

doi:10.3788/gzxb20154409.0923001

# 基于相位调制和光子晶体光纤 Sagnac 环的可调谐微波光子滤波器

曹晔, 陈磊, 童峥嵘

(天津理工大学 计算机与通信工程学院; 教育部通信器件与技术工程研究中心;  
天津市薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384)

**摘 要:**提出了一种光子晶体光纤 Sagnac 环切割宽带光源的中心频率连续可调的微波光子滤波器. 用温敏液体(Cat. 19340)对光子晶体光纤(长度为 5m)中心的一个大孔进行填充后嵌入 Sagnac 环. 仿真分析了不同填充占空比对 Sagnac 环梳状谱周期和滤波器通带中心频率调谐范围的影响, 测得占空比越大, Sagnac 环的梳状谱周期越小, 滤波器通带中心频率的调谐范围越大. 在占空比最大的情况下, 当温度为 20℃和 80℃时, Sagnac 环的梳状谱周期分别为 0.72 nm 和 0.52 nm, 用该 Sagnac 环对宽带光源进行切割, 当温度在 20℃~80℃变化时, 多波长光源波长间隔在 0.72 nm~0.52 nm 连续可调, 实现了滤波器通带中心频率在 15.5GHz~21.5GHz 范围内连续可调.

**关键词:**微波光子滤波器; 可调谐; 相位调制; 光子晶体光纤; 液体填充; Sagnac 环; 波长间隔

中图分类号: TN713.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)09-0923001-6

## A Tunable Microwave Photonic Filter Based on Phase Modulation and Photonic Crystal Fiber Sagnac Loop

CAO Ye, CHEN Lei, TONG Zheng-rong

(Tianjin Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Communication Devices and Technology Engineering Research Center, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** A microwave photonic filter based on photonic crystal fiber Sagnac loop was presented, the filter's center frequency can be continuously tunable. The length of photonic crystal fiber is 5m, using the thermo-sensitive liquid of Cat. 19340 to fill one big hole of photonic crystal fiber and then embed it into Sagnac loop. The effect of different duty ratios to the period of comb spectra of Sagnac loop and the tuning range of the passband center frequency of the filter were analyzed. The measured results show that the larger the duty ratio, the smaller the period of comb spectra of Sagnac loop and the larger tuning range of the passband center frequency of the filter. In the case of the maximum duty ratio, the simulation measured period of comb spectra of Sagnac loop at the temperature of 20℃ and 80℃ are 0.72 nm and 0.52 nm respectively. Using the Sagnac loop to slice the broadband light source, by adjusting the thermo-sensitive liquid's temperature from 20℃ to 80℃, the center frequency of the microwave photonic filter can be tuned continuously within the range of 15.5 GHz ~21.5GHz.

**Key words:** Microwave photonic filter; Tunable; Phase modulation; Photonic crystal fiber; Liquid filled; Sagnac loop; Wavelength spacing

**OCIS Codes:** 230.4110; 230.5750; 060.2630

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(No. 2013AA014200), 国家自然科学基金应急管理项目(No. 11444001)和天津市自然科学基金(No. 14JCYBJC16500)资助

**第一作者:** 曹晔(1976—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光纤通信技术, Email: cynever@163.com

**通讯作者:** 陈磊(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微波光子滤波器. Email: ml5222719383@163.com

**收稿日期:** 2015-04-24; **录用日期:** 2015-06-05

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

微波光子学是研究微波信号与光信号之间相互作用的交叉型学科,将微波学和光子学两门学科的优势相结合,如微波光子相移器<sup>[1]</sup>,微波光子滤波器等.微波光子滤波器(Microwave Photonic Filter, MPF)在毫米波通信、高性能雷达、光载无线通信系统和无线局域网络<sup>[2-3]</sup>中具有广泛的应用,相比于传统的电子滤波器,微波光子滤波器有着带宽宽、损耗小、体积小、抗电磁干扰、可调谐、可重构等优势,因而备受关注.

