

# 基于酒精选择性填充光子晶体 光纤的 Sagnac 应变传感器

胡海峰, 李雪刚, 周 雪, 赵 勇

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 提出了一种基于酒精选择性填充光子晶体光纤的新型 Sagnac 光纤环应变传感器, 实现了对微小应变的高灵敏度测量. 利用酒精对光子晶体光纤的选择性填充使之产生双折射效应, 并将已经填充好的光子晶体光纤嵌入到 Sagnac 干涉环中, 实现了 Sagnac 干涉效应. 当给光子晶体光纤施加应变时, Sagnac 干涉谱的波峰会随着应变变化而变化, 实现对应变的测量. 实验结果表明, 当微应变在 0 ~ 3 958 时, 测量微应变的灵敏度能够达到 3.66 pm. 同时, 本结构具有高灵敏度、高稳定性、抗电磁干扰、易于搭建等优点.

**关 键 词:** 光子晶体光纤; Sagnac 应变传感器; 应变; 酒精选择性填充; 传感器

**中图分类号:** TP 212.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2016)12-1688-04

## Optic-Fiber Sagnac Strain Sensor Based on Alcohol Selectively-Filling Photonic Crystal Fiber

HU Hai-feng, LI Xue-gang, ZHOU Xue, ZHAO Yong

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHAO Yong, E-mail: zhaoyong@ise.neu.edu.cn)

**Abstract:** A new optic-fiber Sagnac strain sensor based on alcohol filling photonic crystal fiber was proposed and demonstrated, by which measuring the minute strain could be achieved. The birefringence of the photonic crystal fiber (PCF) was produced by alcohol selectively-filling the air holes of the PCF. And then the alcohol selectively-filling photonic crystal fiber was embedded in the Sagnac loop and the Sagnac interference effect was achieved. Then the peak wavelength of the Sagnac interference spectrum could be changed by strain because the peak wavelength shift was directly proportion to strain change. The micro strain sensitivity is measured to be 3.66 pm in a micro strain range from 0 to 3 958.

**Key words:** photonic crystal fiber; Sagnac strain sensor; strain; alcohol selectively-filling; sensor

近年来, 光纤应变传感器已经应用于工程领域, 并吸引了许多研究者的目光. 目前, 光纤应变传感器主要基于光纤光栅<sup>[1-3]</sup>、长周期光纤光栅<sup>[4-6]</sup>、马赫增德尔干涉仪<sup>[7-10]</sup>、光纤环<sup>[11-12]</sup>等. 这些结构具有简单的结构, 但是也存在一些缺点, 例如光纤光栅需要复杂和昂贵的刻录工艺, 需要 CO<sub>2</sub> 激光或者是 UV 激光. 因此, 光纤光栅在传感领域的应用受到了一定的限制. 另外, 马赫增德尔干涉结构也广泛应用在应变测量中, 但是此

种结构测量应变的灵敏度普遍较低. 另一种方案是使用光纤环测量应变, 光纤环又称 Sagnac 干涉仪, 其结构简单、灵敏度高, 因而近几年被广泛研究, 并将其用在光纤传感领域, 常被用来进行温度、应变、角速度等的传感. 通常, Sagnac 干涉仪是在一个 3 dB 耦合器中间熔接一段保偏光纤或者是高双折射光纤制作而成. 近年来基于光子晶体光纤的 Sagnac 干涉环被广泛研究<sup>[11-12]</sup>. 但是, 现在普遍采用的是光子晶体保偏光纤和光子晶体

收稿日期: 2016-05-24

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(61425003); 国家自然科学基金资助项目(61273059); 流程工业综合自动化国家重点实验室基础科研业务费资助项目(2013ZCX09).

作者简介: 胡海峰(1984-), 辽宁辽阳人, 东北大学讲师, 博士; 赵 勇(1973-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

双折射光纤,这两种光纤相对于普通的光子晶体光纤具有价格昂贵、生产复杂的劣势.

本文提出了一种基于酒精选择性填充光子晶体光纤的 Sagnac 干涉仪结构,并用于测量应变.这种结构将光子晶体保偏光纤或者光子晶体双折射光纤替换为经过酒精选择性填充的普通光子晶体光纤,由于酒精的选择性填充使光子晶体光纤产生折射率不对称结构,因此内部产生了双折射特性,进一步形成 Sagnac 干涉仪,并用于测量应变.

# 1 实验原理与分析

图 1 是 Sagnac 干涉仪应变传感器,Sagnac 干涉仪的一般结构是由光源、光纤回路、光纤耦合器和光子晶体光纤组成.

