

直接熔融塌陷光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪的折射率传感特性

毕卫红^{1,2} 申 远¹ 刘 强^{1,2} 付广伟^{1,2} 付兴虎^{1,2} 纪玉申¹

(¹ 燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004
² 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 研制了一种直接熔融塌陷锥形光子晶体光纤(PCF)马赫-曾德尔干涉仪(MZI)传感器,它是通过电弧放电的方法使光子晶体光纤空气孔受热塌陷,从而直接在光子晶体光纤上形成一个锥区制作而成的,可通过控制电弧参数以及放电次数来灵活控制锥区结构。研究了不同锥区长度下的输出光谱及其传输光谱随外界(RI)折射率的变化关系。实验结果表明,随着锥区长度的增加,在整个波长范围内 MZI 输出光谱的自由光谱区减小,且自由光谱区在 1554.34 nm 波长附近由 33.38 nm 减小到 7.86 nm。在 1.3414~1.3862 折射率变化范围内,该传感器的折射率测量灵敏度可达 276.38 nm/RIU(RIU 为折射率单位)。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 马赫-曾德尔干涉仪; 折射率传感

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0505008

Refractive Index Sensing Characteristics of a Mach-Zehnder Interferometer Based on Directly Photonic Crystal Fiber

Bi Weihong^{1,2} Shen Yuan¹ Liu Qiang^{1,2} Fu Guangwei^{1,2} Fu Xinghu^{1,2} Ji Yushen¹

(¹ School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)
(² Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract Based on a directly melting-collapsed tapered photonic crystal fiber (PCF), a novel Mach-Zehnder interferometer (MZI) sensor is proposed. The taper region is formed directly by arc discharge. By controlling the parameters and times of arc discharge, the taper geometry can be flexibly controlled. The output spectra under different taper lengths are discussed, and the relationship between the wavelength shifts and the refractive index(RI) is investigated. Experimental results show that with the increase of taper length, the free spectral range of MZI output spectrum decreases in the whole wavelength range, and decreases from 33.38 nm to 7.86 nm nearby 1554.34 nm. When the RI ranges from 1.3414 to 1.3862, the refractive index sensitivity of the sensor reaches 276.38 nm/RIU (RIU is refractive index unit).

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; Mach-Zehnder interferometer; refractive index sensing

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.5295

1 引 言

光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)由于其高分辨率、高测量精度、制作简单等特点,已在电流^[1]、应力^[2]、温度^[3]等领域得到了广泛应用。国内外学者已对光纤 MZI 的制作方法进行了大量的研究,如在

普通单模光纤(SMF)上引入锥区^[4-5]或通过纤芯错位熔接^[6]直接构成 MZI;还可利用双芯光纤构成 MZI^[2]。随着光子晶体光纤(PCF)的出现,其新颖的特性及灵活的设计结构,现已在光纤干涉仪及传感器的制作中得到了广泛的应用。

收稿日期: 2013-11-07; **收到修改稿日期**: 2013-12-16

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327801)、国家自然科学基金(61077067, 61205068)、河北省自然科学基金(F2011203116, F2012203148)、燕山大学博士基金项目(B768)

作者简介: 毕卫红(1960—),女,博士,教授,主要从事光纤传感与光电检测等方面的研究。E-mail: whbi@ysu.edu.cn

目前,基于 PCF 的光纤 MZI 结构类型主要包括以下几种:1) 基于 PCF 与 SMF 纤芯错位熔接和空气孔塌陷熔接构成的 MZI,如 Choi 等^[7]和唐昌平等^[8]分别利用上述 MZI 进行了应力和折射率传感实验,其应力和折射率灵敏度分别可达 $-2.16 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 和 $75.844 \text{ nm}/\text{RIU}$ (RIU 为折射率单位);2) 通过对 PCF 进行腐蚀成锥构成 MZI,如 Liu 等^[9]利用上述 MZI 进行折射率传感实验,灵敏度可达 $500 \text{ nm}/\text{RIU}$;3) 通过在 PCF 上写入两段长周期光栅构成 MZI,如 Shin 等^[10]通过在 PCF 上写入两段长周期光栅构成 MZI,这种结构 MZI 以两光栅之间的 PCF 包层与纤芯作为 MZI 干涉臂;4) 利用双芯 PCF 制作 MZI,如 Kim 等^[11]利用上述 MZI 进行应力实验,灵敏度为 $-1.8 \text{ pm}/\mu\epsilon$;5) 通过将 PCF 熔融拉锥构成 MZI,如 Rajan 等^[12]在锥区涂覆上液晶材料后利用上述 MZI 进行了温度传感实验,灵敏度为 $0.08 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。上述基于 PCF 的 MZI 传感器具有灵敏度高、结构简单等优点,能够实现温度、应力、折射率等参量的检测,因此,本文提出了一种基于双锥 PCF 的 MZI 传感器的制作方法,即通过电弧放电的方法直接在 PCF 上形成锥区。主要研究了输出干涉谱随锥区长度的变化,以及其对外界环境折射率(RI)的响应特性。实验结果表明:该传感器在 $1.3414\sim 1.3862$ 折射率变化范围内具有较高的灵敏度和较好的重复性,且随着锥区长度的增加,MZI 折射率灵敏度明显增加,可达 $276.38 \text{ nm}/\text{RIU}$ 。

