

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

王文轩^{1,2}, 陶继², 黄龙²

¹南京信息职业技术学院通信学院, 江苏 南京 210023;

²南京大学现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210093

摘要 基于光注入法布里-珀罗(F-P)激光器的波长选择性放大理论,设计并实现了一种窄带可调谐的单通带微波光子滤波器(MPF)。通过改变注入锁定参数,研究了注入锁定参数对中心频率、插入损耗和带外抑制比等性能指标的影响,以及波长功率放大与腔模红移的关系。实验结果表明,通过合理调节注入功率比、主从激光器失谐频率和偏置电流,可以获得带外抑制比为27.9 dB,3 dB带宽为275 MHz和调谐范围为9~32 GHz的MPF。所提结构可以应用于高频、宽带可调谐的滤波选频和光电振荡。

关键词 光通信; 光学器件; 微波光子; 滤波器; 注入锁定; 法布里-珀罗激光器; 波长选择性放大

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1006002

Narrowband Tunable Microwave Photonic Filter Based on Fabry-Perot Laser with Optical Injection

Wang Wenxuan^{1,2}, Tao Ji², Huang Long²

¹College of Communication, Nanjing College of Information Technology, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

²College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

Abstract A narrow single pass band tunable microwave photonic filter (MPF) is designed and experimentally demonstrated based on the theory of wavelength-selective amplification of Fabry-Perot (F-P) laser with optical injection. Through changing the injection locking parameters, we investigate the influences of injection locking parameters on the the central frequency, insertion loss, and out-of-band suppression ratio, and the relationship between the wavelength power amplification and the cavity mode red-shift. The experimental results show that, when the injection power ratio, detuning frequencies of the master slave lasers and bias current are properly adjusted, the out-of-band suppression ratio of MPF is 27.9 dB, the 3 dB passband is 275 MHz and the frequency of MPF can be tuned from 9 GHz to 32 GHz. The proposed structure is useful for applications such as filters frequency selection and optic-electric oscillation, where require high frequency and wideband tunability.

Key words optical communications; optical devices; micro-wave photonic; filter; injection-locking; Fabry-Perot laser; wavelength-selective amplification

OCIS codes 060.4510; 120.2440; 140.3520; 050.2230

1 引言

光纤具有重量轻、带宽大和抗电磁干扰等优点,因此用光学方法处理微波信号,尤其是高频微波信号,是未来微波技术发展的趋势^[1-2]。在光域对微波进行滤波和选频处理是其中的重要研究领域之一,成为近几年的研究热点。用于对微波信号进行滤波和选频处理的光子器件集成系统被称为微波光子滤波器(MPF)^[3],

收稿日期: 2017-05-04; 收到修改稿日期: 2017-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(61504170)、江苏省自然科学基金青年基金(BK201607907)、江苏省高校品牌专业建设工程(PPZY2015A092)、江苏高校“青蓝”工程资助

作者简介: 王文轩(1982—),女,博士研究生,讲师,主要从事微波光子和光子集成方面的研究。E-mail: wangwx@njcit.

进行滤波和选频处理的基本方法是先通过光电转换(E/O)把微波信号转换成光载微波信号,再在光域用光电转换(O/E)直接输出目标微波信号。

相对于传统的利用电路板实现电子电路处理的方法,MPF除了光纤损耗小外,还具有重量轻、抗电磁干扰、可重构和可调谐带宽等优点,这是传统电子方法无法比拟的。因此,MPF在众多领域有着广泛的应用,如MPF可以在光电振荡(OEO)中实现环腔选频^[4-5]、在光载无线(RoF)系统中实现信道选择和信道滤波^[6]、在天文无线电中实现波段选择^[7],以及在移动目标识别的雷达系统中实现杂波消除^[8]等。

实现单通带MPF的传统方法主要基于光延时线结构^[9-10],但是该方法受限于有限脉冲响应的固有周期性频谱特性;为了避免频谱重叠,通常只取自由频谱中的一部分。另外,基于多抽头延时线结构的MPF可调谐性较差,无法满足系统要求。为此,科研工作者提出了多种方案来实现单通带MPF,例如宽谱光源频谱切割技术^[11]和相位调制向强度调制的转换(PM-IM)技术^[12]等。但是,这些方法对外界环境扰动敏感,器件体积过大且成本过高,产生的MPF并不是严格意义上的单通带MPF。