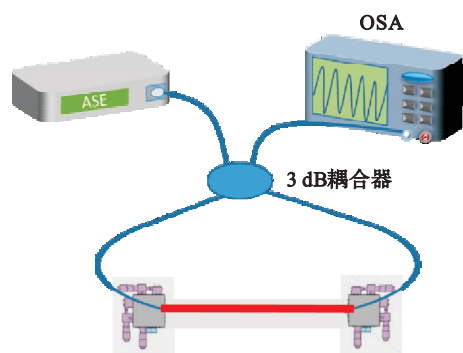


图 1 Sagnac 干涉系统  
Fig. 1 Sagnac interference system

光源发出的光经过耦合器后,被分成顺时针和逆时针相反方向传播的两束光,所经过的光路途径相同.当干涉仪不受外力作用或者没有双折射效应的时候,其中顺逆时针传播的两束光程差为零,当干涉仪在光纤回路的非中心点的某个位置受到干扰作用或者使用双折射光纤时,两束光之间形成了相位差.双折射光纤产生双折射的原理是光纤的折射率不对称分布.本文中,通过对普通光子晶体光纤空气孔的酒精选择性填充,形成光子晶体光纤折射率的不对称分布,如图 2 所示.从图中可以看出,已经有明显的折射率不对称分布.

图 3 是填充酒精之后的光子晶体的模式分布图,图 3a 是  $E_x$  模式的分布图,其有效折射率为 1.446 296,图 2b 是  $E_y$  模式的分布图,其有效折射率为 1.446 299, $E_x \neq E_y$ ,可以得出,填充酒精之后的光子晶体光纤能够产生双折射效应.

忽略光纤 Sagnac 环的插入损耗,光纤环的透射谱可以描述为

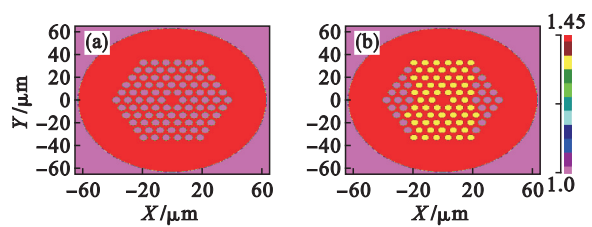


图 2 光子晶体光纤酒精填充前后折射率分布图  
Fig. 2 Refractive index profile of the PCF before alcohol filling and after alcohol filling  
(a)—酒精填充前;(b)—酒精填充后.

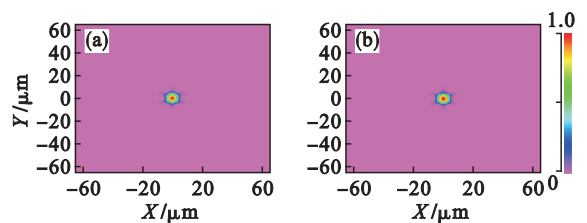


图 3 光子晶体光纤模式分布图  
Fig. 3 Modes distribution of the alcohol filling PCF  
(a)— $E_x$  模式;(b)— $E_y$  模式.

$$T = [1 - \cos(\psi)]/2. \quad (1)$$

其中: $\psi = 2\pi LB/\lambda$  为干涉环的相位差; $L$  为光子晶体光纤的长度; $B$  为光子晶体光纤的双折射值; $\lambda$  为工作波长.不同波峰之间的距离  $S$  可以描述为

$$S = \frac{\lambda^2}{BL}. \quad (2)$$

当光子晶体光纤的应变发生改变时,双折射值  $B$  发生变化,因此,相位差  $\Delta\psi$  也随之变化,如式(3)所示:

$$\Delta\psi = 2\pi L\Delta B/\lambda. \quad (3)$$

相位差的变化,进一步因此输出光谱波长的变化,如式(4)所示:

$$\Delta\lambda = S\Delta\psi/(2\pi). \quad (4)$$

根据式(2)~式(4),可以得出,Sagnac 干涉谱会随着施加应变的变化而变化.因此 Sagnac 干涉仪可以用于测量应变.

## 2 实验结果与讨论

在实验中,使用一段 20 cm 长的光子晶体光纤被,但是由于普通光子晶体光纤的折射率差是对称分布的,因此不能产生双折射效应.在本文中,为了实现光子晶体光纤的折射率不对称特性,将光子晶体光纤的部分空气孔进行塌陷,如图 4 所示,之后使用空气加压法,将酒精填充进光子晶体光纤中,由于光子晶体光纤空气孔的不对称塌陷,只能使酒精填充进部分空气孔,进而形成光子

晶体光纤非对称的折射率分布. 通过控制放电次数, 可以控制光子晶体光纤中酒精填充的量, 如图 4a~4d 所示, 分别是放电 2 次、5 次、8 次和 11 次的显微镜图. 从图 4 中可以看出, 当放电 2 次时并没有发生明显塌陷, 当放电次数为 5 次时出现明显塌陷, 并且是不对称的, 当放电次数为 8 次时空气孔已经全部塌陷, 当放电次数为 11 次时, 塌陷区明显增长. 由原理分析可知, 为了使光子晶体光纤能够产生双折射效应, 应使光子晶体光纤的空气孔进行不对称塌陷, 并将酒精填充到未进行塌陷的空气孔内, 形成光子晶体光纤的折射率的不对称分布. 由图 4 可知, 当放电次数为 5 次时, 光子晶体光纤的部分空气孔塌陷, 因此在实验中应将放电次数控制在 5 次左右.

