

基于氮化硅微环和载波分离的可重构微波光子带通滤波器

李静, 郑鹏飞, 徐雪朦, 洪红, 杨惠敏, 张若虎, 恽斌峰*

东南大学先进光子学中心, 江苏 南京 210096

摘要 基于 Add-Drop 型氮化硅微环滤波器, 利用光学单边带调制和光载波分离的方法, 实现可重构微波光子带通滤波器。滤波器带宽和带外抑制比分别达到 726 MHz 和 37.0 dB。并且通过改变光载波波长实现 1.64~23.41 GHz 的滤波器频率调谐; 通过调节微环耦合系数实现 0.683~2.246 GHz 的滤波器带宽调谐, 在带宽调谐范围内带外抑制比大于 26 dB。

关键词 集成光学; 微波光子滤波器; 可重构; 微环谐振腔; 载波分离

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.011301

Reconfigurable Microwave Photonic Bandpass Filter Based on Silicon Nitride Microring and Carrier Separation

Li Jing, Zheng Pengfei, Xu Xuemeng, Hong Hong, Yang Huimin,
Zhang Ruohu, Yun Binfeng*

Advanced Photonics Center, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

Abstract This study proposes a reconfigurable microwave photonic bandpass filter based on an Add-Drop silicon nitride microring filter via optical single sideband modulation and optical carrier separation. The measured bandwidth and out-of-band rejection ratio of the proposed microwave photonic filter are 726 MHz and 37.0 dB, respectively. Further, a filter with a frequency tuning range of 1.64–23.41 GHz can be achieved by tuning the optical carrier's wavelength. In addition, the bandwidth can be adjusted to 0.683–2.246 GHz with an out-of-band rejection ratio of more than 26 dB by changing the coupling coefficients of the microring resonator.

Key words integrated optics; microwave photonic filter; reconfigurability; micro-ring resonator; carrier separation

OCIS codes 130.3120; 060.5625; 130.7408

1 引言

微波光子滤波器可以在光域内对微波信号进行滤波, 是微波光子信号处理系统中一种重要的器件。相比于传统的微波滤波器, 微波光子滤波器具有带宽、可重构和抗电磁干扰能力强等优点^[1-4], 因此被广泛研究和应用^[5-18]。近年来, 由于硅基光子集成技术的快速发展, 集成微波光子滤波器引起了人们的关注。利用不同结构实现的微波光子滤波器, 包括马赫-曾德尔干涉仪 (MZI)^[8]、受激布里渊散

射^[9]、微盘^[10]、微环^[11-18]等。其中基于硅基微环谐振腔的微波光子滤波器具有体积小、Q 值高且可动态重构的优点, 进而被广泛研究。微波光子带通滤波器通常可以利用带阻光学滤波器将相位调制转换为强度调制来实现^[11-14]。但微环非谐振区引入的残余相位会导致微波光子滤波器的带外抑制比较低。例如 Palací 等^[11]和 Ehteshami 等^[12]提出的基于全通微环滤波器 (MRR) 和相位调制的微波光子滤波器的带外抑制比小于 10 dB 和 12 dB。Qiu 等^[13]采用较大自由光谱范围 (FSR, f_{FSR}) 的微环来

收稿日期: 2019-07-12; 修回日期: 2019-07-17; 录用日期: 2019-07-22

基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK20161429)

* E-mail: ybf@seu.edu.cn

降低残余相位影响,实现了约 26.5 dB 的带外抑制比,但是绝缘体上硅(SOI)微环耦合系数固定,无法实现滤波带宽的动态可重构。通过改进微环或链路结构等方法弥补残余相位可提高带外抑制比,但难以实现带宽的调谐^[14-16]。

本文采用低传输损耗(0.15 dB/cm)的双条形氮化硅光波导,可以实现高品质因子的微环,从而实现窄带宽的集成微波光子滤波器。该可调微环的弯曲半径为 $R \approx 125 \mu\text{m}$,在忽略弯曲损耗,保证高 Q 值的前提下,实现的可调氮化硅微环的最大自由光谱区的频率范围约为 48 GHz,最终实现微波光子滤波器频率调谐约为 24 GHz。另一方面,目前报道的集成微波光子可重构带通滤波器几乎都是基于相位调制和光学带阻滤波器,采用相位到强度转换方式实现带通滤波。但这种方案中由于微环谐振谱中相邻谐振受残余相位的影响,实现的微波光子带通滤波器带外抑制比较差。为了克服该不足,本文结合载波分离技术和单边带调制技术构建了微波光子可重构带通滤波器。该滤波器可以将微环带通滤波器的光学滤波特性映射到微波域,从而实现高带外抑制比,带外抑制比可以提高到 37 dB;并且结合低损耗氮化硅光波导构建的可调 Add-Drop 微环,能够实现高频率分辨率的微波光子滤波器,同时可以具备较大的频率和带宽调谐范围。通过理论和实验研究了频率、带宽可重构的微波光子带通滤波器,频率调谐范围为 1.64 ~ 23.41 GHz,带宽调谐范围为