为了实现可调谐的 MPF,国内外学者提出了多种方法,如使用可调谐延迟线<sup>[4-6]</sup>、可调谐光纤光栅<sup>[7]</sup>、可调谐滤波器<sup>[8-11]</sup>、使用波长间隔可变的光源<sup>[12]</sup>等方法.2011年南洋理工大学的 Junqiang Zhou 课题组利用加窗 FP 滤波器改变多波长激光的波长间隔,实现了滤波器中心频率可调谐<sup>[9]</sup>,但此调谐受加窗 FP 滤波器调谐步长的限制,不能连续调谐且加窗 FP 滤波器的成本较高.2012年瓦伦西亚大学的 Javier Abreu-Afonso 课题组利用改变激光腔内从光纤端面到反射镜的距离来改变输出激光的波长间隔<sup>[12]</sup>,实现了滤波器中心频率可调谐,但此方法受仪器精密度的限制,存在模式失配现象,且不能连续调谐.2014年渥太华大学的 Zhang Junjie 课题组在 MZI 的一臂中加入可调谐延迟线(Variable Optical Delay Line, VODL),通过改变 VODL 的长度实现了滤波器中心频率的可调谐<sup>[13]</sup>,但此方法受 VODL 调谐步长的限制,不能连续调谐.综上所述,各种实现可调谐的方法大多不能连续可调,有待进一步改进.

本文提出了一种可调谐微波光子滤波器的新方案.将温敏液体填充的光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)<sup>[14-16]</sup>嵌入 Sagnac 环,用其梳状谱对宽带光源进行切割,作为微波光子滤波器的多波长光源,通过改变温度,实现多波长光源波长间隔的连续可调,进而实现了滤波器通带中心频率的连续可调.

## 1 结构与原理

### 1.1 结构模型

图 1 是所提出的 MPF 的结构.宽带光源(Broadband Optical Source, BOS)发出的信号光经 Sagnac 环切割后进入 3dB 耦合器 2 中,一部分被输出到光谱仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)中进行观测,另一部分进入相位调制器(Phase Modulator, PM)中,被模拟信号发生器(Analog Signal Generator, ASG)发出的 RF 信号所调制,调制后的信号光经过一段 5 km 长的单模光纤(Single-Mode Fiber, SMF),然后送入光电探测器(Photodetector, PD)中进行拍频,生成的 RF 信号输出到频谱仪中进行观测.

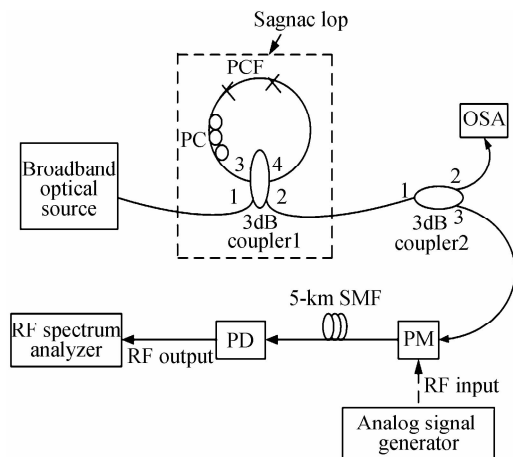


图 1 基于相位调制和光子晶体光纤 Sagnac 环的可调谐 MPF 结构模型

Fig. 1 Schematic diagram of tunable MPF based on phase modulation and photonic crystal fiber Sagnac loop

图 2 是未经填充的 PCF 的横截面图,在以  $\text{SiO}_2$  为基底的光纤端面中存在很多空气孔,通过对这些孔进行液体或气体填充,可以改变 PCF 的双折射率.