之后将酒精选择性填充的光子晶体光纤与单模光纤进行熔接, 如图 4 e 所示, 并将其嵌入到 Sagnac 干涉环中, 系统如图 1 所示.

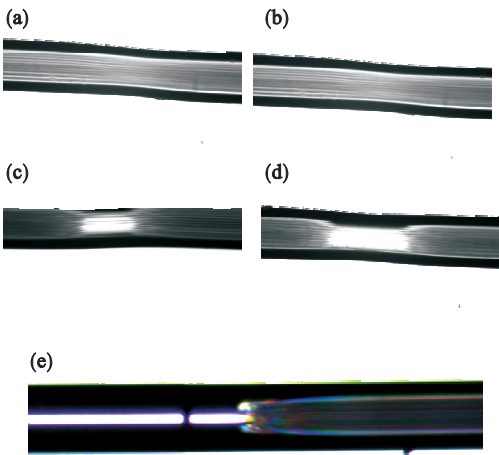


图 4 光子晶体光纤塌陷区显微镜图

Fig. 4 Microscope figures of the PCF collapsed area

- (a)—放电 2 次; (b)—放电 5 次;  
(c)—放电 8 次; (d)—放电 11 次;  
(e)—光子晶体光纤与单模光纤熔接.

图 5 是基于酒精选择性填充光子晶体光纤的 Sagnac 干涉环在 1 520 ~ 1 570 nm 范围的透射光谱, 其中插图为无光子晶体光纤时的光谱. 从图 5 可以看出, 干涉谱具有良好的消光比, 其干涉深度达到 20 dB, 其波谷在 1 542. 76 nm 处. 由于此系统使用的是宽谱光源, 而没有使用偏振器, 此传感系统的输出光谱是稳定的.

在实验中, 将光子晶体光纤的两端分别固定在两个微位移平台上, 并通过调整微位移平台给光子晶体光纤施加应变, 图 6 是不同应变值时的 Sagnac 干涉环的透射光谱.

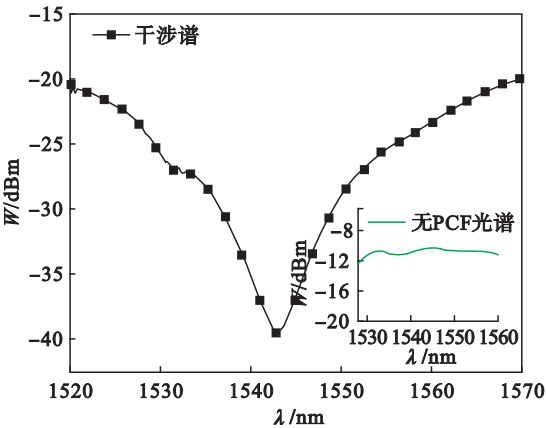


图 5 Sagnac 干涉环透射光谱

Fig. 5 Transmission spectrum of the Sagnac interference loop

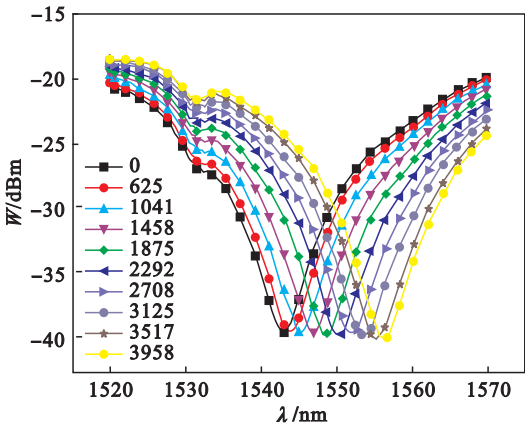


图 6 不同微应变时的 Sagnac 干涉环的透射光谱

Fig. 6 Transmission spectra of Sagnac interference loop with different micro strain

从图 6 可以看出, 当微应变从 0 变化到 3 958 时, 透射光谱发生了明显的移动, 其波谷一共移动了 13. 5 nm. 图 7 为透射光谱波谷的波长与应变值的拟合直线, 从图 7 可以得出, 基于酒精选择性填充的 Sagnac 干涉环测量微应变的灵敏度能够达到 3. 66 pm.

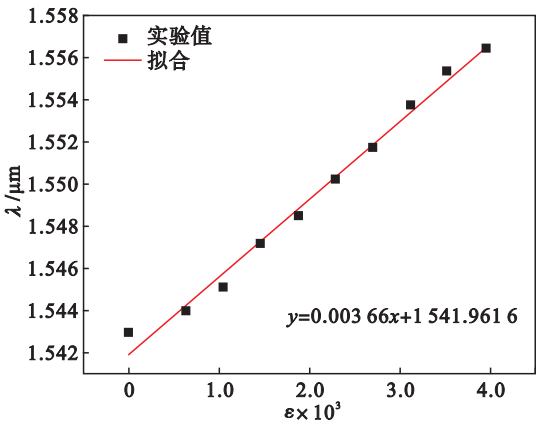


图 7 透射光谱波长与应变值的拟合直线

Fig. 7 Fitting line of the spectra wavelength and strain

(下转第 1709 页)