

文章编号: 1001-3806(2015)06-0824-05

## 基于拉锥光纤优化的光纤环镜滤波器特性研究

吴雪梅,董兴法\*,姜 莉,吕正兵

(苏州科技学院 电子与信息工程学院,苏州 215011)

**摘要:** 为了将拉锥光纤的光学特性和光纤环镜的滤波特性相结合,提出了一种用拉锥光纤优化的光纤环镜滤波器结构。实验研究发现,在级联的 2 阶高双折射光纤环镜滤波器中接入拉锥光纤,滤波器输出谱的主峰 3dB 带宽得到显著压缩,品质因数进一步提高,其  $Q$  值很容易达到 5.2,滤波器在 10dB ~ 35dB 调制深度范围内调谐更灵活,输出波形更加稳定。结果表明,该结构改善了高双折射光纤环镜滤波器特性,使调谐更为灵活。

**关键词:** 光纤光学;滤波器;拉锥光纤;光纤环镜;级联

**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.06.020

### Study on characteristics of fiber loop mirror filters based on tapered fiber optimization

WU Xuemei, DONG Xingfa, JIANG Li, LÜ Zhengbing

(College of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

**Abstract:** Combining the optical properties of tapered fiber with the filtering characteristics of fiber loop mirrors, an optical loop mirror filter structure was put forward based on tapered fiber optimization. The study shows that after adding tapered fiber into cascaded second-order high-birefringence fiber (HBF) loop mirrors, 3dB bandwidth of main peak of filter output spectrum is significantly compressed. Quality factor is further improved and can reach about 5.2 easily. The study also shows that after adding tapered fiber into cascaded second-order HBF loop mirrors, tuning is more flexible in the modulation depth range from 10dB to 35dB and the output waveform becomes more stable. The filtering characteristics of HBF loop mirror were improved, and the filter is tunable more flexibly.

**Key words:** fiber optics; filter; tapered fiber; fiber loop mirror; cascaded

## 引 言

光纤环镜滤波器(fiber loop mirror, FLM)是光学滤波器<sup>[1-5]</sup>的一种,其主要滤波原理是将一束激光经耦合器分成两束,分别沿顺时针和逆时针方向在环镜内传播,之后于耦合器处相遇产生叠加干涉效应,输出相干光,实现滤波效应。与其它滤波器相比,FLM 结构简单、稳定性高、设计灵活、成本低等<sup>[6-8]</sup>,这些优点使其得到广泛的应用<sup>[9-13]</sup>。目前成为广大学者研究新热点之一的拉锥光纤,由于其独特的几何结构特性,从而引发了一系列光学性质的变化,因此其研究和应用领域也非常广泛<sup>[14-16]</sup>。

本文中提出一种在级联 2 阶高双折射光纤环镜

基金项目:江苏省青蓝工程中青年学术带头人资助项目(2010-101)

作者简介:吴雪梅(1989-),女,硕士研究生,主要从事光电信息处理方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail:dongxfa@mail.usts.edu.cn

收稿日期:2014-10-04;收到修改稿日期:2014-12-18

(high-birefringence fiber loop mirror, HBFLM)中加拉锥光纤的新型结构,新的滤波器结构与两个级联 2 阶 HBFLM 结构相比,压窄了 3dB 带宽,提高了品质因数,波形更稳定、可调范围广、灵活性能强。

## 1 结构原理与分析

### 1.1 级联 2 阶 HBFLM 滤波器

2 阶 HBFLM 滤波器<sup>[7]</sup>结构示意图如图 1 所示。它由 1 个 3dB 耦合器(optical fiber coupler, OC)、2 段高双折射光纤(high-birefringence fiber, HBF)、1 个偏振控制器(polarization controller, PC)和普通单模光纤(single mode fiber, SMF)组成。滤波器透过率函数为:

$$T = \left[ \cos \frac{(\beta_1 + \beta_2)\lambda}{2} \sin(\theta_1 + \theta_3) \cos\theta_2 + \cos \frac{(\beta_1 - \beta_2)\lambda}{2} \cos(\theta_1 + \theta_3) \sin\theta_2 \right]^2 \quad (1)$$