基于传统方法,利用Xiao等^[13]所述的多频光注入条件以及半导体激光器对注入光的波长选择性放大特性,设计了一种基于光注入法布里-珀罗(F-P)激光器的可调谐单通带MPF,得到了不同注入功率比、失谐频率和工作电流条件下的放大特性曲线。同时研究了不同注入功率比条件下,腔模红移对主激光器的载波和-1阶边带的增益特性,得到了最佳放大、高边带抑制比的单边带(SSB)信号。该方案结构简单,可以实现窄带、超低噪声、超高频率和超宽带范围的频率调谐,为利用光学方式产生高频微波信号提供了一种新方法。

2 理论模型及实验装置

2.1 理论模型

图1为MPF结构示意图,由图可见该结构简单、紧凑。除了包含在微波光子链路中必需的主激光器源(ML)、光电调制器(EOM)和光电探测器(PD)外,仅需加上偏振控制器(PC)和光环行器,以及作为从激光器(SL)的F-P激光器。主激光器产生的稳态光经过光电调制器,加载上无线射频(RF)信号并通过光环行器注入到从F-P激光器中,光电探测器将光信号还原成电信号。利用PC对主激光器、光电调制器和从激光器的偏振态进行调整。在以上结构中,MPF的中心频率和插入损耗可以通过调节F-P激光器的偏置电流 I_b 、注入功率和主从激光器间的失谐频率 Δf 来改变。

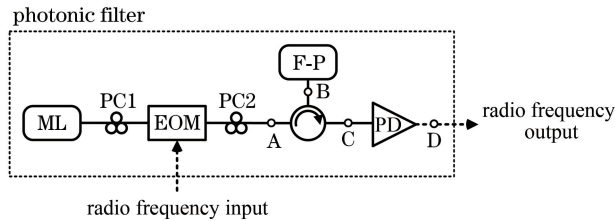


图1 MPF结构示意图

Fig. 1 Schematic of MPF structure

利用光注入F-P激光器的波长选择性放大的特性,实现单通带MPF。根据文献^[14-18],F-P激光器的多纵模效应使得激光器输出的光不是单一波长,而是一组波长,每一组波长有一定的宽度,且相邻波长之间的间隔相同。图2为自由运转的F-P激光器的输出光谱图,由图可见,工作在1550 nm波长的F-P激光器的光谱中有4个纵模的功率比较高,通过改变注入F-P激光器的偏置电流,可以改变能量在不同纵模之间的分布,因此F-P激光器具有可重构特性。

当有外光注入F-P激光器并将光锁定到某一纵模模式上时,会产生分布式反馈(DFB)激光器的腔模红移现象和波长选择性放大现象。半导体激光器的腔模在光注入条件下会发生红移,即波长往长波长方向漂移。其物理原因是外光注入消耗了激光器谐振腔内的载流子数,使谐振腔的有效折射率减小,降低了谐振频率,从而使得波长变长^[19]。实验发现,当注入光包含多个频率成分时,F-P激光器对注入光的长波长分量具有明显的放大特性,放大程度与该频率和腔模之间的失谐频率有关,当该频率位于残留腔模的中心频率处时,波长可获得最大程度的放大。因此,研究了在光注入条件下F-P激光器的红移曲线和波长选择性放