0.683 ~ 2.246 GHz,带外抑制比大于 26 dB,实验结果与仿真符合。

2 系统结构与理论建模

基于 Add-Drop 型可调氮化硅微环,结合光学单边带调制和光载波分离的微波光子带通滤波器系统和原理如图 1 所示。激光器(LD)输出的光经 3 dB 耦合器(OC1)分为两束,上路的光作为光载波进入双驱马赫-曾德尔调制器(DDMZM),矢量仪(VNA)输出的射频信号经 90° 混合耦合器(90° hybrid coupler)后输入调制器,设置直流偏置为 $\pi/2$ 以实现光学单边带调制,调制后频谱如图 1(b)所示, -1 阶光边带被抑制^[19]。单边带调制光信号输入可调 Add-Drop 型氮化硅微环滤波器,设置光载波位于微环滤波器通带外,以实现光载波抑制,利用 $+1$ 阶光边带信号对微环滤波器通带进行扫描,与 OC1 下路输出的光载波信号通过耦合器(OC2)合路,然后经光电探测器探测得到拍频信号。通过调整偏振控制器(PC1 和 PC2)使光偏振方向对准调制器和微环滤波器偏振方向,从而降低光损耗。通过调整偏振控制器 3(PC3)使上、下路光信号偏振态一致。通过该链路结构,可以将微环带通滤波器的光学滤波特性映射到微波域,从而实现微波光子带通滤波器。改变光载波与微环共振波长差可以进行频率调谐,微波滤波带宽重构可以通过调谐微环带宽实现。

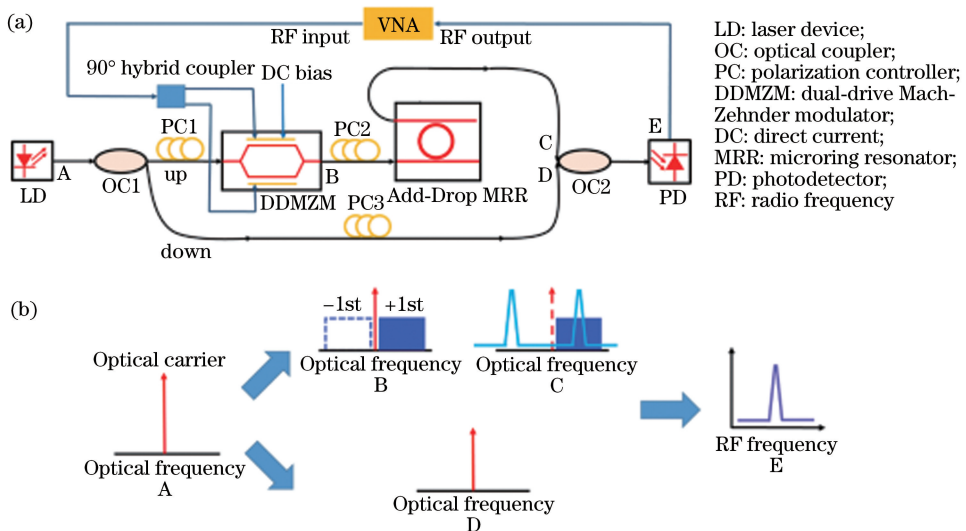


图 1 微波光子滤波器原理图。(a)链路图;(b)链路中各点的频谱示意图

Fig. 1 Schematic of microwave photonic filter. (a) Link diagram; (b) frequency spectra of different points in link

激光器输出的光载波 E_{in} 可以表示为

$$E_{in}(t) = E_c \exp(i\omega_c t), \quad (1)$$

式中: E_c 和 ω_c 分别为光载波振幅和角频率; t 为时间变量。则通过 3 dB 耦合器(OC1)得到两路光信

号分别为

$$E_{in}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} E_C \exp(i\omega_c t). \quad (2)$$