式中, $\theta$  表示信号光在经过两段 HBF 之间的 SMF 和 PC 时偏振态转过的角度, $\lambda$  为信号光波长, $\beta = 2\pi L\Delta n/\lambda_0^2$ ,是对  $2\pi L\Delta n/\lambda$  做的 1 阶近似,可认为  $\beta$

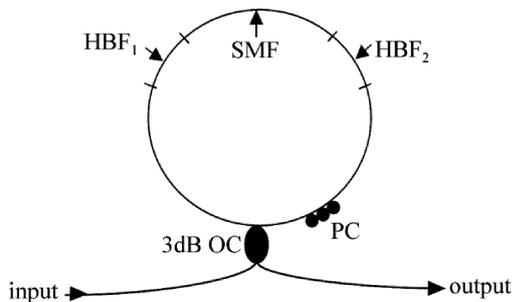


Fig. 1 Schematic configuration of second-order HBF Sagnac-loop mirror

不随  $\lambda$  的改变而改变,其中  $L$  是 HBF 的长度,  $\Delta n$  是 HBF 快轴和慢轴折射率之差。

级联 1 阶 HBFLM 滤波器<sup>[16]</sup>结构示意图如图 2 所示。它由 2 个 3dB 耦合器 (OC)、2 段高双折射光纤 (HBF)、2 个偏振控制器 (PC) 和普通单模光纤 (SMF) 组成。滤波器透过率函数为:

$$T = \frac{t_1 t_2}{1 - r_1 r_2} = \frac{t_1 t_2}{t_1 + t_2 - t_1 t_2} = \left( \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} - 1 \right)^{-1} \approx t_1 t_2 \quad (2)$$

式中,  $t_1$  和  $t_2$ ,  $r_1$  和  $r_2$  分别表示图 2 中两个环镜的透射率和反射率。

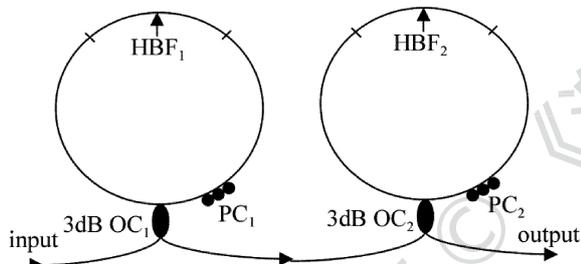


Fig. 2 Schematic configuration of two cascaded HBF Sagnac-loop mirrors

级联 2 阶 HBFLM 滤波器结构示意图如图 3 所示。它由 2 个 3dB 耦合器 (OC)、4 段高双折射光纤 (HBF)、2 个偏振控制器 (PC) 和普通单模光纤 (SMF) 连接而成。其透过率函数同(2)式,其中:

$$t_1 = \left[ \cos \frac{(\beta_1 + \beta_2)\lambda}{2} \sin(\theta_1 + \theta_3) \cos\theta_2 + \cos \frac{(\beta_1 - \beta_2)\lambda}{2} \cos(\theta_1 + \theta_3) \sin\theta_2 \right]^2 = \left[ C_1 \cos \frac{(\beta_1 + \beta_2)\lambda}{2} + C_2 \cos \frac{(\beta_1 - \beta_2)\lambda}{2} \right]^2 \quad (3)$$

$$t_2 = \left[ \cos \frac{(\beta_3 + \beta_4)\lambda}{2} \sin(\theta_4 + \theta_6) \cos\theta_5 + \cos \frac{(\beta_3 - \beta_4)\lambda}{2} \cos(\theta_4 + \theta_6) \sin\theta_5 \right]^2 = \left[ C_3 \cos \frac{(\beta_3 + \beta_4)\lambda}{2} + C_4 \cos \frac{(\beta_3 - \beta_4)\lambda}{2} \right]^2 \quad (4)$$

$$T = \left[ C_1 \cos \frac{(\beta_1 + \beta_2)\lambda}{2} + C_2 \cos \frac{(\beta_1 - \beta_2)\lambda}{2} \right]^2 \cdot \left[ C_3 \cos \frac{(\beta_3 + \beta_4)\lambda}{2} + C_4 \cos \frac{(\beta_3 - \beta_4)\lambda}{2} \right]^2$$