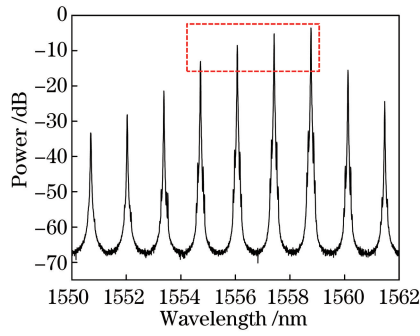


图 2 自由运转的 F-P 激光器的输出光谱图

Fig. 2 Output optical spectrum of free-running F-P laser

大特性,为下一步基于光注入 F-P 激光器技术实现 MPF 的工作提供了基础。

假设自由振荡 F-P 激光器某一个纵模的输出频率为 f_{sn} [图 3(a)]。在图 3(b) (对应图 1 的 B 点波形) 中,当 ML 的发射波长(频率为 f_m)注入到 F-P 激光器后,由于发生腔模红移现象,功率降低,频率减小,在腔模处将产生类高斯型的增益谱。增益谱的形状由失谐频率 Δf ($\Delta f = f_m - f_{sn}$) 和注入比 R 共同决定。若此时对 f_m 进行双边带强度调制,将在 f_m 两边产生对称边带 (f_0, f_1, f_{-1}),即包含一个强光载波和两个弱二级边带 [图 3(c)]。当这些边带也随着 f_m 一起注入到 F-P 激光器的腔内时,落在增益谱范围内的边带 f_{-1} 将被放大,得到的增益大小由边带与腔模的相对位置决定。当 -1 级边带被放大到一定程度后, F-P 激光器被锁定,腔模消失,如图 3(d) 所示 (对应图 1 的 C 点波形)。此时若对 F-P 激光器进行数据基带信号的直接调制,则只有锁定腔模的 -1 级边带会被调制,而载波和 $+1$ 级边带由于远离增益区几乎不受影响,从而可实现单边带调制 [图 3(e)]。如图 3(f) 所示,经过 PD 检测后各频点的功率分布与腔模处的增益谱一致,即得到一个类高斯型的单通带 MPF。

需要注意的是,图 3(e) 中出现了主从激光器进行四波混频(FWM)后产生的新波长(频率)。忽略自发辐射噪声和载流子耦合噪声的影响,用来描述 F-P 激光器的速率方程可表示为^[20-21]

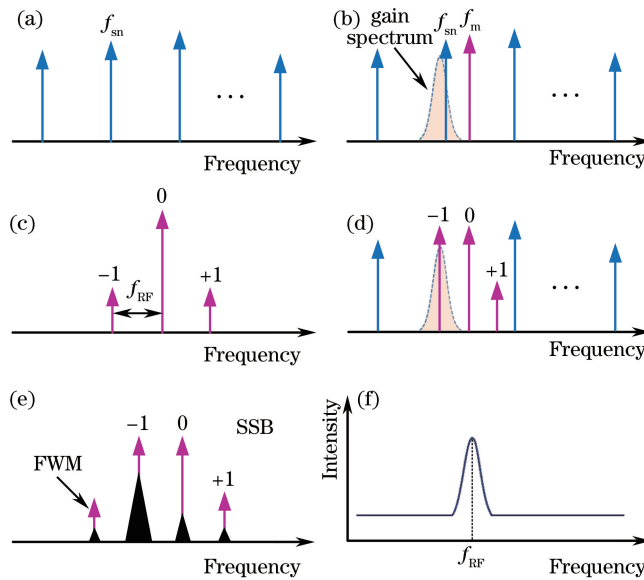


图 3 实现单通带 MPF 的原理图。(a)自由运转的 F-P 激光器光谱;(b)光注入下的光谱;(c) EOM 后、PD 前光谱;
(d) SL 上无直接调制时的光谱;(e) SL 上有直接调制时的光谱;(f)系统的频率响应

Fig. 3 Principle diagram of MPF with single pass band. (a) Spectrum of free-running F-P laser; (b) spectrum under optical injection; (c) spectrum after EOM and before PD; (d) spectrum without direct modulation at SL; (e) spectrum with direct modulation at SL; (f) frequency response of system

$$\frac{dE_n(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha)[G_n(N) - \gamma]E_n(t), \quad (1)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \gamma_e(C_0 N_{th} - N) - \sum_{n=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} G_n(N) |E_n(t)|^2, \quad (2)$$

$$f_n = f_0 + n\Delta f_L = f_0 + \frac{n}{\tau_L}, \quad (3)$$

$$G_n(N) = \frac{g_c(N - N_0)}{1 + s \sum_{n=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} |E_n(t)|^2} \left[1 - \left(\frac{f_n - f_0}{\Delta f_g} \right)^2 \right], \quad (4)$$