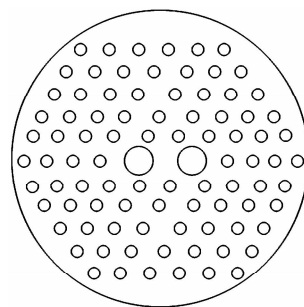


图 2 未经填充的 PCF 的横截面

Fig. 2 The cross-section of PCF without padding

图 3 是本文选用的 PCF 填充方法,填充一个大孔,经填充后的 PCF,其双折射率会随着填充液体的温度变化而变化.

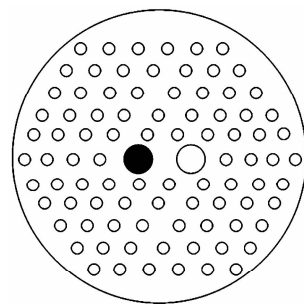


图 3 填充一个大孔后 PCF 的横截面

Fig. 3 The cross-section of PCF after padding a big hole

### 1.2 工作原理

假设输入光波为单一频率的光载波,其电场强度可表示为

$$E(t) = \cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

RF 信号通过 PM 加载到光载波上,此时 PM 输出

端的电场强度可表示为

$$E_{\text{PM}}(t) = \cos[2\pi f_c t + \Delta\varphi(t)] = \cos[2\pi f_c t + k_p V \cos(2\pi f_{\text{RF}} t)] \quad (2)$$

式中,  $\Delta\varphi(t)$  为 PM 引入的相移,  $f_c$  为光载波的中心频率,  $k_p$  为 PM 的调制指数,  $V$  为 RF 信号的幅值,  $f_{\text{RF}}$  为 RF 信号的频率. 将公式(2)进行贝塞尔展开, 化简后可得到

$$E_{\text{PM}}(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(k_p V) \cdot \cos\left[2\pi(f_c + n f_{\text{RF}})t + \frac{n\pi}{2}\right] \quad (3)$$

式中,  $J_n(k_p V)$  为第一类  $n$  阶贝塞尔函数, 这里简称为  $J_n$ . 从公式(3)可以看出, 输入光载波经 RF 信号调制后产生了许多边带, 由于本文使用的调制信号为小功率信号, 因而可以忽略高阶项, 只保留展开式中的零阶项和正负一阶项, 则式(3)可展开为

$$E_{\text{PM}}(t) = J_0 \cos(2\pi f_c t) + J_1 \cos\left[2\pi(f_c + f_{\text{RF}})t + \frac{1}{2}\pi\right] + J_{-1} \cos\left[2\pi(f_c - f_{\text{RF}})t - \frac{\pi}{2}\right] \quad (4)$$

在 PM 后加一段 SMF, 可使信号间的相位得到部分或全部反转, 再用 PD 拍频即可获得 RF 信号, 实现信号从 PM-IM 的转换. 根据以上分析可知, 从 SMF 输出的信号可表示为

$$E_{\text{out}}(t) = J_0 \cos(2\pi f_c t + \varphi_0) + J_1 \cos\left[2\pi(f_c + f_{\text{RF}})t + \frac{\pi}{2} + \varphi_1\right] - J_1 \cos\left[2\pi(f_c - f_{\text{RF}})t - \frac{\pi}{2} + \varphi_2\right] \quad (5)$$

式中,  $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$  分别对应频率为  $f_c, f_c + f_{\text{RF}}, f_c - f_{\text{RF}}$  的光载波在 SMF 中传输相同的距离后由于光纤的色散效应而引入的相位漂移量. 经光电探测器检测出的 RF 信号可表示为

$$E_{\text{RF}}(t) = E_{\text{out}}(t) \cdot E_{\text{out}}^*(t) \quad (6)$$

将不同频率引入的相移用泰勒级数展开后把式(5)带入式(6)中, 化简后得到 PD 输出端所检测到的 RF 信号, 即

$$E_{\text{RF}}(t) = \cos\left(\frac{\pi D L \lambda_0^2 f_{\text{RF}}^2}{c} + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \cos(2\pi f_{\text{RF}} t + \theta) \quad (7)$$

式中  $D$  为光纤的色散系数,  $L$  为 SMF 的长度,  $\lambda_0$  为光载波的中心波长,  $c$  为真空中的光速,  $\theta$  为 PD 输出端 RF 信号的相位.

