

DOI:10.16136/j.joel.2022.11.0011

基于飞秒激光直写 F-P 腔的位移与应力传感特性研究

彭 敏, 陈 宁, 陶武强, 鲁志琪, 刘昌宁*

(湖北师范大学 物理与电子科学学院, 湖北 黄石 435002)

摘要:设计了一款基于飞秒激光直写的法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)干涉型光纤传感器,实现了位移与外部应变双参数的测量,研究了该传感器的实现原理,并进行实验验证。首先用飞秒脉冲激光在标准单模光纤(single mode fiber, SMF)的纤芯的纵向上刻两道长度为 $48\text{ }\mu\text{m}$ 的线,两线间的距离为 $105\text{ }\mu\text{m}$,形成一个F-P谐振腔,将该结构的其中一端切平,与一个全反镜共同形成一个复合的干涉仪,从而构成位移传感器;再将切平的那一端打结,又可以进行应力的测量。实验结果表明,该结构在Dip1位置的位移灵敏度为 $-440.3\text{ pm}/\mu\text{m}$,线性拟合系数为 0.9903 ;该结构打结后,可以测得Dip2位置的应变灵敏度为 $1.2\text{ pm}/\mu\text{e}$,线性拟合系数为 0.9924 。传感器制作简单,成本低,结构微小,线性度良好,容易重复。该传感器在位移传感和应变传感领域中均具有一定的实用价值。

关键词:飞秒激光;法布里-珀罗干涉仪;位移;应变

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2022)11-1134-05

Study on displacement and strain sensing characteristics of F-P cavity based on femtosecond laser direct writing

PENG Min, CHEN Ning, TAO Wuqiang, LU Zhiqi, LIU Changning*

(College of Physics and Electronic Science, Hubei Normal University, Huangshi, Hubei 435002, China)

Abstract: A Fabry-Perot (F-P) interferometric fiber sensor based on femtosecond laser direct writing is designed to achieve dual parameters measurement of displacement and external strain, and the implementation principle of the sensor is studied and experimentally verified. First, a femtosecond pulsed laser is used to inscribe two lines of length $48\text{ }\mu\text{m}$ in the longitudinal direction of the core of a standard single mode fiber (SMF) with a spacing of $105\text{ }\mu\text{m}$ to form an F-P resonant cavity, and then one end of this structure is cut flat to form a composite interferometer together with an all-reflective mirror, thus constituting a displacement sensor. The cut flat end is then knotted to allow for stress measurements again. The experimental results show that the displacement sensitivity of the structure at the Dip1 position is $-440.3\text{ pm}/\mu\text{m}$ with a linear fitting coefficient of 0.9903 ; the strain sensitivity at the Dip2 position can be measured after the structure is knotted at $1.2\text{ pm}/\mu\text{e}$ with a linear fitting coefficient of 0.9924 . The sensor is simple to fabricate, low cost, tiny structure, good linearity and easy to repeat. The sensor is of practical value in both displacement sensing and strain sensing fields.

Key words: femtosecond laser; Fabry-Perot interferometer (FPI); displacement; strain

1 引言

随着信息时代的到来,万物互联终将成为现

实,这将极大地改变人类的生活方式,提高人们的生活水平。传感器作为其中的一个关键环节,无论是在社会民生方面,还是在工业与科研领域,都

* E-mail: liusir1001@163.com

收稿日期:2022-01-05 修订日期:2022-02-24

基金项目:2020年度湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T2020014)资助项目

起着不可或缺的作用。光纤传感器较其他传统的传感器,有着结构简单、体积小、抗腐蚀、抗电磁干扰以及灵敏度高特点。其中频繁使用的光纤传感器有长周期光栅(long period fiber grating, LPFG)、布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)以及其他各种干涉仪,包括法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot interferometer, FPI)、马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)、迈克尔逊干涉仪(Michelson interferometer, MI)^[1,2]。FPI以高效、体积小、低成本的优点而受到广泛的关注。FPI已被应用于不同的领域,如石油工业、井下测量、用于导航的光纤陀螺仪,另外还有生物力学、康复工程以及化学传感^[3-6]。目前,就干涉型光纤传感器而言,已经有应变、温度、湿度、折射率、气压、位移等方面的应用。其中,位移与应变是两个非常重要的参数^[7-12],比如 LI 等^[13,14]的高精度光纤布拉格光栅位移传感器;GHAFAR 等^[15]的二维位移光纤传感器;LIU 等^[16]的基于 FPI 的应变位移传感器。基于飞秒激光直写的 FPI^[17-19]的光纤传感器在制作上更加简单以及精密。本文以飞秒激光直写的法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)腔实现了位移和应变的双参数测量,