式中 $E_n(t)$ 为光场的复振幅; $|E(t)|^2 = P(t)$ 为光子能量; n 为 F-P 激光器的第 n 个模式; $G_n(N)$ 为激光器增益; N 为载流子数; N_0 为透明载流子数; γ 为腔损耗率; g_c 为微分增益系数; $N_{th} = N_0 + \gamma/g_c$ 为阈值载流子数; γ_e 为载流子衰减系数; M 为总模式数; α 为线宽增益因子; C_0 为归一化直流偏置电流系数, $C_0 = I_0/I_{th}$, 其中 I_0 为直流偏置电流, I_{th} 为阈值电流; s 为 F-P 激光器的模式饱和系数; τ_L 为腔内光往返一周的时间; k_i 为光注入强度系数; $\Delta f_L = 1/\tau_L$ 为激光器纵模间隔; f_0 为 F-P 激光器的中心模式频率。在实验中, F-P 激光器的中心模式 ($n=0$) 位于 1561.5 nm, 纵模间隔为 1.34 nm。主、从激光器的失谐频率 Δf 和注入比 R 可分别定义为

$$\Delta f = f_m - f_{sn}, \quad (5)$$

$$R = 20 \lg \frac{A_{in}}{A_{fr}}, \quad (6)$$

式中 f_m 、 f_{sn} 分别是图 3(b) 中主、从激光器的发射频率, A_{in} 为主激光器注入到从激光器谐振腔内部的光功率, A_{fr} 为从激光器自由振荡时的出射功率。通常光载带比 (OCSR) 是指光载波与边带的比值, SSR 指边带抑制比。

2.2 实验装置

光注入 F-P 激光器实现 MPF 的实验装置图如图 4 所示, 分别选择可调谐激光器 (TLS) 和 F-P 激光器作为主、从激光器。TLS 激光器 (型号 Agilent 81989A, Agilent 公司, 美国) 发射连续光波, 功率可调范围为 6~12 dBm, 最小调节间隔为 0.01 dB。相位调制器 (PM, 型号 ECOSPACE PM-DV5-40-PFU-PUF-LV, ECOSPACE 公司, 美国) 的带宽为 40 GHz, 半波电压为 4 V, 工作在正交偏置点。网络矢量分析仪 (VNA, 型号 Anritsu MS4647A, Anritsu 公司, 日本) 用于测量 MPF 频率响应, 将产生的一个微波正弦信号送入 PM, 扫频范围为 10 MHz~45 GHz。PC 控制注入光与 F-P 激光器偏振态的关系。F-P 激光器的阈值电流为 12 mA, 由电流源驱动器 (型号 THORLABS LDC 200CV, THORLABS 公司, 美国) 和温控驱动器 (型号 THORLABS TED 200C, THORLABS 公司, 美国) 保证系统稳定工作。35 dB 隔离度的光环行器用于光路由, 3 端口输出光信号通过耦合器被分为两路: 1% 的光功率送入光谱分析仪 (OSA, 型号 YOKAGAWA AQ6370, YOKAGAWA 公司, 日本), OSA 用于监测 F-P 激光器注入的波形; 99% 的光功率通过 3 dB 带宽为 50 GHz 的 PD 后被转换为电信号, 之后被送入矢量网络分析仪 (VNA)。实验中将光谱仪的分辨率设为 0.02 nm。

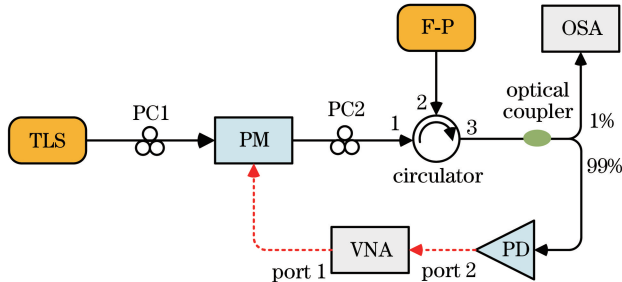


图 4 光注入 F-P 激光器实现 MPF 的实验装置图

Fig. 4 Diagram of experimental setup for achieving MPF with optical injection into F-P laser