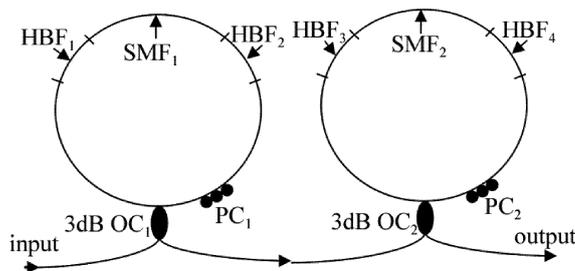


Fig. 3 Schematic configuration of two cascaded second-order HBF Sagnac-loop mirrors

$$\left[ C_3 \cos \frac{(\beta_3 + \beta_4)\lambda}{2} + C_4 \cos \frac{(\beta_3 - \beta_4)\lambda}{2} \right]^2 \quad (5)$$

当 4 段 HBF 长度一样、 $\Delta n$  一样时,则  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta$ ,令  $x = \lambda/2$ , (5) 式可化简为:

$$T = [C_1 \cos(2\beta x) + C_2]^2 [C_3 \cos(2\beta x) + C_4]^2 = [A_1 \cos^2(2\beta x) + A_2 \cos(2\beta x) + A_3]^2 \quad (6)$$

式中,  $A_1, A_2, A_3, C_1, C_2, C_3$  和  $C_4$  均为常数,由  $\theta$  决定。由(6)式可知,此透射光谱是以  $\pi/\beta$  为周期的类似于一系列余弦函数的乘积。

## 1.2 拉锥光纤光纤

1.2.1 拉锥光纤的结构 常见的锥形光纤的加工方法有化学腐蚀法、研磨法和熔拉法。腐蚀法是将裸光纤的包层用化学试剂腐蚀掉,此方法形成的锥形光纤难以形成一致性工艺,且损耗大、热稳定性差;研磨法是用化学研磨、抛光的方法去掉包层,此方法形成的锥形光纤易断、热稳定性差;熔拉法首先是将光纤涂覆层剥去一小段长度,用酒精将去除涂覆层部分擦拭干净,然后将剥去涂覆层部分的光纤加热至熔融状态,同时在光纤两端沿光纤轴向施加拉力,使加热区包层和纤芯逐渐变细,从而形成对称的双锥形结构。此方法优于前两种方法,所以熔拉法制作的拉锥光纤应用更为广泛。本文中所研究的光纤指熔拉法制成的拉锥光纤。图 4 为单模拉锥光纤结构模式图,横坐标  $z$  表示拉锥光纤锥区长度,纵坐标  $a$  表示光纤半径。光纤锥区纤芯半径表达式为:

$$a = 0.5(r_1 + r_2) - 0.5(r_1 - r_2) \frac{\tanh[v(z - l/4)]}{\tanh(vl/4)} \quad (7)$$

式中,  $l$  为熔锥区长度,  $r_1, r_2$  分别为锥区腰部始端和中部的纤芯半径,  $v$  为电机拉锥速率。当加热时间、火焰温度、加热时的火焰位置一定时,锥区长度与电机拉锥

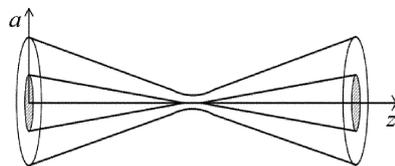


Fig. 4 Schematic configuration of SMF tapered fiber

速率关系式为  $l = \alpha v$ , 其中  $\alpha$  为一常数。由 (7) 式可知, 在其它条件一定时, 拉锥速率越大, 纤芯半径变化越大。因此, 可以通过控制拉锥光纤的速率拉制出不同的锥区锥度。