该传感器具有制作简单、结构新颖、体积小、鲁棒性好、功能复用等特点。

2 光纤传感器结构制作与原理分析

2.1 传感器结构制作

第一步,取一段标准的单模光纤(single mode fiber, SMF),长约 35 cm,(武汉长飞光纤光缆有限公司生产,纤芯直径为 9 μm ,包层直径为 125 μm)进行制作。将 SMF 中间位置约 1 cm 长的光纤剥掉涂覆层,然后用丙酮溶液将已剥涂覆层部位擦拭清洁。

第二步,将 SMF 固定在三维移动平台上,通过显微成像实时监控,飞秒激光在已剥涂覆层部位的纤芯上刻两道线,形成 F-P 腔。飞秒激光器为美国相干公司生产,中心波长为 800 nm,脉冲宽度为 35 fs,重复频率为 1000 Hz,能量设定为 0.6 μJ ,显微物镜为 100 $\times$,激光直写速度设置为 10 $\mu\text{m}/\text{s}$ 。整个直写过程均由程序控制,经测量得两条线的宽度均为 1 μm ,纵向长度为 48 μm ,两线横向间距为 105 μm ,如图 1(a)所示。

第三步,将生成有 F-P 腔光纤的任意一端剥掉涂覆层约 1 cm,用光纤切割刀将断面切平,并用丙酮擦拭干净。端面倾斜角度小于 1 $^\circ$,如图 1(b)所示。

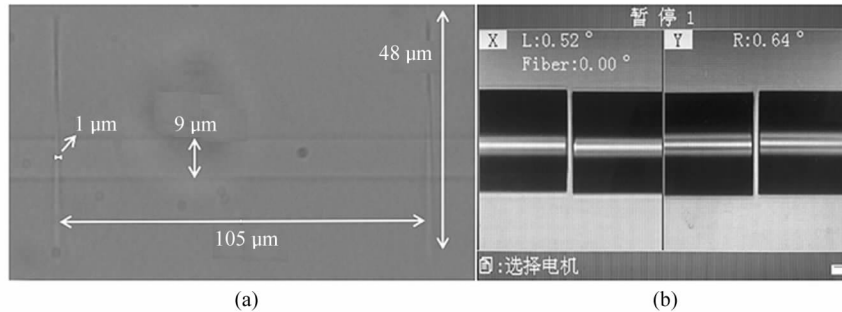


图 1 传感器结构图:(a) 飞秒直写的 F-P 腔;(b) F-P 腔光纤的末端端面倾斜角度

Fig. 1 Diagram of sensor structure: (a) Femtosecond direct write F-P cavity; (b) Inclination angle of end face of F-P cavity fiber

2.2 传感原理简单分析

位移传感光路示意如图 2 所示,该干涉仪包括 6 个 F-P 腔,由反射面 R_1 与 R_2 构成 Q_1 腔,反射面 R_2 与 R_3 构成 Q_2 腔,反射面 R_3 与全反镜 R_4 构成 Q_3 腔,反射面 R_1 与 R_3 构成 $Q_1 + Q_2$ 腔,反射面 R_2 与 R_4 构成 $Q_2 + Q_3$ 腔,反射面 R_1 与 R_4 构成 $Q_1 + Q_2 + Q_3$ 腔。

4 光束干涉的反射光谱强度为:

$$\begin{aligned} I(\lambda) = & A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + 2A_1A_2\cos(\phi_1) + \\ & 2A_2A_3\cos(\phi_2) + 2A_3A_4\cos(\phi_3) + \\ & 2A_1A_3\cos(\phi_1 + \phi_2) + 2A_2A_4\cos(\phi_2 + \phi_3) + \\ & 2A_1A_4\cos(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, I 为反射光的总光强, λ 是光波波长, A_1 、 A_2 、