2 基本原理

2.1 直接熔融塌陷光子晶体光纤 MZI 传感器结构及干涉原理

在制作过程中,首先在 PCF 的两端分别熔接上一段 SMF,然后将熔接好的光纤两端绷直固定在夹具上,再利用电弧对 PCF 进行放电。PCF 空气孔受到电弧放电的影响,会产生不均匀的受热塌陷,最终在 PCF 上形成一个锥区,形成直接熔融塌陷 PCF MZI。通过控制放电电流大小、放电时间长短以及放电次数,可制作出具有不同锥区结构的 MZI,其结构如图 1 所示,其中锥区长度为 L' ,锥腰直径为 D 。

光在 PCF 纤芯中传输时,通过第一个过渡区时纤芯中传输的一部分光被耦合进 PCF 包层中传输,作为传感臂;另一部分光继续在纤芯中传输,作为参考臂。当经过第二个过渡区时,包层中传输的一部分光被再次耦合进纤芯传输。由于 PCF 包层和纤

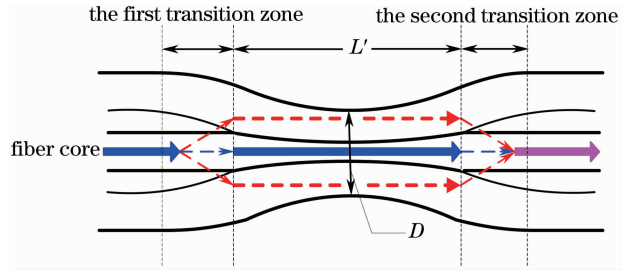


图 1 MZI 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the MZI

芯折射率不同,因此包层和纤芯中传输的光会产生光程差,又因为两束光为同一光源发出的相干光,因此两束光相遇后发生干涉,干涉光强为

$$I = I_{\text{core}} + I_{\text{cladding}} + 2\sqrt{I_{\text{core}}I_{\text{cladding}}}\cos\varphi, \quad (1)$$

式中 I_{core} 为锥形区域纤芯中的光强, I_{cladding} 为锥形区域包层中的光强, φ 为两束光的相位差

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda}, \quad (2)$$

式中 L 为 MZI 的干涉长度,即锥区长度 L' ; λ 为自由空间里传输的波长; Δn_{eff} 为 PCF 锥形区域的纤芯折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 和包层有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{cladding}}$ 的差值,即

$$\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding}}. \quad (3)$$

由(2)式可知当 $\varphi = 2m\pi$ 时输出光强达到最大,此时对应的中心波长为第 m 级干涉条纹的中心波长。在干涉长度 L 一定时,光子晶体光纤锥形区域包层有效折射率随着 RI 的变化而变化,而纤芯折射率基本保持不变,锥形区域 Δn_{eff} 随之改变,第 m 级干涉条纹中心波长也随之改变。因此,干涉条纹中心波长的漂移量随着外界环境折射率的变化而变化,可以通过检测 MZI 第 m 级干涉条纹中心波长的漂移量来测量 RI 的变化。

2.2 传感器的制作

本实验制作 MZI 的关键是利用电弧放电的方法在实芯 PCF 上直接制作锥区。实验所采用的是安扬激光生产的 SM-10 型 PCF,外包层直径为 $125 \mu\text{m}$,纤芯直径为 $9.5 \mu\text{m}$,纤芯为实芯,包层有三层周期性排列的空气孔,端面如图 2(a)所示。熔接机为 Ericsson 公司生产的 FSU 995 型保偏熔接机,光谱仪型号为 AQ6317B,光源波长范围为 $1520\sim 1610 \text{ nm}$ 。