以上分析的是输入光载波为单一频率时的情形, 本文所使用的光源含有多个波长, 假设 Sagnac 环切割宽带光源后得到的光源含有  $M$  个波长, 则经过上述一系列处理以后, 最终在 PD 输出端检测到的 RF 信号可表示为

$$E_{\text{RF}}(t) \propto \sum_{m=1}^M \cos\left(\frac{\pi D_m L \lambda_m^2 f_{\text{RF}}^2}{c} + \frac{\pi}{2}\right) P_m \cos(2\pi f_{\text{RF}} t + \theta_m) \quad (8)$$

式中,  $D_m$  为第  $m$  路光载波经过色散器件时的色散系数,  $\lambda_m$  为其波长,  $P_m$  为其功率,  $\theta_m$  为 RF 信号在光纤中传输时由于光纤色散而产生的相位延迟. 在小信号调

制的条件下, 当两个相邻光载波之间的波长间隔  $\Delta\lambda$  很小时, 式(8)可以表示为

$$E_{\text{RF}}(t) \propto \cos\left(\frac{\pi \bar{D}_m L \bar{\lambda}_m^2 f_{\text{RF}}^2}{c} + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sum_{m=1}^M P_m \cos[2\pi f_{\text{RF}} t + \theta_1 + 2\pi f_{\text{RF}}(m-1)T] \quad (9)$$

式中,  $\bar{D}_m L$  为第  $m$  路光载波经过色散器件后的平均累积色散,  $\bar{\lambda}_m$  为  $m$  路光载波的平均波长,  $T = \bar{D}_m L \Delta\lambda$ , 为相邻两个光载波之间的基本延迟时间,  $\Delta\lambda$  为相邻两个光载波之间的波长间隔. 考虑到填充液体占空比的影响, Sagnac 环切割宽带光源后产生的多波长光源的波长间隔可表示为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{n_1 \cdot L_1 + n_2 \cdot L_2} \quad (10)$$

式中,  $\lambda$  为输入光的中心波长,  $n_1$  为填充液体的 PCF 双折射率,  $L_1$  为填充液体的 PCF 长度;  $n_2$  为未填充液体的 PCF 双折射率,  $L_2$  为未填充液体的 PCF 长度. 因此改变填充液体的温度, 使 PCF 双折射率  $n_1$  发生变化时,  $\Delta\lambda$  也会随之变化. 将公式(9)的左右两端分别进行傅里叶变换, 得到该 MPF 的频率响应函数为

$$H(f_{\text{RF}}) \propto \underbrace{\cos\left(\frac{\pi \bar{D}_m L \bar{\lambda}_m^2 f_{\text{RF}}^2}{c} + \frac{\pi}{2}\right)}_{H_1(f_{\text{RF}})} \cdot \underbrace{\sum_{m=1}^M P_m \exp[j2\pi f_{\text{RF}}(m-1)T]}_{H_2(f_{\text{RF}})} \quad (11)$$

式中,  $H_1(f_{\text{RF}})$  是由相位调制和光纤的色散引入的频率响应;  $H_2(f_{\text{RF}})$  是典型的周期性 MPF 的频率响应函数, 其自由频谱范围(Free Spectrum Range, FSR)为

$$\text{FSR} = \frac{1}{T} = \frac{1}{D \cdot L \cdot \Delta\lambda} \quad (12)$$

式中,  $T$  是由 SMF 的色散引入的延迟, 其与 FSR 成倒数关系,  $D$  是 SMF 的色散系数,  $L$  是 SMF 的长度,  $\Delta\lambda$  是相邻两路光载波之间的波长间隔. 由此可见,  $\Delta\lambda$  的变化会影响 FSR 的变化, 而 FSR 的值就是滤波器第一个通带中心频率的位置, 本文利用此方法实现了滤波器通带中心频率的连续可调.