3 实验结果与分析

3.1 基于光注入条件下 F-P 激光器的放大特性实现 MPF

MPF 滤波响应特性依赖于探测光信号的功率,信号中包括注入载波和被放大的边带。此外,边带功率也取决于 F-P 激光器的腔模红移增益。通过提高注入光功率,或利用从激光器的腔模红移效应来提高滤波器响应幅值,可大幅减小插入损耗。

根据所述原理,MPF 的中心频率和频率响应可以通过调节注入比 R 、失谐频率 Δf 和偏置电流 I_b 来改变,因此实验中重点考察这些参数的影响。为便于分析实验结果,定义 R 为注入到 F-P 激光器的功率与 F-P 激光器自由振荡的功率之比。设定 $I_b = 25.74$ mA、 $R = 22.73$ dB 和 $\Delta f = 2.94$ GHz,图 5 为实验测得的 MPF 滤波特性曲线和光谱图。由图 5(a)可以看出,MPF 的中心频率 $f_c = 11.43$ GHz,带外抑制比为 27.9 dB,3 dB 带宽为 275 MHz。实验测得的 MPF 滤波性能优于文献[22-23]中得到的滤波性能。

图 5(b)为 OSA 测得的光谱图,其中插图额外对注入锁定的纵模进行放大^[24],由图可见注入光的主激光器的输出光波形和红移后腔模的波形,其中 OCSR 为 -5.35 dB,SSR 为 19.3 dB。

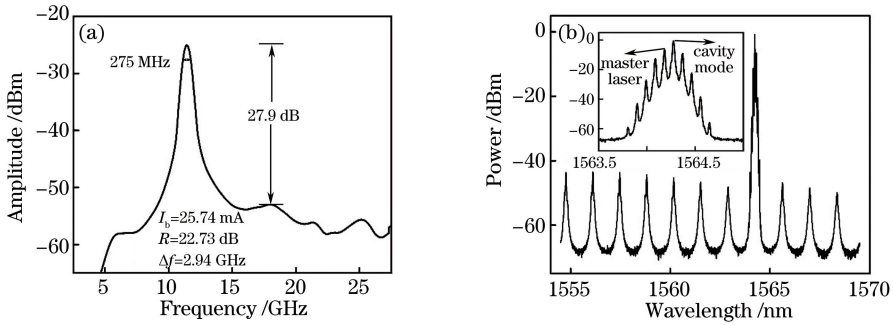


图 5 测量得到的 MPF(a)滤波特性曲线和(b)光谱图

Fig. 5 Measured (a) filter characteristic curve and (b) optical spectrum of MPF

图 6 为中心频率和幅值稳定性测量结果,1 h 内每间隔 5 min 测一次,测得频率响应曲线的中心频率与幅值随时间变化情况。由图 6 可见,频率响应曲线的中心频率与幅值变化量分别为 57 MHz 和 0.288 dB,根据所得结果,该结构的 MPF 稳定性优于文献[25]所述方法。

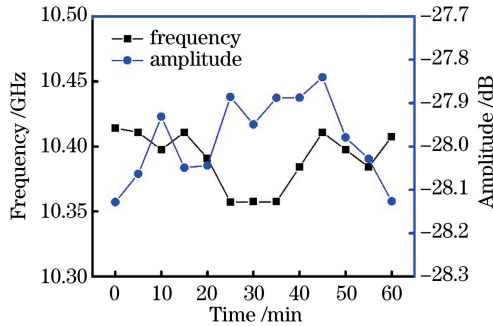


图 6 中心频率和幅值稳定性测量结果

Fig. 6 Measurement results of the center frequency and magnitude stability

3.2 不同注入功率比、失谐频率和偏置电流条件下 F-P 激光器的滤波特性

实验中,通过改变注入比 R 、失谐频率 Δf 和偏置电流 I_b ,分析其对 F-P 激光器放大特性的影响,即其对 MPF 系统频率响应的规律。

首先,保持 I_b 、 Δf 不变,对不同注入比条件下的 MPF 频率响应曲线进行测量。需要注意的是,这里的 R 与(6)式定义的不同,因为实验中无法直接测量注入到激光器内部的真实功率,因此实验所得为主激光器注入到 F-P 激光器尾纤中的光功率与 F-P 激光器自由振荡时尾纤输出功率的比值。后面与实验有关的 R 都是如此定义。固定 $I_b = 25.56$ mA、 $\Delta f = -3.70$ dB,不同注入比条件下的 MPF 频率响应和光谱图如图 7