1.2.2 拉锥光纤的光学特性 模式是信号光在光纤中的传播方式, 模式的多少取决于光纤的结构参量<sup>[14]</sup>, 即归一化频率  $\nu$ , 其表达式为:

$$\nu = (2\pi a/\lambda) \times (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (8)$$

式中,  $\lambda$  表示真空中的光波长, 在纤芯中,  $n_1$  表示纤芯折射率,  $n_2$  表示包层折射率,  $a$  表示  $z$  值处的纤芯半径, 由 (8) 式可知, 在纤芯中  $n_1, n_2$  不变, 当  $\lambda$  一定时,  $\nu$  与  $a$  成线性关系。

另一方面, 光功率在光纤中的分配又与模场半径相关, 其表达式为:

$$\frac{P_c}{P} = 1 - \exp\left(\frac{-2a^2}{w^2}\right) \quad (9)$$

式中,  $P_c$  表示纤芯光功率,  $P$  表示纤芯光功率和包层光功率之和,  $w$  表示模场半径。模场半径与归一化频率  $\nu$  有关, 其表达式为:

$$w/a = 0.65 + 1.619\nu^{-3/2} + 2.879\nu^{-6} \quad (10)$$

将 (10) 式代入 (9) 式可得光功率在纤芯和包层的分配与归一化频率  $\nu$  的关系式:

$$\frac{P_c}{P} = 1 - \exp\left[\frac{-2}{(0.65 + 1.619\nu^{-3/2} + 2.879\nu^{-6})^2}\right] \quad (11)$$

其对应的光功率在光纤的分布如图 5 所示。横坐标表示归一化  $\nu$  值的大小, 纵坐标表示芯层输出的光功率  $P_c$  占输出总光功率  $P$  的比值。由图 5 可知,  $\nu$  的减小会导致光功率在纤芯中的分配比例减少, 在包层中的分配比例增大。因此在锥形光纤中, 由于越靠近锥腰, 纤芯半径  $a$  越小,  $\nu$  值也跟着变小, 光波从一开始主要以纤芯模传播逐渐变为部分转化成包层模传播, 出现锥区光功率渗透到包层中的现象, 基于锥形光纤这一光学特性可以制成许多光纤器件。同时, 锥形光纤还有滤波特性, 信号光最初以基模形式在纤芯中

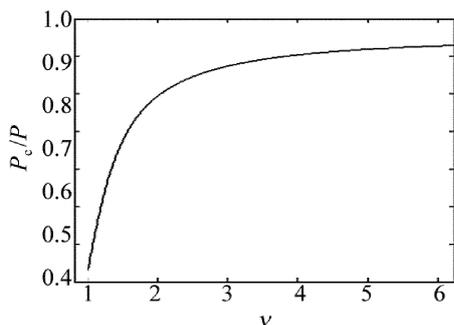


Fig. 5 Power distribution of fiber

传播, 经过锥区时会有部分基模能量耦合到包层中以高阶模形式传输, 在纤芯中传播的光与在包层中传播的光由于所处的环境不同 (不同的折射率环境, 不同的边界条件), 使得两路光产生相位差, 最终耦合叠加时会产生干涉滤波效应。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 锥形光纤的制作