## 2 仿真结果及分析

根据式(11)推导的传输函数对所提出的 MPF 进行仿真. 首先对 Sagnac 环中的 PCF 进行填充, 填充其中心的一个大孔, 如图 3. 选用的填充液体是 Cargille 实验室生产的型号为 Cat. 19340 的温敏液体, 该液体在室温下的折射率为 1.5143, 温度系数为  $-0.000393 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . 通过 COMSOL 软件对 PCF 的填充过程及所得到的结果进行仿真分析, 所得填充液体的温度与 PCF 双折射率之间的关系如图 4.

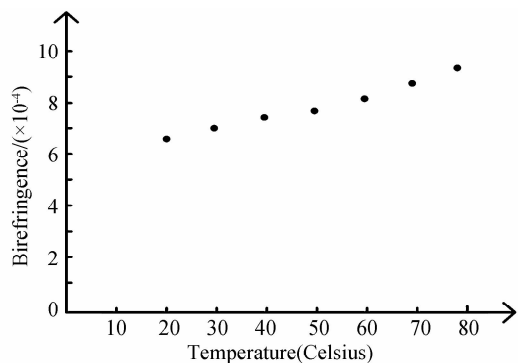


图4 填充液体的温度与 PCF 双折射率的关系

Fig. 4 The relationship between the birefringence of PCF and the padding liquid's temperature

从图4可知,PCF的双折射率随着填充液体温度的升高而增大,当温度从 $20^{\circ}\text{C}$ 升高到 $80^{\circ}\text{C}$ 时,PCF的双折射率相应的从 $6.7 \times 10^{-4}$ 增大到 $9.3 \times 10^{-4}$ .本文所选用的PCF以 $\text{SiO}_2$ 为基底材料,考虑到当温度升高时,光纤材料和空气本身可能对PCF的双折射率产生影响,通过COMSOL软件对此过程进行仿真,所得当温度变化时光纤材料和空气对PCF双折射率的影响如图5所示.

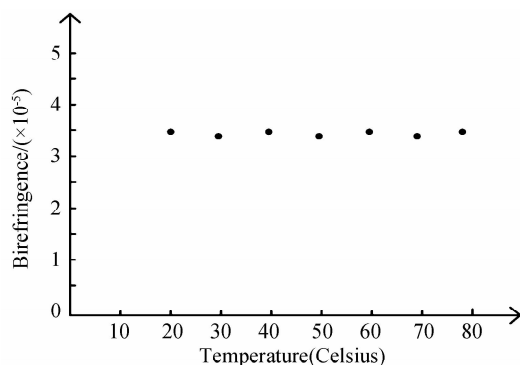


图5 温度变化时光纤材料和空气对 PCF 双折射率的影响

Fig. 5 The effect from fiber material and air to the birefringence of PCF when temperature changes

由图5可知,考虑到光纤材料和空气的影响,当温度从 $20^{\circ}\text{C}$ 升高到 $80^{\circ}\text{C}$ 时,PCF的双折射率约为 $3.5 \times 10^{-5}$ ,相比填充温敏液体后 $6.7 \times 10^{-4} \sim 9.3 \times 10^{-4}$ 的PCF双折射率而言,光纤材料和空气对PCF双折射率的影响要小一个量级,可以忽略不计.结合式(10),分析了当填充液体的占空比最大,即PCF的填充长度为5m时,双折射率与多波长光源的波长间隔之间的关系,如图6.