上路光信号经 DDMZM 调制器实现光学单边带调制,在小信号调制下,且忽略高频信号,调制器后的光信号 E_{MOD} 可表示为^[19]

$$E_{MOD}(t) = \frac{1}{2} J_0 \left(\frac{m}{\sqrt{2}} \right) E_C \exp[i(\omega_c t + \frac{\pi}{4})] - \frac{\sqrt{2}}{2} J_1 \left(\frac{m}{\sqrt{2}} \right) E_C \exp[i(\omega_c + \omega_f)t], \quad (3)$$

式中: $m = \pi V_{RF}/V_\pi$ 为相位调制系数, V_π 为调制器的半波电压, V_{RF} 和 ω_f 分别为射频信号的幅度和角频率; J_0 和 J_1 为第一类贝塞尔函数。假设 Add-Drop 型微环谐振腔的传输函数为 $H_d(\omega)$, 其中 ω 为光信号的角频率, 则经微环后的光信号 E_{MRR} 为

$$E_{MRR}(t) = \frac{1}{2} J_0 \left(\frac{m}{\sqrt{2}} \right) E_C \exp[i(\omega_c t + \frac{\pi}{4})] H_d(\omega_c) - \frac{\sqrt{2}}{2} J_1 \left(\frac{m}{\sqrt{2}} \right) E_C \exp[i(\omega_c + \omega_f)t] H_d(\omega_c + \omega_f). \quad (4)$$

上、下两路光信号经耦合器(OC2)合波, 结合两路附加损耗 a_{up} 、 a_{down} 和附加相移 φ_{up} 、 φ_{down} , 最终输出的光信号 E_{OC2} 可表示为

$$E_{OC2}(t) = \frac{1}{2} \sqrt{a_{up}} J_0 \left(\frac{m}{\sqrt{2}} \right) H_d(\omega_c) E_C \cdot$$

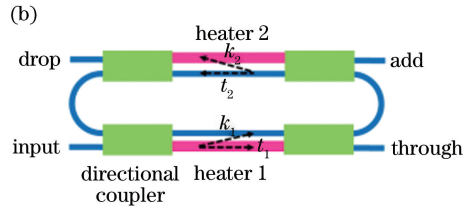
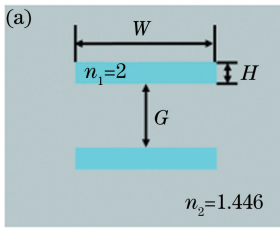


图 2 基于 MZI 结构的 Add-Drop 型微环谐振腔。(a) 双条形氮化硅光波导截面; (b) 微环谐振腔的结构示意图
Fig. 2 Add-Drop microring resonator based on MZI structure. (a) Waveguide cross-section of double stripe silicon nitride waveguide; (b) schematic of microring resonator

光从 input 输入, 则 Drop 端的传输函数 $H_d(\omega)$ 可写为^[20]

$$H_d(\omega) = \frac{-k_1 k_2 a^{1/2} \exp(i\theta/2)}{1 - at_1 t_2 \exp(i\theta)}, \quad (8)$$

式中: t_1 和 t_2 分别为两条波导与谐振腔的振幅透射系数; k_1 和 k_2 分别为两条波导与谐振腔耦合的振幅耦合系数; a 和 θ 分别为绕环一周的振幅衰减因子和相移。微环的 3 dB 带宽与耦合系数有关, 其波长范围 $\Delta\lambda$ 可写为^[20]

$$\exp[i(\omega_c t + \frac{\pi}{4} + \varphi_{up})] -$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{a_{up}} J_1 \left(\frac{m}{\sqrt{2}} \right) H_d(\omega_c + \omega_f) E_C \cdot$$

$$\exp[i(\omega_c t + \omega_f t + \varphi_{up})] +$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{a_{down}} E_C \exp[i(\omega_c t + \varphi_{down})]. \quad (5)$$

最后光电探测器的光电流 I 为

$$I(t) = \eta E_{OC2}(t) E_{OC2}^*(t), \quad (6)$$

式中: η 为光电探测器的响应度; $E_{OC2}^*(t)$ 为 $E_{OC2}(t)$ 的共轭复数。由于光载波位于微环滤波器阻带内, $H_d(\omega_c) \approx 0$ 。忽略高频信号和直流信号, 光电流可近似为

$$I(t) \approx \eta P_C \sqrt{a_{up} a_{down}} J_1 \left(\frac{m}{\sqrt{2}} \right) H_d(\omega_c + \omega_f) \cdot \exp[i(\omega_f t + \pi + \varphi_{up} - \varphi_{down})], \quad (7)$$