实验中选用东捷光电 0.25 单模裸光纤 G652D, 其包层直径为  $124.8\mu\text{m}$ , 纤芯直径为  $9.2\mu\text{m}$ 。应用全自动光纤拉锥机, 使用火焰加热方法将光纤拉锥。实验时首先剥去光纤的包层约 2cm 长度, 打开氢气发生器、拉锥机和控制拉锥机的计算机。调试并设置好拉锥机各参量, 然后将要拉锥的单模光纤固定在光纤两个夹具上, 将剥去包层的部分放在两夹具中间。两端的夹具上各加一小段单模光纤以确保夹紧所需拉锥的光纤, 然后进行拉锥。拉锥光纤在显微镜下的拍摄图如图 6 所示, 图 6a 为锥区束腰处, 图 6b 为去涂覆层光纤未拉锥区, 通过显微镜测量得到实验拉制的锥形光纤的锥区长度约为  $8.2\text{mm}$ , 束腰直径约为  $40\mu\text{m}$ 。锥区长度远大于束腰直径, 所以属于缓锥度光纤工作模式。

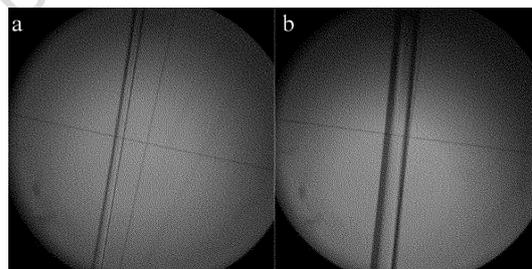


Fig. 6 Micrograph of tapered fiber  
a—waist region b—untapered region

### 2.2 锥形光纤对环境滤波器滤波特性的影响

图 7 是拉锥光纤优化级联 2 阶 HBF 滤波器结构示意图, 它由 2 个 3dB 耦合器、4 段高双折射光纤 (HBF)、2 个拉锥光纤、2 个偏振控制器 (PC) 和普通单模光纤 (SMF) 连成。

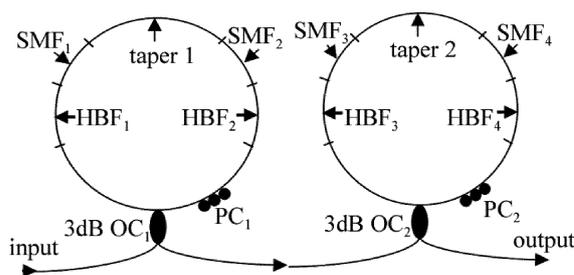


Fig. 7 Schematic configuration of two cascaded second-order HBF Sagnac-loop mirrors with tapered fiber

为了研究接入拉锥光纤的光纤环境滤波器特性, 做了一组对比实验, 图 3 和图 7 分别为接入拉锥光纤

前后的级联 2 阶 HBFLM 滤波器结构。先后将这两种结构的装置的输入端接入宽带光源 (broadband source, BBS) 作为入射光, 环境的输出端接入光谱仪 (optical spectrum analyzer, OSA)。实验中选用 Agilent (86140B) 光谱分析仪, 实验时 HBF<sub>1</sub>, HBF<sub>2</sub>, HBF<sub>3</sub>, HBF<sub>4</sub>, SMF<sub>1</sub> 和 SMF<sub>2</sub> 长度均为 1.5m。

定义品质因数  $Q = \lambda_1 / \lambda_s$ , 其中  $\lambda_1$  为总透过光谱的周期,  $\lambda_s$  为总透过光谱单峰的 3dB 带宽。实验中得到接入拉锥光纤前后的级联 2 阶 HBFLM 滤波器透射光谱分别为图 8a 和图 8b。不含拉锥光纤时, 光谱周期  $\lambda_1 \approx 2.75\text{nm}$ , 主峰的 3dB 带宽  $\lambda_s \approx 1\text{nm}$ , 品质因子  $Q \approx 2.75$ , 调制深度约为 27dB; 含拉锥光纤时, 光谱周期  $\lambda_1 \approx 2.79\text{nm}$ , 主峰的 3dB 带宽  $\lambda_s \approx 0.54\text{nm}$ , 品质因子  $Q \approx 5.2$ , 调制深度约为 27dB。通过对比图 8a 和图 8b 可知, 接入拉锥光纤后, 3dB 带宽明显被压缩且品质因子提高, 从而改变了滤波器的选频范围。

