23): 2306007.
Han Y S, Luo W J, Xie S C, et al. Photonic generation of microwave waveforms based on dual parallel phase modulator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(23): 2306007.
- [13] 邢云路, 李尚远, 薛晓晓, 等. 高频宽带分布相参微波光子成像雷达研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1517003.
Xing Y L, Li S Y, Xue X X, et al. High-frequency broadband-distributed coherent-aperture microwave photonic imaging radar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1517003.
- [14] Chen K Y, Dong J H, Chen R Y, et al. A 45Gb/s 7.5 μm -radius Si micro-ring modulator driven by 3.3 Vpp voltage[C]//2020 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), October 4-8, 2020, Taipei, China. New York: IEEE Press, 2020.
- [15] Do P T, Alonso-Ramos C, Le Roux X, et al. Wideband tunable microwave signal generation in a silicon-micro-ring-based optoelectronic oscillator[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 6982.
- [16] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 319-330.
- [17] Yang H M, Li J, Zheng P F, et al. A stopband and passband switchable microwave photonic filter based on integrated dual ring coupled Mach-Zehnder interferometer [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 5502608.
- [18] Qiu H Q, Zhou F, Qie J R, et al. A continuously tunable sub-gigahertz microwave photonic bandpass filter based on an ultra-high-Q silicon microring resonator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4312-4318.
- [19] Palaci J, Villanueva G E, Galán J V, et al. Single bandpass photonic microwave filter based on a notch ring resonator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(17): 1276-1278.
- [20] Zhang D K, Feng X, Huang Y D. Tunable and reconfigurable bandpass microwave photonic filters utilizing integrated optical processor on silicon-on-insulator substrate[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(17): 1502-1505.
- [21] Dong J J, Liu L, Gao D S, et al. Compact notch microwave photonic filters using on-chip integrated microring resonators[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(2): 5500307.
- [22] Dai T G, Shen A, Wang G C, et al. Bandwidth and wavelength tunable optical passband filter based on silicon multiple microring resonators[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4807-4810.
- [23] Zhang D K, Feng X, Li X D, et al. Tunable and reconfigurable bandstop microwave photonic filter based on integrated microrings and Mach-Zehnder interferometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(23): 3668-3675.
- [24] Jiang W J, Xu L, Liu Y F, et al. Optical filter switchable between bandstop and bandpass responses in SOI wafer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(17): 1105-1108.
- [25] Ehteshami N, Zhang W F, Yao J P. Optically tunable single passband microwave photonic filter based on phase-modulation to intensity-modulation conversion in a silicon-on-insulator microring resonator[C]//2015 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), October 26-29, 2015, Paphos, Cyprus. New York: IEEE Press, 2015.
- [26] Tao Y S, Shu H W, Wang X J, et al. Hybrid-integrated high-performance microwave photonic filter with switchable response[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(8): 1569-1580.
- [27] Liu X L, Yu Y, Tang H T, et al. Silicon-on-insulator-based microwave photonic filter with narrowband and ultrahigh peak rejection[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1359-1362.
- [28] Rasras M S, Tu K Y, Gill D M, et al. Demonstration of a tunable microwave-photonic notch filter using low-loss silicon ring resonators[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(12): 2105-2110.
- [29] Marpaung D, Morrison B, Pagani M, et al. Low-power, chip-based stimulated Brillouin scattering microwave photonic filter with ultrahigh selectivity[J]. *Optica*, 2015, 2(2): 76-83.
- [30] Choudhary A, Aryanfar I, Shahnia S, et al. Tailoring of the Brillouin gain for on-chip widely tunable and reconfigurable broadband microwave photonic filters[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(3): 436-439.
- [31] Liu Y, Choudhary A, Ren G H, et al. Integration of Brillouin and passive circuits for enhanced radio-frequency photonic filtering[J]. *APL Photonics*, 2019, 4(10): 106103.
- [32] Morrison B, Casas-Bedoya A, Ren G H, et al. Compact Brillouin devices through hybrid integration on silicon[J]. *Optica*, 2017, 4(8): 847-854.
- [33] Yu Y, Xu E M, Dong J J, et al. Switchable microwave photonic filter between high Q bandpass filter and notch filter with flat passband based on phase modulation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(24): 25271-25282.
- [34] Sancho J, Bourderionnet J, Lloret J, et al. Integrable microwave filter based on a photonic crystal delay line[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1075.
- [35] Yu W Q, Dai S X, Zhao Q F, et al. Wideband and compact TM-pass polarizer based on hybrid plasmonic grating in LNOI[J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 34857-34863.
- [36] Burla M, Cortés L R, Li M, et al. Integrated waveguide Bragg gratings for microwave photonics signal processing [J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 25120-25147.
- [37] 甘雪涛, 赵建林. 光学腔的共振线型[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823007.
Gan X T, Zhao J L. Resonance lineshapes in optical cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823007.