从图6可知,当PCF的填充长度为5m时,波长间隔随着PCF双折射率的增大而减小.结合图4和图6可知,当调节填充液体的温度( $20 \sim 80^{\circ}\text{C}$ ),使PCF的双折射率从 $6.7 \times 10^{-4}$ 变化到 $9.3 \times 10^{-4}$ 时,波长间隔相应的从 $0.72 \text{ nm}$ 变化到了 $0.52 \text{ nm}$ ,较好的符合了MPF光源所需波长间隔的要求.

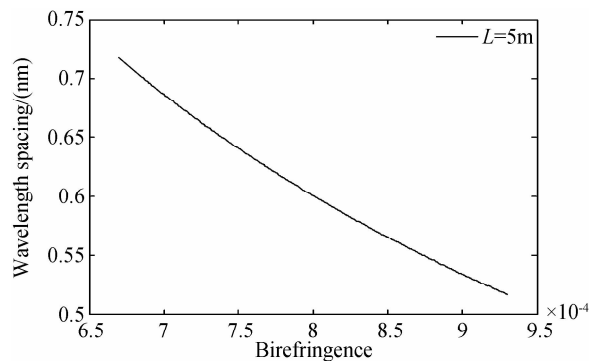


图6 PCF的填充长度为5m时多波长光源的波长间隔和PCF双折射率的关系

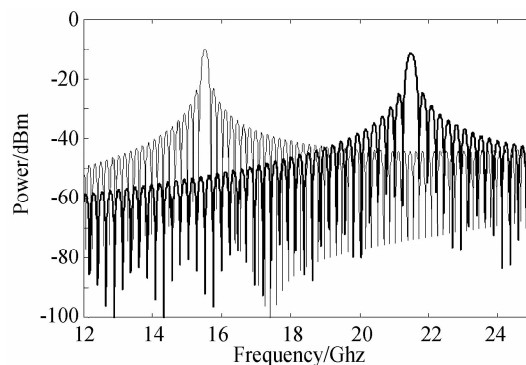
Fig. 6 The relationship between the birefringence of PCF and wavelength spacing of the multi-wavelength light source when the filling length of PCF is 5m  
结合式(11)可以得出该MPF的响应谱,如图7.

图7 MPF的响应谱

Fig. 7 The response spectrum of the MPF

由分析可知,当PCF中填充液体的温度为 $20^{\circ}\text{C}$ 时,对应的双折射率为 $6.7 \times 10^{-4}$ ,相应的多波长光源的波长间隔为 $0.72 \text{ nm}$ ,结合式(12)和图7可知,此时滤波器的通带中心频率为 $15.5 \text{ GHz}$ ,主旁瓣抑制比约为 $15 \text{ dB}$ ;当填充液体的温度增加到 $80^{\circ}\text{C}$ 时,对应的双折射率为 $9.3 \times 10^{-4}$ ,相应的多波长光源的波长间隔为 $0.52 \text{ nm}$ ,此时滤波器的通带中心频率变为 $21.5 \text{ GHz}$ ,主旁瓣抑制比约为 $14 \text{ dB}$ .综上所述,该MPF的中心频率可从 $15.5 \text{ GHz}$ 调到 $21.5 \text{ GHz}$ ,且在此范围内是连续可调的.

为了更直观地描述波长间隔与MPF通带中心频率、PCF双折射率之间的关系,选取填充长度为5m的PCF,对以上三个参量进行了相应的仿真分析,结果如图8.

由图8可知,MPF的通带中心频率随着波长间隔的增大而减小,随着PCF双折射率的增大而增大.当调节PCF中填充液体的温度(从 $20 \sim 80^{\circ}\text{C}$ )时,PCF的双折射率可从 $6.7 \times 10^{-4}$ 调到 $9.3 \times 10^{-4}$ ,相应的波长间隔可从 $0.72 \text{ nm}$ 连续调到 $0.52 \text{ nm}$ ,通带中心频率可从 $15.5 \text{ GHz}$ 连续的调到 $21.5 \text{ GHz}$ .