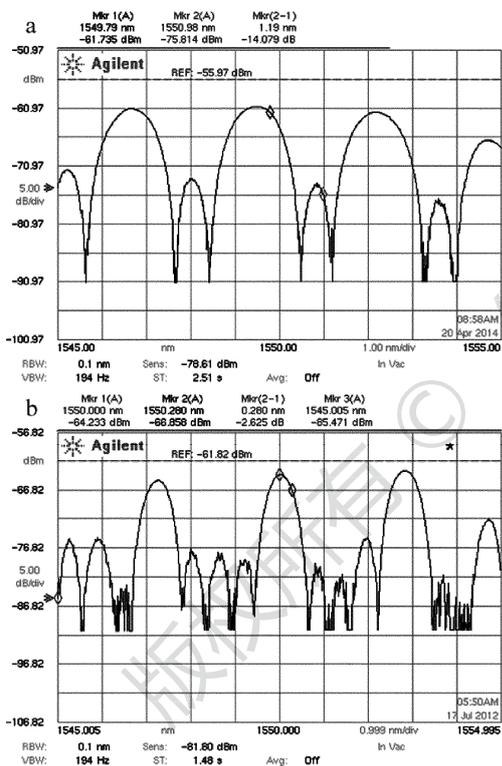


Fig. 8 Output spectrum of two cascaded second-order HBF Sagnac-loop mirrors with or without tapered fiber  
a—without tapered fiber b—with tapered fiber

实验中还得到接入拉锥光纤后级联 2 阶 HBFLM 滤波器透射谱可在 10dB ~ 35dB 范围内稳定连续可调, 如图 9 所示。图 9a 为最小调制深度约 10dB, 光谱周期  $\lambda_1 \approx 1.37\text{nm}$ , 主峰的 3dB 带宽  $\lambda_s \approx 0.68\text{nm}$ , 品质因数  $Q \approx 2.01$ ; 图 9b 为最大调制深度约 35dB, 光谱周期  $\lambda_1 \approx 2.75\text{nm}$ , 主峰的 3dB 带宽  $\lambda_s \approx 1.37\text{nm}$ , 品质因数  $Q \approx 2.0$ 。通过对比图 9a 和图 9b 可以看出, 最小调制深度时对应的滤波光谱周期为最大调制深度时的一

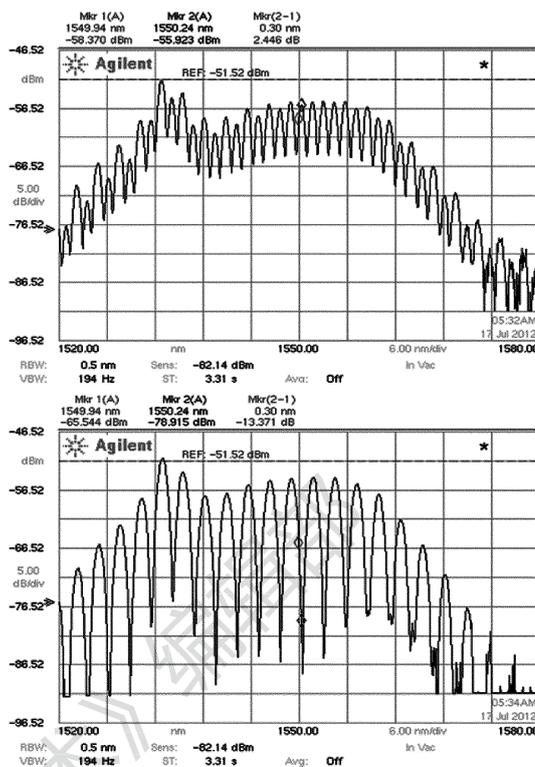


Fig. 9 Variation of output spectrum modulation depth of two cascaded second-order HBF Sagnac-loop mirrors with tapered fiber  
a—modulation depth of 10dB b—modulation depth of 35dB