式中: P_C 为光载波的光功率。由(7)式可以看出, 微波光子滤波器的性能与光学滤波器的传输函数有关。基于 MZI 的 Add-Drop 型氮化硅微环结构如图 2 所示。采用如图 2(a)所示的低传输损耗双条形氮化硅光波导结构: 波导宽度为 $W = 1.2 \mu\text{m}$, 两层氮化硅芯层厚度均为 $H = 170 \text{ nm}$, 间隔 $G = 500 \text{ nm}$, 其折射率 n_1 为 2; 包层为 SiO_2 , 厚度为 $8 \mu\text{m}$, 其折射率 n_2 为 1.446。利用 Si_3N_4 的热光效应, 通过改变施加在电极(heater1 和 heater2)上的电功率, 可以改变波导与谐振腔之间的耦合系数。

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\pi n_{\text{eff}} L} \frac{1 - at_1 t_2}{\sqrt{at_1 t_2}}, \quad (9)$$

式中: λ 为谐振峰处的波长; n_{eff} 为波导的有效折射率; L 为环的腔长。当改变 t_1 、 t_2 时, 可以改变微环的 3 dB 带宽, 进而可以对微波光子带通滤波器的带宽进行调谐。

3 实验结果及分析

本课题组搭建了如图 1(a)所示的微波光子

滤波器链路,其中激光器(Santac WSL-100)输出光功率为 15.5 dBm,矢量仪(Agilent N5242A)输出 5 dBm 的扫频信号,经宽带 90°电桥(Krytar 3017360K)进入 DDMZM 调制器(Fujitsu LU-MZM-DPSK-X)调制,其半波电压在 1 GHz 下为 3.8 V,插损为 7.0 dB,光电探测器(Finisar XPDV2120RA)响应度为 0.65 A/W。Add-Drop 型氮化硅可调谐微环的环长约为 3595 μm ,电极长度约为 500 μm 。改变施加在电极上的电压,可以实现波导与谐振腔之间的振幅透射率 t_1 和 t_2 的改变,从而对微环滤波带宽进行调谐。

首先通过光波测试系统(Agilent 8164A)测量了氮化硅微环的透射谱。图 3(a)为对电极 1 和电极 2 分别加载 228 mW 和 247 mW 电功率时,测试

得到的 Through 和 Drop 端透射谱。测试得到微环自由光谱范围 $f_{\text{FSR}} \approx 47.38$ GHz,Drop 端输出的光学带通滤波器的消光比和 3 dB 带宽分别是 32.4 dB 和 646 MHz。基于(8)式对测量光谱进行拟合,得到微环的损耗因子为 $a \approx 0.9873$,振幅透射率 $t_1 \approx 0.9766$ 和 $t_2 \approx 0.9925$ 。图 3(a)中点和曲线分别为测试和拟合结果,可以看出两者符合得很好。若将光载波设置在微环非谐振区,其与最近谐振峰的频率之差 f_{RF} 即为微波光子滤波器的中心频率。光载波与微环谐振频率差为 10 GHz 时得到的微波光子带通滤波器的频谱响应理论仿真与实验结果如图 3(b)所示,可以看出理论和实验基本符合,测得的微波光子滤波器带外抑制比和 3 dB 带宽约为 37.0 dB 和 726 MHz。