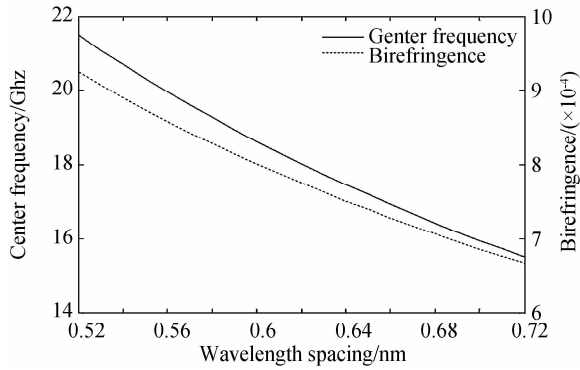


图8 通带中心频率与波长间隔、PCF 双折射率之间的关系

Fig. 8 The relationship between center frequency of the passband, the birefringence of PCF and wavelength spacing of the multi-wavelength light source

考虑到实际操作中,填充液体的长度有限,为此分析了填充液体的占空比对 Sagnac 环的波长间隔和滤波器通带中心频率的影响.结合式(10)和(12)可以得出当温度在 20℃、80℃时,PCF 中填充液体的占空比对 Sagnac 环波长间隔和滤波器通带中心频率的影响,如表 1 和表 2.由表可知,当温度一定时,波长间隔随着填充液体占空比的增大而减小,滤波器中心频率随着占空比的增大而增大;中心频率的调谐范围随着占空比的增大而增大,当占空比为 0.1 时,中心频率的调谐范围为 600MHz;当占空比为 1 时,中心频率的调谐范围为 5.97GHz.在占空比相同的情况下,波长间隔随着温度的升高而减小,滤波器中心频率随着温度升高而增大.所以在实际操作中,占空比越大,Sagnac 环的波长间隔越小,滤波器的调谐范围越大.

表 1 温度为 20℃ 时占空比与波长间隔和滤波器中心频率的关系

Table 1 The relationship between the duty ratio, wavelength spacing and filter's center frequency when the temperature is 20℃

Duty ratio	Wavelength spacing/nm	Center frequency/GHz
0.1	4.88	2.29
0.2	2.97	3.76
0.3	2.13	5.25
0.4	1.66	6.73
0.5	1.36	8.22
0.6	1.16	9.63
0.7	1.00	11.17
0.8	0.88	12.69
0.9	0.79	14.14
1	0.72	15.51

表 2 温度为 80℃ 时占空比与波长间隔和滤波器中心频率的关系

Table 2 The relationship between the duty ratio, wavelength spacing and filter's center frequency when the temperature is 80℃

Duty ratio	Wavelength spacing/nm	Center frequency/GHz
0.1	3.86	2.89
0.2	2.25	4.97
0.3	1.58	7.07
0.4	1.22	9.16
0.5	1.00	11.17
0.6	0.84	13.30
0.7	0.73	15.31
0.8	0.64	17.46
0.9	0.57	19.60
1	0.52	21.48

### 3 结论

本文提出并仿真验证了一种光子晶体光纤 Sagnac 环切割宽带光源的中心频率连续可调的 MPF. 通过向 PCF 中填充温敏液体 (Cat. 19340) 并改变其温度来实现 PCF 双折射率的可调,从而实现 Sagnac 环切割宽带光源后产生的多波长光源的波长间隔连续可调,进而实现了滤波器通带中心频率的连续可调. 分析了不同占空比对 Sagnac 环波长间隔和滤波器通带中心频率调谐范围的影响,测得占空比越大,Sagnac 环的波长间隔越小,滤波器通带中心频率的调谐范围越大. 在占空比最大的情况下测得当温度从 20℃ 变化到 80℃ 时,PCF 的双折射率相应的从  $6.7 \times 10^{-4}$  变化到  $9.3 \times 10^{-4}$ ,多波长光源的波长间隔相应的从 0.72 nm 变化到 0.52 nm,MPF 的通带中心频率相应的从 15.5GHz 调到了 21.5GHz,且是连续可调的.