为了避免 PCF 长度对 MZI 输出光谱产生影响,实验中固定 PCF 长度为 10 mm 。同时为了避免 PCF 与 SMF 熔接点塌陷对输出干涉谱产生的影响,通过手动熔接的方法反复实验确定 PCF 与 SMF 熔接参数放电电流为 12 mA ,预放电时间为

0.2 s, 放电时间为 0.3 s, 此时熔接点 PCF 空气孔未塌陷, 且熔接质量好。PCF 经电弧放电后形成的锥

区如图 2(b) 所示, 实验中, 随着锥区长度的增加, 锥腰直径也逐渐减小。

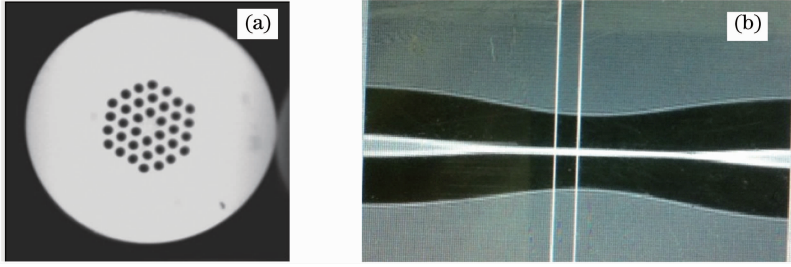


图 2 (a) PCF 端面; (b) PCF 锥区

Fig. 2 (a) Cross section of PCF; (b) image of one of the fabricated PCF tapers

通过控制电弧的参数, 在相同长度的 PCF 上制作了锥区长度 L' 分别为 113.63、136.66、145.28、

157.38 μm 的 4 组 MZI, 其干涉谱如图 3(a)~(d) 所示。

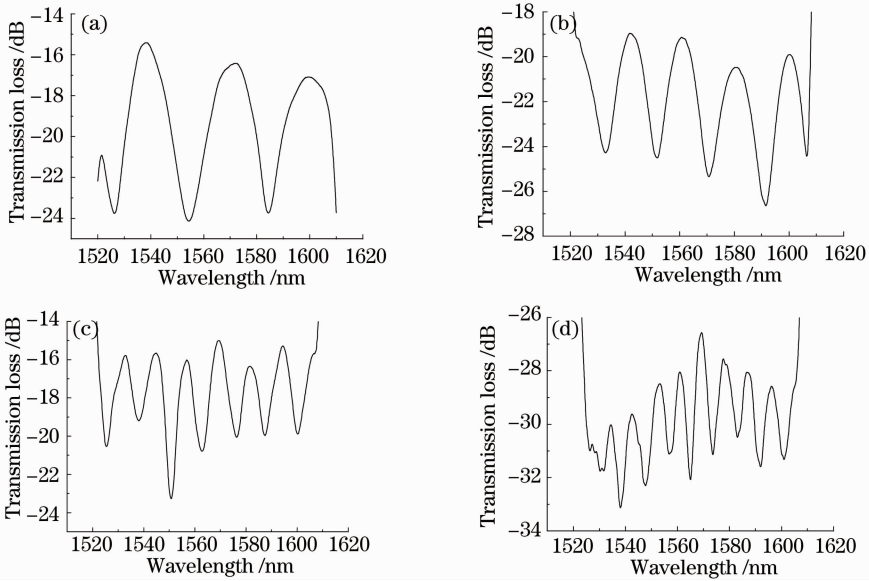


图 3 4 组 MZI 传输光谱。(a) $L' = 113.63 \mu\text{m}$; (b) $L' = 136.66 \mu\text{m}$; (c) $L' = 145.28 \mu\text{m}$; (d) $L' = 157.38 \mu\text{m}$

Fig. 3 Transmission spectra of four MZIs. (a) $L' = 113.63 \mu\text{m}$; (b) $L' = 136.66 \mu\text{m}$; (c) $L' = 145.28 \mu\text{m}$; (d) $L' = 157.38 \mu\text{m}$