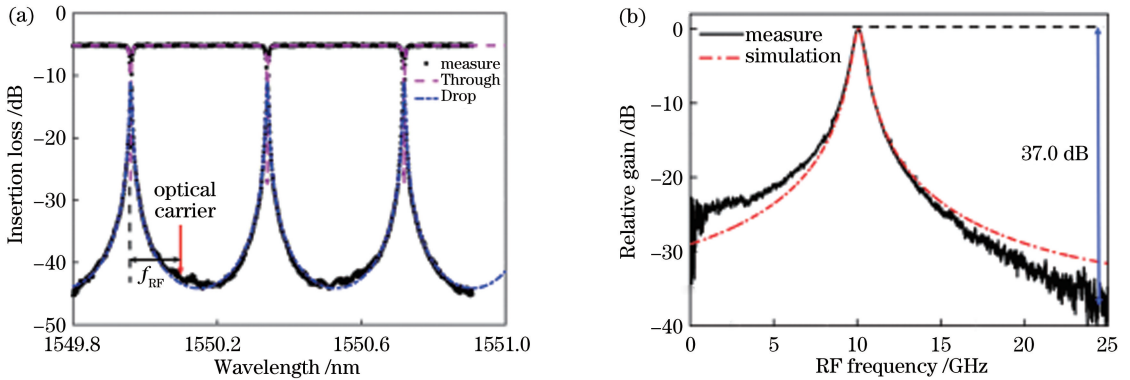


图 3 实验和仿真结果对比。(a)微环谐振腔的透射谱;(b)微波光子滤波器频谱响应

Fig. 3 Comparison of experimental and simulation results. (a) Transmission spectra of microring resonator; (b) frequency spectral response of microwave photonic filter

通过改变光载波波长可以实现该微波光子带通滤波器的频率调谐,实验中实现了 1.64 ~ 23.41 GHz 的滤波器频率调谐,结果如图 4 所示。通过增大微环的 FSR 可以实现更大频率范围的调谐。

通过改变施加在微环电极 1 和电极 2 上的电功率,可以实现该微波光子滤波器的带宽调谐。为了使微环 Drop 端达到最小的串扰,可优化两个调谐电极驱动功率,以满足临界耦合 ($t_1 = at_2$)^[21]。图 5(a)和(b)为微环电极 2 在不同的电功率(193 ~ 256 mW)下,Drop 端的透射光谱和对应微波光子滤波器的频谱响应。图 5(c)和(d)显示了微环和微波光子滤波器带宽和消光比的变化。当微环带宽从 0.610 GHz 增加到 2.514 GHz,微波光子滤波器 3 dB 带宽实现了从 0.683 ~ 2.246 GHz 的调谐,微波光子滤波器带宽和微环带宽变化基本一致。随着带宽的增大,微环的消光比从 32.6 dB 减小到 21.6 dB,对应的微波光子滤波器的带外抑制比从 37.7 dB 减小到 26.3 dB。另外,虽然采用低损耗氮化硅微环可以实现高分辨率的可重构微波光子滤波,但是氮化硅较慢的热光效应会导致其响应时间在亚毫秒量级。