A_3 、 A_4 分别表示反射面 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 的反射光振幅, ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 分别是 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 的相位为:

$$\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} 2n_{\text{core}}L_1, \quad (2)$$

$$\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} 2n_{\text{core}}L_2, \quad (3)$$

$$\phi_3 = \frac{2\pi}{\lambda} 2n_{\text{air}}L_3, \quad (4)$$

式中, n_{core} 为 SMF 纤芯的折射率, n_{air} 为反射面 R_3 与全反镜 R_4 之间的空气折射率; L_1 、 L_2 和 L_3 分别为 Q_1 腔、 Q_2 腔和 Q_3 腔的腔长。

入射光经过干涉仪后传进光谱仪得到初始光谱如图 3(a)所示,经快速傅里叶变换后可得到传感器

的空间频谱如图 3(b)所示。当相位等于 $(2m+1)\pi$ 时,干涉光强最小,该点的波长可表示为:

$$\lambda_m = \frac{4}{2m+1}nL. \quad (5)$$

通过观察空间频谱图可知,对整个干涉过程起主要贡献的只有两个频率,这意味着该干涉仪仅两个谐振腔起主要作用。具体来说,空间频谱图中起主要作用的频率大约为 0.05 和 0.1,其他高阶模都可以忽略。

设定波长为 1550 nm, SMF 纤芯折射率为 1.46,空气折射率为 1,代入式(6),粗略计算可得这两个频率对应的腔长约为 $60\mu\text{m}$ 和 $82\mu\text{m}$ 。除了 Q_1 的腔长与 Q_3 的腔长接近几十个微米量级,其余谐振腔的腔长皆为十厘米量级,由此可以判断,起主要

贡献的谐振腔是 Q_1 腔与 Q_3 腔。

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2nL}, \quad (6)$$

式中, L 为 F-P 腔的腔长, n 为该 F-P 腔的折射率。

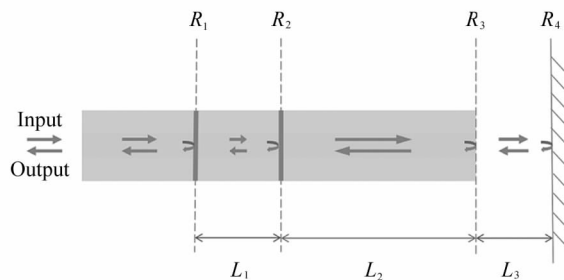


图2 位移光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of displacement optical path

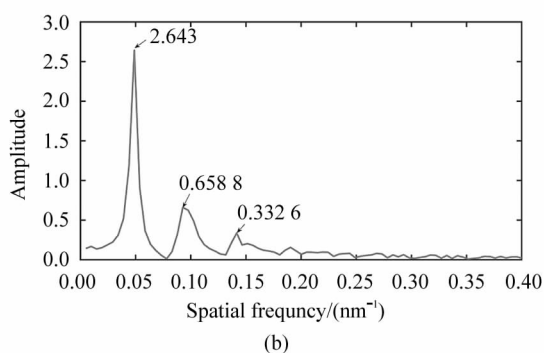
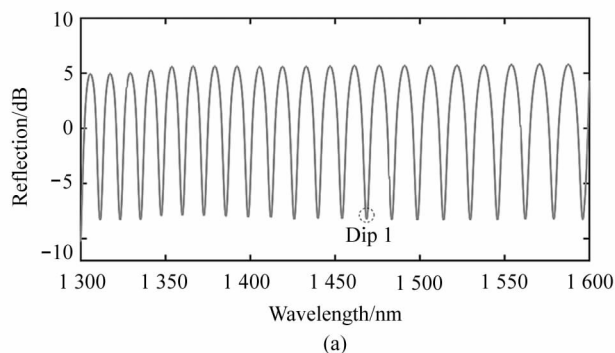


图3 位移实验初始反射光谱图与空间频谱图:(a) 位移实验初始反射光谱图;(b) 对应的空间频谱图

Fig. 3 Initial reflection spectrum diagram and spatial spectrum diagram of displacement experiment:

(a) Initial reflection spectrum diagram of displacement experiment; (b) Diagram of corresponding spatial spectrum

3 实验结果与分析

3.1 位移传感实验

位移传感器实验装置如图 4 所示,将传感器的一端用环形器与光谱仪和宽带光源连接起来,并将末端切平整的那一端与全反镜保持零距离,固定全反镜不动,使平台上的千分尺的微分筒向左旋转到 $80\mu\text{m}$ 处,初始化位移实验装置,并记录下初始光谱如图 3(a)所示,构成一个复合的 FPI 位移传感器。