所示,不同注入功率比条件下 F-P 激光器的放大特性是不同的。由图可见,当 R 从 12.45 dB 增大到 16.37 dB 时,中心频率 f_c 从 8.96 GHz 增加到 9.45 GHz,频率响应峰值从 -29.59 dBm 增加到 -24.73 dBm,即 MPF 插入损耗随着 R 的增加而减小,同时响应曲线的 3 dB 带宽变窄。随着 R 的增大,放大特性曲线出现两个峰值,一个峰值表明 -1 级边带在此处得到最佳放大;另一个峰值是指四波混频(FWM)效应产生的边带在此处得到了放大。当 R 继续增大时,两个峰值逐渐接近。图 7 插图为对应的光谱图,由图可见,从 F-P 激光器的腔模功率随着 R 的增大显著提高,而主激光器功率没有发生任何变化,这说明光注入条件下的 F-P 激光器增益谱与腔模红移大小有关。

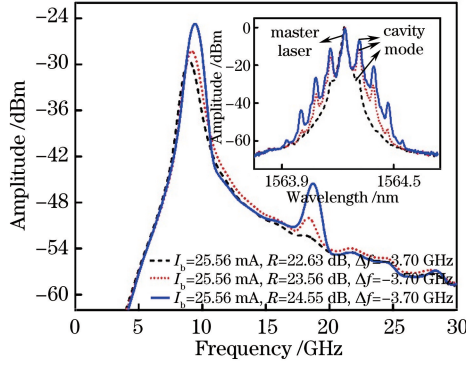


图 7 不同注入比条件下的 MPF 频率响应和光谱图

Fig. 7 Frequency response and optical spectrum of MPF under different injection ratios

接着,保持 I_b 、 R 不变,对不同失谐频率条件下的 MPF 频率响应曲线进行测量。实验中,当 $I_b = 27$ mA 时,固定 $R = 2.4$ dB,以 0.01 nm 为步长调节 TLS 的输出波长, Δf 在 $1.25 \sim 36.25$ GHz 范围内变化时 MPF 的频率响应如图 8(a) 所示。由图可见,滤波器的中心频率随 Δf 的增大而增大,且其通带形状与 Δf 取值密切相关,只有当 Δf 在某个中间值范围内 (7.5 GHz $< \Delta f < 26.25$ GHz) 时,MPF 才呈现窄带单通带特性。

当 Δf 较小 ($\Delta f < 7.5$ GHz) 时,MPF 的通带范围过大,滤波性能较差。随着 Δf 的增大,MPF 的通带变窄且响应值进一步增大。当 $\Delta f = 18.75$ GHz 时,滤波器的带宽最窄,响应值最大。当 $\Delta f > 27.5$ GHz 时,MPF 将出现多通带特性,低频处出现响应,高频处出现 3 个通带。这些响应变化源于激光器波长与腔模之间的载流子竞争。

不同失谐频率条件下 MPF 的光谱图如图 8(b) 所示。由图可见,在四波混频区,随着 Δf 的减小,主激光器的功率逐渐提高,但腔模功率逐渐降低,四波混频效应也逐渐减弱,对应 MPF 频率响应曲线的峰值减小、带宽变宽。当 Δf 减小到一定程度且四波混频效应较弱时,腔模功率迅速降低,MPF 频率响应曲线趋于平坦并最终消失。由此可以看出,在 I_b 固定的条件下,当 $\Delta f > 0$ 时,只有 F-P 激光器与主激光器的波长处于 FWM 状态下,F-P 激光器才会对注入光中除主激光器波长之外的其他频率有明显的放大特性。