从图 3 可以看出, MZI 输出干涉谱随锥区结构的改变而改变, 锥区长度 L' 的增加使整个波长范围内自由光谱范围逐渐减小。4 组 MZI 的自由光谱范围在 1554.34 nm 波长附近分别为 33.38, 19.10, 12.07, 7.86 nm。这是由于干涉谱自由光谱范围 (FSR, R_{FS}) 为

$$R_{\text{FS}} = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}} L}. \quad (4)$$

由于 L' 增加时, $\Delta n_{\text{eff}} L$ 随之增加, λ 保持不变, 因此在整个波长范围内 R_{FS} 减小。另外由于随着锥区长度的增加, 锥腰直径减小, 模间传播常数的差增大, 模间干涉拍长减小, 因此干涉条纹也更加密集。

3 实验结果分析

采用制作的直接熔融塌陷光子晶体光纤 MZI 传感器进行了折射率传感实验, 其实验装置框图如图 4 所示。

配制了质量分数为 5%~35% 的甘油溶液, 折射率范围为 1.3414~1.3862。将锥区长度为 100.2 μm 的 MZI 两端分别连接在光源和光谱仪上, 为了避免光纤形变对测量产生影响, 将 MZI 传感部分绷直固定在载玻片上, 每次测量完后用蒸馏水洗净, 并用脱脂药棉将清水吸干, 实验结果如图 5(a) 所示。

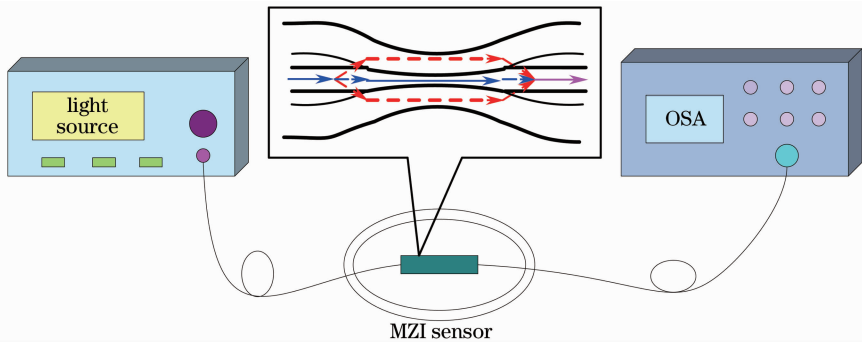


图 4 折射率传感实验原理图

Fig. 4 Experimental schematic diagram for refractive index measurement

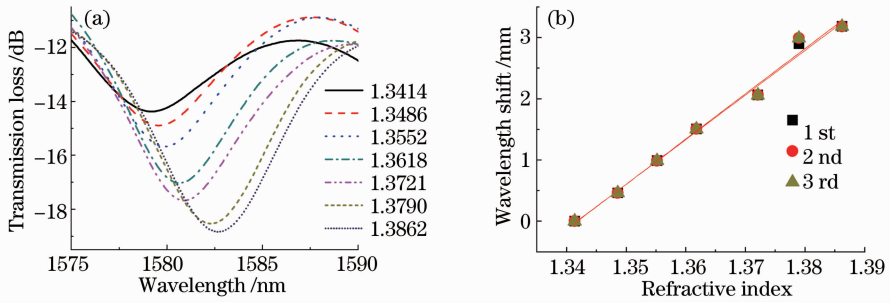


图 5 实验结果。(a) 1580 nm 波长处光谱随 RI 的变化;(b) 连续三次测量后灵敏度的对比
Fig. 5 Results of the experiment. (a) Spectra shifts of a MZI versus the RI when $\lambda=1580$ nm;
(b) sensitivity shifts after three continuous times measurement