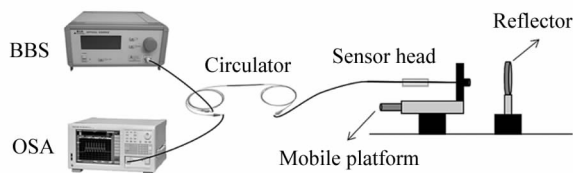


图4 位移实验装置图

Fig. 4 Diagram of displacement test device

在实验操作过程中,左旋转一格微分筒,即间隔 $10\mu\text{m}$,分别旋转了 8 次,记下其光谱。实验结果表明,随着位移距离的增大,传感器的反射谱整体左移。其中,波谷 Dip1 的中心波长为 1469nm ,强度为 -8.253dB ,它的光谱变化如图 5(a)所示,随着位移的增大,波谷 Dip1 的中心波长发生蓝移。将记录下的数据用 MATLAB 线性拟合出来,波谷 Dip1 的线性拟合度如图 5(b)所示,可知它的中心波长漂移量与位移变化量有很好的线性关系,线性拟合度 $R^2 = 0.9903$,位移灵敏度为 $-440.3\text{pm}/\mu\text{m}$,测量范围为 $80\mu\text{m}$,能够实现精密测量。

3.2 应变传感实验

应变传感的实验装置如图 6 所示,将已切平一端的光纤打个结,打结的作用与光纤末端斜切类似,其目的均为防止末端产生干涉。此时干涉仪仅有一个 F-P 腔,使其两端拉直并绷紧,用夹具固定在应变平台上。然后将另一端用环形器与光谱仪和宽带光

源连接起来,得到初始反射谱如图 7 所示。

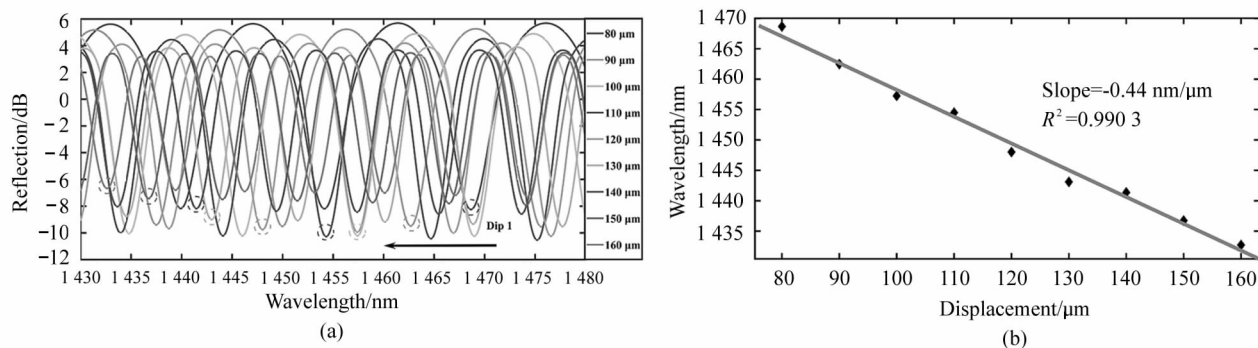


图 5 位移实验 Dip1 处反射光谱变化图与线性拟合图:(a) Dip1 处反射光谱变化图;(b) Dip1 处线性拟合图

Fig. 5 Variation diagram and linear fitting diagram of reflection spectrum at Dip1 in displacement experiment:

(a) Variation diagram of reflection spectrum at Dip1; (b) Linear fitting diagram at Dip1