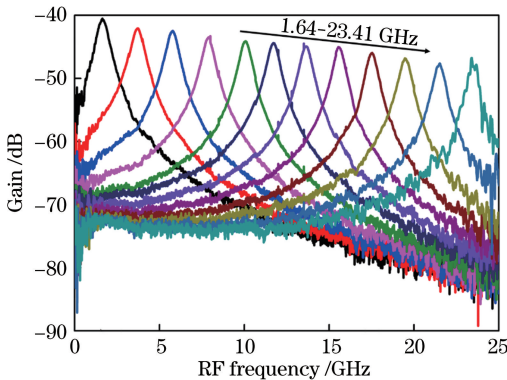


图 4 微波光子滤波器的频率调谐

Fig. 4 Frequency tuning of microwave photonic filter

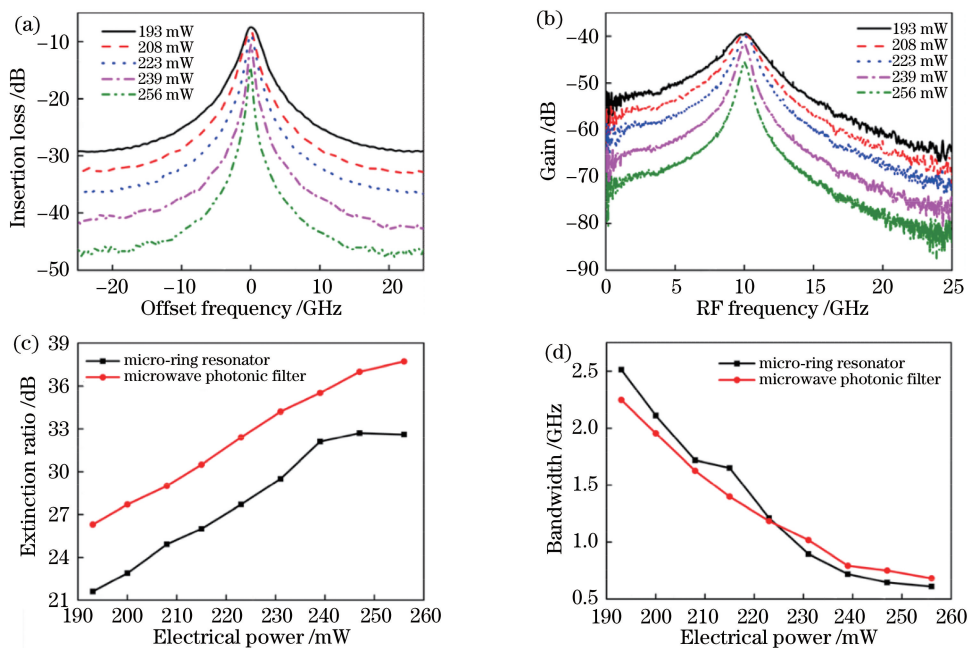


图5 不同电功率下的实验测试结果。(a)微环的透射谱;(b)微波光子滤波器频谱;(c)微环和微波光子滤波器抑制比随电功率的变化;(d)微环和微波光子滤波器带宽随电功率的变化

Fig. 5 Measured results under different electrical powers. (a) Transmission spectra of microring; (b) frequency spectra of microwave photonic filter; (c) variations of suppression ratios of microring and microwave photonic filter with electrical power; (d) variations of bandwidths of microring and microwave photonic filter with electrical power

4 结 论

基于 Add-Drop 型氮化硅可调微环带通滤波器,结合光载波分离方案提出一种微波光子可重构带通滤波器。通过光载波波长和微环耦合系数调谐,实现了微波光子滤波器频率和带宽可重构,滤波器频率调谐范围和带宽调谐范围分别为 1.64 ~ 23.41 GHz 和 0.683 ~ 2.246 GHz,且在带宽调谐范围内,微波光子滤波器的带外抑制比大于 26 dB。

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] Li Y D, Wang R, Pu T, et al. Review on high out-of-band suppression ratio of microwave photonic filter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 020005.
李元栋, 王荣, 蒲涛, 等. 高带外抑制比微波光子滤波器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 020005.
- [3] Fandiño J S, Muñoz P, Doménech D, et al. A monolithic integrated photonic microwave filter[J]. Nature Photonics, 2017, 11(2): 124-129.
- [4] Minasian R A, Chan E H W, Yi X. Microwave

photonic signal processing [J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22918-22936.

- [5] Wang W X, Tao J, Huang L. Narrowband tunable microwave photonic filter based on Fabry-Perot laser with optical injection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1006002.
王文轩, 陶继, 黄龙. 基于光注入法布里-珀罗激光器的窄带可调谐微波光子滤波器[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1006002.
- [6] Cui Y F, Wang Y P, Shi Q Y, et al. High-resolution transverse load fiber sensor based on microwave photonic filter[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1206004.
崔益峰, 汪弋平, 施青云, 等. 基于微波光子滤波器的高分辨率光纤横向负载传感器[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1206004.
- [7] Xu Y M, Pan W, Lu B, et al. Multi-stopband microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1106004.
徐翌明, 潘炜, 卢冰, 等. 基于受激布里渊散射的多阻带微波光子滤波器[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1106004.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Zhang W F, Yao J P. On-chip silicon photonic integrated frequency-tunable bandpass microwave photonic filter [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(15): 3622-3625.
- [11] Palací 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.
- [12] 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, 2015: 15667940.
- [13] 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.
- [14] Song S J, Chew S X, Yi X K, et al. Tunable single-passband microwave photonic filter based on integrated optical double notch filter [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4557-4564.
- [15] Yu H C, Chen M H, Guo Q, et al. All-optical full-band RF receiver based on an integrated ultra-high-Q bandpass filter [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 701-706.
- [16] Song S J, Zhang S, Liu B, et al. Single passband microwave photonic filter using a dual-parallel Mach-Zehnder modulator [C] // Asia Communications and Photonics Conference, November 10-13, 2017, Guangzhou, Guangdong, China. Washington, D.C.: OSA, 2017: Su1E.4.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Devgan P S, Brown D P, Nelson R L. RF performance of single sideband modulation versus dual sideband modulation in a photonic link [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(9): 1888-1895.
- [20] Bogaerts W, Heyn P D, Vaerenbergh T V, et al. Silicon microring resonators [J]. *Laser & Photonics Review*, 2012, 6(1): 47-73.
- [21] Almeida V R, Barrios C A, Panepucci R R, et al. All-optical control of light on a silicon chip [J]. *Nature*, 2004, 431(7012): 1081-1084.