#### 参考文献

- [1] WANG Wei, YNG Li-jun. Design of silicon-on-insulator ultra-small micro-ring resonator microwave photonics phase shifter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(6): 631-636.  
王巍, 杨丽君. 基于绝缘硅超小微环谐振器的微波光子相移器设计[J]. *光子学报*, 2013, **42**(6): 631-636.
- [2] CAPMANY J, ORTEGA B, PASTOR D. A tutorial on microwave photonic filters [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(1): 201-229.
- [3] MINASIAN R A. Photonic signal processing of microwave signals[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, **54**(2): 832-846.
- [4] XUE Xiao-xiao, ZHENG Xiao-ping, ZHANG Han-yi, et al. Widely tunable single-bandpass microwave photonic filter employing a non-sliced broadband optical source[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(19): 18423-18429.

- [5] XUE Xiao-xiao, ZHENG Xiao-ping, ZHANG Han-yi, *et al.* Highly reconfigurable microwave photonic single bandpass filter with complex continuous time impulse responses[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(24): 26929-26934.
- [6] XU En-ming, WANG Fei, LI Pei-li. Switchable and tunable microwave photonic filter based on reflective semiconductor optic amplifier [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, **56**(1): 198-201.
- [7] LI Zhen, CHEN Zhe, HSIAO V K S, *et al.* Optically tunable chirped fiber Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(10): 10827-10832.
- [8] ZHANG Z X, YE Z Q, SANG M H, *et al.* Nonlinear-polarization-rotation based multi-wavelength erbium-doped fiber lasers with highly nonlinear fiber[J]. *Laser Physics*, 2011, **21**(10): 1820-1824.
- [9] ZHOU Jun-qiang, FU Song-nian, LUAN Feng, *et al.* Tunable multi-tap bandpass microwave photonic filter using a windowed Fabry-Pérot filter-based multi-wavelength tunable laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(22): 3381-3386.
- [10] ZHANG Ya-mei, PAN Shi-long. Complex Coefficient Microwave Photonic Filter Using a Polarization-Modulator-Based Phase Shifter [J]. *Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(2):187-189.
- [11] SUN Guo-yong, ZHOU Ying-wu, HU Yi-hui, *et al.* Broadly tunable fiber laser based on merged Sagnac and intermodal interferences in few-mode high-birefringence fiber loop mirror [J]. *Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(11): 766-768.
- [12] JAVIER A, ANTONIO D, JOSE L, *et al.* Continuously tunable microwave photonic filter using a multi-wavelength fiber laser[J]. *Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(23): 2129-2131.
- [13] ZHANG Jie-jun, GAO Liang, YAO Jian-ping. Tunable optoelectronic oscillator incorporating a single passband microwave photonic filter[J]. *Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(4): 326-329.
- [14] HANSEN K, IMAM H. Photonic crystal fiber[J]. *Optik & Photonik*, 2010, **5**(2):37-41.
- [15] SHENG Yong, LU Ju, YAO Gao-feng, *et al.* Analysis of high birefringent and confinement loss of elliptical air-holes rectangular photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(S1): 0106008.  
盛勇, 陆驹, 姚高峰, 等. 椭圆空气孔矩形结构光子晶体光纤的高双折射及限制损耗分析[J]. 光子学报, 2014, **43**(S1): 0106008.
- [16] JIANG Ling-hong, ZHENG Yi, ZHENG Kai, *et al.* Investigation of a liquid-core photonic crystal fiber with high birefringence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0906003.  
姜凌红, 郑义, 郑凯, 等. 液芯高双折射率光子晶体光纤的特性研究[J]. 光子学报, 2014, **43**(9): 0906003.