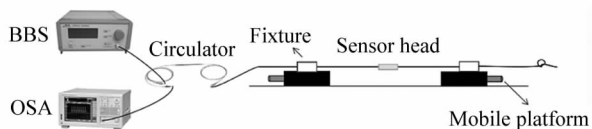


图 6 应变实验装置图

Fig. 6 Diagram of strain test device

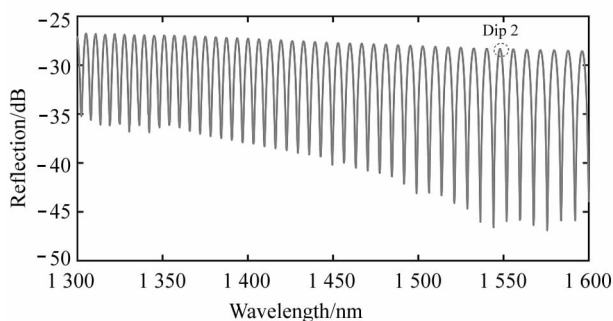


图 7 应变实验初始反射光谱图

Fig. 7 Initial reflection spectrum diagram of strain experiment

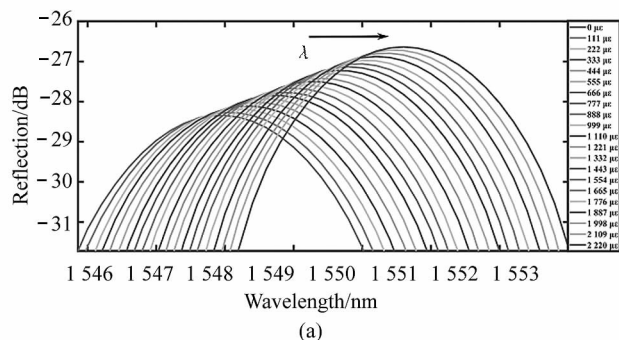


图 8 应变实验 Dip2 附近反射光谱整体变化图与 Dip2 处线性拟合图:

(a) Dip2 附近反射光谱整体变化图;(b) Dip2 处线性拟合图

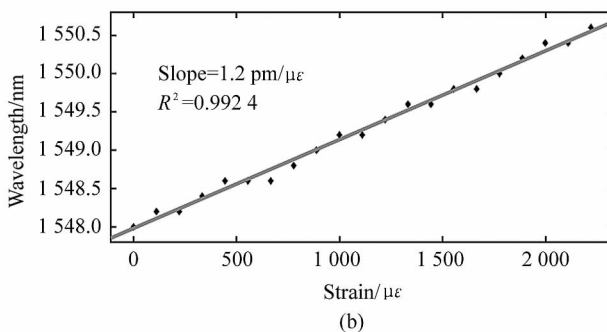
Fig. 8 Overall variation diagram of reflection spectrum near Dip2 in strain experiment and linear fitting diagram at Dip2:

(a) Overall variation diagram of reflection spectrum near Dip2; (b) Linear fitting diagram at Dip2

同样,经过式(6)可以计算得出,105 μm 的 F-P 谐振腔的自由光谱范围约 7.835 nm,通过初始反射光谱图又可得知 1550 nm 附近的自由光谱范围为 8 nm,理论与实际值基本吻合。

接下来,测得两夹具之间的初始距离 $L=18\text{ cm}$,在实验操作过程中,使左端平台千分尺的微分筒每次左移两格,也就是 $\Delta L=20\text{ }\mu\text{m}$ 。利用轴向应变变化公式 $\epsilon=\Delta L/L$ 得知轴向应变间隔 $111\text{ }\mu\epsilon$,每变化 $111\text{ }\mu\epsilon$ 记录一次反射谱,旋转了 20 次,轴向应变变化范围为 $0\sim 2220\text{ }\mu\epsilon$ 。实验结果表明,轴向应变变化量与反射谱的中心波长有着极好的线性关系,随着轴向应变的增大,反射谱整体向右移,如图 8(a) 所示。

取通讯波段附近的一个点 Dip2,其中心波长为 1548 nm,强度为 -28.34 dB ,根据软件分析可得,其线性拟合度 $R^2=0.9924$,轴向应变灵敏度为 $1.2\text{ pm}/\mu\epsilon$,如图 8(b) 所示。