实验结果表明,在 1.3414~1.3862 折射率范围内,随着 RI 的增加,在 1580 nm 波长处干涉条纹在水平方向上向长波方向漂移,结果符合上述折射率

传感的理论分析。连续测量三次,结果如图 5(b)所示,实验结果表明三次测量结果重复性好。

下面分别用锥区长度为 55.73、90.52、139.27、

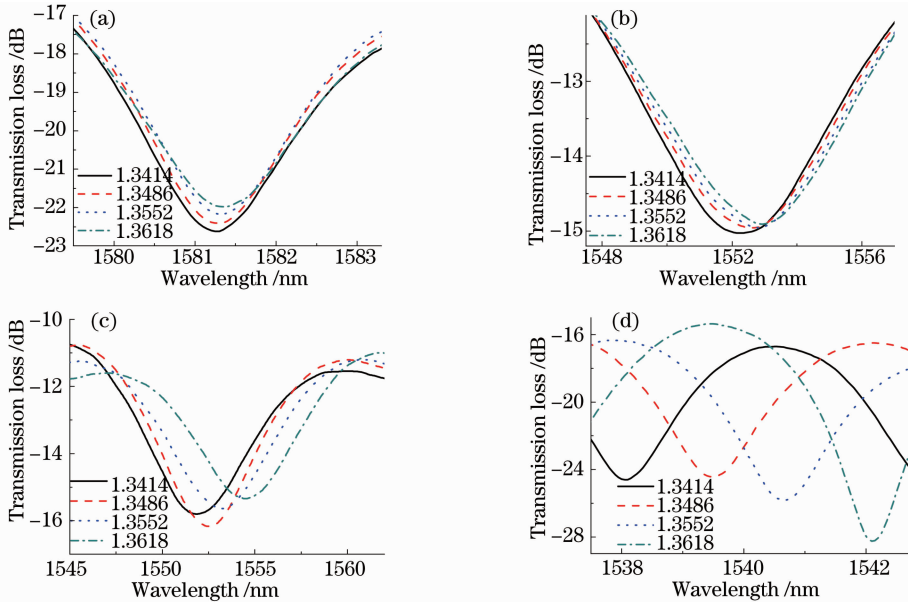


图 6 1.3414~1.3618 折射率范围内四组不同锥区结构 MZI 干涉光谱的变化。(a) $L'=55.73 \mu\text{m}$;
(b) $L'=90.52 \mu\text{m}$; (c) $L'=139.27 \mu\text{m}$; (d) $L'=164.36 \mu\text{m}$

Fig. 6 Changes of interference spectra for MZIs with different taper lengths for refractive index measurement at 1.3414~1.3618. (a) $L'=55.73 \mu\text{m}$; (b) $L'=90.52 \mu\text{m}$; (c) $L'=139.27 \mu\text{m}$; (d) $L'=164.36 \mu\text{m}$

164.36 μm 的 MZI 进行折射率传感的实验。由于不同结构下的 MZI 输出干涉谱不同,因此在相同的折射率变化范围内,不能在同一波长处准确监测不同结构的 MZI 波长的漂移量。

由(2)式可知

$$\Delta\lambda_m = \frac{(\Delta n_{\text{eff}} + \Delta n)L}{m} - \frac{\Delta n_{\text{eff}}L}{m} = \frac{\Delta nL}{m}, \quad (5)$$

式中 $\Delta\lambda_m$ 为第 m 级干涉条纹中心波长漂移量, Δn 为 RI 变化引起的折射率差值的变化量。由(5)式可知,对于同一个 MZI 而言,在相同 RI 变化范围内, $\Delta\lambda_m$ 随干涉级次 m 的增大而减小,另外由(2)式可知干涉级次越大对应条纹的中心波长越小,可推知长波长处波长漂移量大于短波长处波长漂移量。因此对于不同结构的 MZI,在同一 RI 变化范围内,分别对长波长处与短波长处进行检测,可通过对短波长处与长波长处波长漂移量的对比推出相同波长处波长漂移量的对比,从而得到不同结构 MZI 之间灵敏度的对比。

因此依次选取 1581.23、1552.11、1551.77、1538.06 nm 波长处进行监测,实验结果如图 6 所示。

由图 6(a)~(d) 可见,在相同的折射率变化范围内,不同锥区结构 MZI 的波长漂移量不同,其折射率灵敏度对比如图 7 所示。

由图 7 可见,四组 MZI 的灵敏度分别为 20.2、54.89、138.29、276.38 nm/RIU,结合(5)式推知,随着锥区长度的增大,干涉仪的灵敏度增大,又由于锥腰直径会随锥区长度的增大而减小,从而使外界环境对 Δn_{eff} 的影响增大,因此干涉仪灵敏度明显增大。

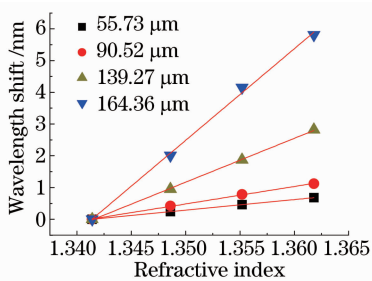


图 7 不同锥区结构 MZI 折射率灵敏度对比

Fig. 7 Comparison for MZI refractive index sensitivity with different taper structures