半, 此时的光谱都为均匀的余弦滤波形式。锥区被引入光纤后, 会对在光纤中传播的模式产生显著影响, 入射光在经过锥区时, 随着纤芯半径  $a$  的减小, 光波从一开始主要以纤芯模传播逐渐变为部分转化成包层模传播, 在纤芯中传播的光与在包层中传播的光由于所处的环境不同使得两路光产生相位差, 最终在耦合叠加时会产生干涉滤波效应。本实验中将拉锥光纤接入环境后, 3dB 带宽得到了明显的压缩, 品质因子提高, 从而改变了滤波器的选频范围, 通过调节偏振控制器, 滤波器可在 10dB 至 35dB 调制深度范围灵活调制, 与不加锥形光纤相比, 输出波形更为稳定, 抗外界干扰能力增强。

### 3 小结

将拉锥光纤的光学特性和光纤环境的滤波特性相结合, 提出了在级联 2 阶 HBFLM 的结构中加拉锥光纤的新型结构, 该结构改善了高双折射光纤环境梳状滤波器特性: 滤波器输出谱的主峰 3dB 带宽得到显著压缩, 品质因数进一步提高, 其  $Q$  值很容易达到 5.2; 在 10dB ~ 35dB 调制深度范围内调谐更灵活, 输出波形更加稳定。

### 参 考 文 献

[1] FENG D Q, SHENG Q Q, CHEN K, et al. Character of several frequent filters[J]. Optical Communication Technology, 2001, 26(1):

- 46-53 (in Chinese).
- [2] WU G F. Several new tunable narrowband optical filters[J]. *Photon Technology*, 2006(2):64-68 (in Chinese).
- [3] LIU Z L, ZHANG W G, JANG M, *et al.* Configuration and development of fiber optical filter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(3):540-546 (in Chinese).
- [4] XI C L. Study on S+C+L ultra broadband light sources[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(6):822-824 (in Chinese).
- [5] LUO J, JIANG S, XIONG Y. Demodulation technique of fiber grating vibration sensor based on the edge filter method[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4):469-472 (in Chinese).
- [6] SHI N N, GU Y Y, HU J J, *et al.* Study of the tunable optical comb filter based on sagnac interferometer loop[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3):0306001 (in Chinese).
- [7] ZHOU G, ZHAO Q D, LIU Y G, *et al.* Filtering characteristics of fiber loop mirror filter composed of multi-stage high birefringent fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(3):341-345 (in Chinese).
- [8] DONG B, ZHAO Q D, HUANG G L, *et al.* Analysis of cascade filter characteristics with high birefringence fiber loop mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(7):1289-1293 (in Chinese).
- [9] MA X R, WU Z F, LIU Y G, *et al.* Polarization independent all fiber narrow bandpass comb filter[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(8):885-887 (in Chinese).
- [10] ZHAO Y, SONG T T, WANG Q, *et al.* Recent developments and applications of polarization-maintaining fiber loop mirrors[J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2012, 40(4):239-261.
- [11] LIU F, YE Q, PANG F F, *et al.* Application of fiber loop mirror in fiber communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(11):22-27 (in Chinese).
- [12] QIAO G R, CAO Z G, WANG R, *et al.* Theory and experiment of flat-top all-fiber comb filter based on two high birefringence fiber Sagnac loop filters[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(12):2836-2839.
- [13] WANG T S, MIAO X F, ZHOU X F, *et al.* Tunable multiwavelength fiber laser based on a double Sagnac HiBi fiber loop[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(10):C111-C116.
- [14] XUE C R, ZHU S X, XIAO Z G, *et al.* The study for transforming property of right cone fiber[J]. *Applied Optics*, 2004, 25(3):45-49 (in Chinese).
- [15] JING T, WANG Y F. Application of tapered fiber in sensor and fiber laser[J]. *Information Technology*, 2010(10):113-117 (in Chinese).
- [16] ZHOU Y W. Experimentally study on high-sensitivity fiber-optic refractometers based on mach-zehnder interference[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(7):841-844 (in Chinese).