最后,保持注入光的波长和功率不变,对不同偏置电流条件下的 MPF 频率响应曲线进行测量。改变 I_b 会影响 F-P 激光器纵模的波长和功率,从而影响 R 和 Δf 。图 9 为不同偏置电流条件下 MPF 的频率响应。

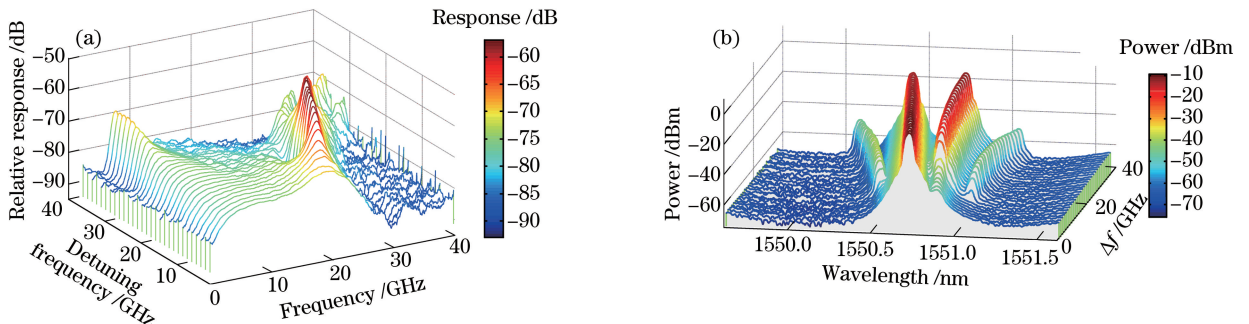


图 8 不同失谐频率条件下 MPF 的特性。(a) 频率响应;(b) 光谱图

Fig. 8 Characteristics of MPF under different Δf . (a) Frequency response; (b) optical spectrum

由图可见,增大 I_b ,则中心频率 f_c 增大,频率响应峰值从 -35.90 dBm 增加到 -22.51 dBm,即 MPF 插入损耗随着 I_b 的增大而减小,同时响应曲线的 3 dB 带宽变窄。另外,响应曲线中也出现了由 FWM 效应产生的第二个响应峰值,其峰值随着 I_b 的增大而逐渐增大。

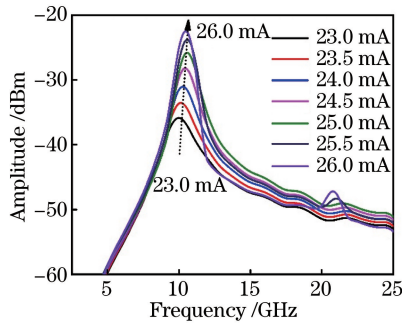


图 9 不同 I_b 下的 MPF 频率响应

Fig. 9 Frequency response of MPF under different I_b

4 结 论

通过使用外光注入 F-P 激光器的波长选择性放大特性,实现了注入锁定条件下的窄带连续可调谐的单通带微波光子滤波器。通过调整注入锁定参数,可以获得较高的带外抑制比和较小的插入损耗。实验结果表明,滤波器的中心频率 $f_c = 11.43$ GHz, 3 dB 带宽为 275 MHz,带外抑制比为 27.9 dB,连续调谐范围可达到 9~32 GHz。此外,还研究了注入功率比 R 、失谐频率 Δf 和偏置电流 I_b 对系统频率响应和滤波特性的影响规律,以及波长功率放大与腔模红移的关系。设计实现的 MPF 结构(1550 nm)简单、紧凑,成本低,稳定性和滤波选频性能好,比起电滤波器更适合高频和宽调谐的场合。如果使用性能更佳的 TLS,可以获得更大的频率调谐范围和更好的滤波特性。因此,此类结构的 MPF 动态特性比较丰富,在 RoF 和雷达等领域具有广阔的应用前景。