4 结 论

提出并制作了一种使用电弧放电法在 PCF 上直接制作锥区结构的电融锥型光子晶体光纤 MZI 折射率传感器,输出的干涉谱由纤芯模式和激发的包层模式之间耦合产生。研究了不同锥区结构下 MZI 输出光谱和其传输光谱与外界环境折射率的

关系。实验结果表明:随着锥区长度的增加或锥腰直径的减小,MZI 输出光谱自由光谱范围逐渐减小,在 1554.34 nm 波长附近由 33.38 nm 减小到 7.86 nm。同时,随着 RI 增加,MZI 输出光谱中心波长向长波长方向漂移,且随着 MZI 锥区长度的增加,传感器灵敏度由 20.28 nm/RIU 提高到 276.38 nm/RIU。由于该传感器制作方法简单、体积小、结构改变灵活、紧凑型好、灵敏度高、重复性强等特点,可在应力、位移等测量领域中得到应用。

参 考 文 献

- 1 Tong Zhengrong, Feng Dejun, Yang Shiquan, *et al.*. Study on current sensing base on all-fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. Acta Scientiarum Naturalium (Universitatis Nankaiensis), 2002, 35(3): 70-73.
- 2 童峥嵘, 冯德军, 杨石泉, 等. 基于全光纤马赫-曾德尔干涉仪的电流传感研究[J]. 南开大学学报(自然科学), 2002, 35(3): 70-73.
- 3 Fan Linyong, Zhao Ruifeng, Jiang Weiwei, *et al.*. Interferometer using a twin-core fiber for strain sensing [J]. J Optoelectronics · Laser, 2010, 21(10): 1488-1491.
- 4 范林勇, 赵瑞峰, 江微微, 等. 用于应力传感的双芯光纤马赫-曾德尔干涉仪[J]. 光电子·激光, 2010, 21(10): 1488-1491.
- 5 Fan Linyong, Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng, *et al.*. Temperature characteristic of in-fiber Mach-Zehnder interferometer using twin-core fiber [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(1): 1-8.
- 6 范林勇, 江微微, 赵瑞峰, 等. 双芯光纤马赫-曾德尔干涉仪的温度特性[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 1-8.
- 7 Zhang Shanshan, Zhang Weigang, Geng Pengcheng, *et al.*. Fiber Mach-Zehnder interferometer based on concatenated down-and-up-tapers for refractive index sensing applications [J]. Opt Commun, 2013, 288: 47-51.
- 8 Zhaobing Tian, S S H Yam, J Barnes, *et al.*. Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(8): 626-628.
- 9 Zhaobing Tian, S S H Yam, H Look. Single-mode fiber refractive index sensor based on core-offset attenuators [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(16): 1387-1389.
- 10 Hae Young Choi, Myoung Jin Kim, Byeong Ha Lee. All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber [J]. Opt Express, 2007, 15(9): 5711-5720.
- 11 Tang Changping, Deng Ming, Zhu Tao, *et al.*. Photonic crystal fiber based M-Z interferometer for refractive index measurement [J]. J Optoelectronics · Laser, 2011, 22(9): 1034-1308.
- 12 唐昌平, 邓明, 朱涛, 等. 基于光子晶体光纤 M-Z 干涉仪的折射率传感器研究 [J]. 光电子·激光, 2011, 22(9): 1034-1308.
- 13 Liu Qi, Wang Qin. Refractive index sensor based on tapered PCF in-line interferometer [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(9): 090601.
- 14 W Shin, T J Ahn, Y L Lee, *et al.*. Highly sensitive strain and bending sensor based on in-line fiber Mach-Zehnder interferometer in solid core large mode area photonic crystal fiber [J]. Opt Commun, 2010, 283(10): 2097-2101.
- 15 Bongkyun Kim, Tae-Hoon Kim, Long Cui, *et al.*. Twin core photonic crystal fiber for in-line Mach-Zehnder interferometric sensing applications [J]. Opt Express, 2009, 17(18): 15502-15507.
- 16 Ginu Rajan, Sunish Mathews, Gerald Farrell, *et al.*. A liquid crystal coated tapered photonic crystal fiber interferometer [J]. Journal of Optics, 2011, 13: 015403.