4 结 论

由理论分析与实验验证可知,基于飞秒激光直写的本征 FPI 能够实现位移与应变双参数测量。较小能量而且紧聚焦的飞秒激光在光纤内部直写,仅改变其折射率,在轴向形成两个镜面的干涉仪,避免了传统干涉仪的拉锥或拼接过程,传感器的鲁棒性极好,实验操作过程简单,结构紧凑。观察位移和应变的反射谱变化可知,特征峰 Dip2 或特征谷 Dip1 的中心波长偏移量与被测量有极好的线性关系,而且灵敏度好。位移灵敏度为 $-440.3 \text{ pm}/\mu\text{m}$,线性拟合度为 0.9903,可测位移的量程为 $80 \mu\text{m}$,在精密测量领域有着一定的实用价值。应变传感的灵敏度为 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$,线性拟合度为 0.9924,测量范围为 $2220 \mu\epsilon$,在医疗监测等领域有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] ZHENG Y, ZHU Z W, XIAO W, et al. Review of fiber optic sensors in geotechnical health monitoring[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 54: 102127.
- [2] RAN Z, HE X, RAO Y, et al. Fiber-optic microstructure sensors: a review[J]. Photonic Sensors, 2021, 11(2): 227-261.
- [3] ISLAM M, ALI M M, LAI M H, et al. Chronology of Fabry-Perot interferometer fiber-optic sensors and their applications: a review[J]. Sensors, 2014, 14(4): 7451-7488.
- [4] LI H, ZHAO Q, NI J, et al. Fabry-perot cavity-based optical fiber pressure sensor[C]//International Conference on Optoelectronics and Measurement, October 18-20, 2018, Hangzhou, China. Singapore: Springer, 2020: 45-51.
- [5] RONG Q, SUN H, QIAO X, et al. A miniature fiber-optic temperature sensor based on a Fabry-Perot interferometer[J]. Journal of Optics, 2012, 14(4): 045002.
- [6] RAN Z, RAO Y, ZHANG J, et al. A miniature fiber-optic refractive-index sensor based on laser-machined Fabry-Perot interferometer tip[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(23): 5426-5429.
- [7] RAHMAN H A, HARUN S W, SAIDIN N, et al. Fiber optic displacement sensor for temperature measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 12(5): 1361-1364.
- [8] DUIVENVOORDEN K, TERHAL B M, WEIGAND D. Single-mode displacement sensor[J]. Physical Review A, 2017, 95(1): 012305.
- [9] TIAN J, JIAO Y, JI S, et al. Cascaded-cavity Fabry-Perot interferometer for simultaneous measurement of temperature and strain with cross-sensitivity compensation[J]. Optics Communications, 2018, 412: 121-126.
- [10] ZHAO Y, CHEN M, LV R, et al. In-fiber rectangular air Fabry-Perot strain sensor based on high-precision fiber cutting platform[J]. Optics Communications, 2017, 384: 107-110.
- [11] LIU Y, WANG D N, CHEN W P. Crescent shaped Fabry-Perot fiber cavity for ultra-sensitive strain measurement[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1-9.
- [12] GENG T, LI J, YANG W, et al. Simultaneous measurement of temperature and strain using a long-period fiber grating with a micro-taper[J]. Optical Review, 2016, 23(4): 657-661.
- [13] LI J, WANG Y. Temperature and strain fiber sensor design based on microstructural Fabry-Perot cavity[C]//Twelfth International Conference on Information Optics and Photonics. November 01, 2021, Xi'an, China. Bellingham, WA: SPIE, 2021, 12057: 298-303.
- [14] LI C, SUN L, XU Z, et al. Experimental investigation and error analysis of high precision FBG displacement sensor for structural health monitoring[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2020, 20(6): 2040011.
- [15] GHAFFAR A, HOU Y L, LIU W Y, et al. Two-dimensional displacement optical fiber sensor based on macro-bending effect[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 120: 105688.
- [16] LIU S, WANG Y, LIAO C, et al. High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry-Perot interferometer[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2121-2124.
- [17] WANG Q Y, MAO B N, QIU Y Q, et al. The design of a thermostatic structure for fiber F-P etalons and the temperature control algorithm[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(7): 682-687.
- 汪巧云, 毛邦宁, 裘燕青, 等. F-P 光纤标准具高精度温控系统设计与算法研究[J]. 光电子 · 激光, 2020, 31(7): 682-687.
- [18] WILLIAMS R J, KRAMER R G, NOLTE S, et al. Femtosecond direct-writing of low-loss fiber Bragg gratings using a continuous core-scanning technique[J]. Optics Letters, 2013, 38(11): 1918-1920.
- [19] DENG J, WANG D N. Ultra-sensitive strain sensor based on femtosecond laser inscribed in-fiber reflection mirrors and Vernier effect[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(19): 4935-4939.

作者简介:

刘昌宁 (1981—), 男, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为飞秒激光微加工和光纤传感技术。