致谢 感谢解放军理工大学通信工程学院蒲涛教授、朱华涛博士提供设备支持。

参 考 文 献

- [1] Lin Tao, Zhao Shanghong, Zhu Zihang, *et al.* Microwave photonics multi-band frequency conversion scheme based on single optical frequency comb for satellite communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0623002.
林涛, 赵尚弘, 朱子行, 等. 基于单光频梳的卫星通信多频段变频方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0623002.
- [2] Li Xianghua, Yang Chun, Chong Yuhua, *et al.* High dynamic range microwave photonic link based on dual-wavelength dual-parallel modulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0105003.
李向华, 杨春, 崇毓华, 等. 基于双波长双并联调制的大动态范围微波光子链路[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0105003.
- [3] Capmany J, Ortega B, Pastor D. A tutorial on microwave photonic filters[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(1): 201-229.
- [4] Yang B, Jin X F, Zhang X M, *et al.* A wideband frequency-tunable optoelectronic oscillator based on a narrowband phase-shifted FBG and wavelength tuning of laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(1): 73-75.
- [5] Pan S L, Yao J P. Wideband and frequency-tunable microwave generation using an optoelectronic oscillator incorporating a Fabry-Perot laser diode with external optical injection[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1911-1913.
- [6] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 319-330.
- [7] Hall P J. "The Square Kilometer Array" Proceedings[J]. *Workshop on Applications of Radio Science*, 2000(4): 41-46.
- [8] Skolnik M I. *Introduction to radar systems*[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [9] Capmany J, Pastor D, Martinez A, *et al.* Microwave photonic filters with negative coefficients based on phase inversion in an electro-optic modulator[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(16): 1415-1417.
- [10] Wu Danning, Wu Yuanda, Wang Yue, *et al.* Research on tunable filter based on micro-ring resonators[J]. *Acta Optica*

Sinica, 2016, 36(1): 0123002.

吴丹宁, 吴远大, 王玥, 等. 基于微环谐振腔的可调谐滤波器的研究[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0123002.

- [11] Huang T X H, Yi X, Minasian R A. Single passband microwave photonic filter using continuous-time impulse response [J]. Optics Express, 2011, 19(7): 6231-6242.
- [12] Gao L, Chen X F, Yao J P. Tunable microwave photonic filter with a narrow and flat-top passband [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2013, 23(7): 362-364.
- [13] Xiao Y C, Guo J, Wu K, *et al.* An ultrawide tunable range single passband microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering [J]. Optics Express, 2013, 21(3): 2718-2726.
- [14] 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.
- [15] Stern Y, Zhong K, Schneider T, *et al.* Tunable sharp and highly selective microwave-photonic band-pass filters based on stimulated Brillouin scattering [J]. Photonics Research, 2014, 2(4): B18-B25.
- [16] Kasuya H, Mori M, Goto R, *et al.* All optical mode locking of Fabry-Perot laser diode via mutual injection locking between two longitudinal modes [J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(1): 13-15.
- [17] Han X Y, Xu E N, Liu W L, *et al.* Tunable dual-passband microwave photonic filter using orthogonal polarization modulation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(20): 2209-2212.
- [18] Xiong J T, Wang R, Pu T, *et al.* A novel approach to realizing a widely tunable single passband microwave photonic filter based on optical injection [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(6): 171-176.
- [19] Murakami A, Kawashima K, Atsuki K. Cavity resonance shift and bandwidth enhancement in semiconductor lasers with strong light injection [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 39(10): 1196-1204.
- [20] Yang Q, Wu Z M, Wu J G, *et al.* Influence of injection patterns on chaos synchronization performance between a multimode laser diode and a single-mode laser [J]. Optics Communications, 2008, 281(19): 5025-5030.
- [21] Buldú J M, García-Ojalvo J, Torrent M C. Multimode synchronization and communication using unidirectionally coupled semiconductor lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(6): 640-650.
- [22] 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.
- [23] Kakaie Z, Shakibaei B H, Sua Y M, *et al.* Design of single-band bandpass filter using photonic bandgap fiber by suppressing core modes in higher order bandgaps [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 1-14.
- [24] Ogusu M, Inagaki K, Mizuguchi Y. 60 GHz millimeter-wave source using two-mode injection-locking of a Fabry-Perot slave laser [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2001, 11(3): 101-103.
- [25] Grund D W, Shi S, Schneider G J, *et al.* Improved configuration and reduction of phase noise in a narrow linewidth ultrawideband optical RF source [J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4667-4670.