

基于稀土光纤双花生结的高灵敏度光纤温度传感器

陈或芳, 万洪丹*, 陈乾, 周权, 张祖兴

南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 江苏 南京 210023

摘要 提出并研究了一种基于稀土光纤双花生结(RDDFP)的光纤温度传感器。采用稀土掺杂光纤制备双花生结, 利用其包层模和纤芯模干涉对温度的敏感特性, 结合稀土光纤中稀土离子的强热光效应, 实现对温度的高灵敏度感知与测量。通过理论和实验研究并对比掺铒光纤双花生结(EDDFP)和掺镱光纤双花生结(YDDFP)两种稀土光纤花生结中的模式干涉和热敏感效应。实验结果表明, 相比于普通光纤双花生结, RDDFP 具有更强的热光效应和更高的温度灵敏度。其中, EDDFP 温度灵敏度为 1286 pm/°C, YDDFP 温度灵敏度为 -2343 pm/°C。基于 RDDFP 的光纤温度传感器具有灵敏度高、重复性高、全光纤、制作简单、结构紧凑等优势, 在电力系统、建筑、航空航天以及海洋开发领域等具有良好的应用前景。

关键词 传感器; 掺铒光纤双花生结; 掺镱光纤双花生结; 高灵敏度; 温度传感; 热光效应

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0110001

High Sensitivity Optical Fiber Temperature Sensor Based on Rare-Earth-Doped Double-Fiber Peanut

Chen Yufang, Wan Hongdan*, Chen Qian, Zhou Quan, Zhang Zuxing

College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract We proposed and demonstrated an optical fiber temperature sensor based on rare-earth-doped double-fiber peanut (RDDFP). We used fibers doped with rare-earth elements to fabricate a peanut-shaped structure that can realize high temperature sensitivity. The sensitivity of temperature to the cladding mode and core mode interference are used and the strong optothermal effect of rare-earth element ions is combined in the proposed structure. We have theoretically and experimentally investigated and compared the mode interference and thermosensitive effect of the erbium-doped double-fiber peanut (EDDFP) and ytterbium-doped double-fiber peanut (YDDFP). Experimental results show that comparing with a single-mode fiber peanut, RDDFP exhibits higher temperature sensitivity because of its stronger optothermal effect. The temperature sensitivity of EDDFP and YDDFP are 1286 pm/°C and -2343 pm/°C, respectively. The optical fiber temperature sensor based on RDDFP has the advantages of high sensitivity, high repeatability, all fiber, simple fabrication, compact structure, and so on. It has good application prospects in the fields of power systems, architecture, aerospace, and ocean development.

Key words sensors; erbium-doped double-fiber-peanut; ytterbium-doped double-fiber-peanut; high sensitivity; temperature sensing; optothermal effect

OCIS codes 280.4788; 060.2310; 060.2370

1 引言

光纤传感器以光波为载体, 光纤为媒质, 实现被测信号的传输与感知。与传统的传感器相比, 光纤

传感器具有信息容量大、抗电磁干扰、抗腐蚀、测量精度高、安全防爆、可绕性好等特点。光纤传感器的应用范围已渗透至国防军事、土木工程、能源环保、医疗健康^[1-3]等领域, 能够实现温度^[4]、折射率^[5]、

收稿日期: 2019-06-27; 修回日期: 2019-08-26; 录用日期: 2019-09-26

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(11704199)、江苏省研究生创新基金项目(SJKY19_0807)、南京邮电大学 STITP 项目(SYB2019011)

* E-mail: hdwan@njupt.edu.cn

速率^[6]、液位^[7]、湿度^[8]等物理量的测量。而光纤温度传感器的研究方兴未艾,具有广阔的发展前景。

目前,应用于温度测试的光纤传感器器件主要包括光纤光栅^[9-10]、光子晶体光纤^[11]、空芯结构光纤^[12]。其中,基于光纤马赫-曾德尔干涉仪结构级联布拉格光纤光栅的光纤温度传感器对光纤光栅刻写技术有较高的要求;而光子晶体光纤传感器制作成本较高,结构相对复杂,并且重复性有待提高。在提升光纤温度传感器测量灵敏度方面,已获得较大的研究进展。2012年,重庆大学 Wu 等^[13]提出采用标准通信用单模光纤制备双花生结,其温度传感灵敏度为 46 pm/°C;同年,Wu 等^[14]提出基于光纤花生结的 Michelson 干涉仪,该传感器温度灵敏度为 96 pm/°C;2016年,中国计量学院^[15]利用保偏光纤制备级联花生结光纤传感器,实现了 30 pm/°C 的温度灵敏度;2017年,天津理工大学^[16]提出基于多模光纤和标准单模光纤制备的花生结光纤传感器,温度灵敏度达到 60 pm/°C;2018年,深圳大学的谭展等^[17]提出一种由空芯光纤和光纤布拉格光栅级联而成的、可实现温度和应变双参数同时测量的光纤传感器,其中空芯光纤和光纤布拉格光栅对应的温度灵敏度分别为 24.55 pm/°C 和 12.76 pm/°C;2018年,燕山大学刘强等^[18]用单模光纤和少模光纤在入射端偏芯熔接、出射端对准熔接制作光纤温度传感器,温度灵敏度达到 158.06 pm/°C。然而,随着实际应用需求的不断提升,在实现具有结构简单、全光纤、灵敏度高的光纤温度传感器方面,仍具有实际重要意义。

本文首次提出并研究一种基于稀土光纤双花生

结(RDDFP)的光纤温度传感器。利用具有较强热光效应的掺铒和掺镱稀土光纤制备 RDDFP,增强双花生结内模式干涉对温度的敏感特性,实现对温度的高灵敏度感知与测量。实验结果表明,掺铒和掺镱 RDDFP 光纤传感器的灵敏度分别达到 1268 pm/°C 和 2343 pm/°C。本文基于 RDDFP 的光纤温度传感器具有灵敏度高、成本低、制作简单、结构紧凑等优势,在电力系统、建筑、航空航天以及海洋开发等领域具有潜在的应用价值。

2 传感器的结构与原理分析

2.1 传感器的工作原理

图 1 为基于 RDDFP 的温度传感器结构示意图。RDDFP 由两个级联的稀土光纤花生结(RDFP)构成,两个 RDFP 之间由一段稀土光纤连接,每个 RDFP 由两段稀土光纤制备得到的球形透镜组成。光场经第一段稀土光纤传输至第一个 RDFP。首先,光场以纤芯模的形式在光纤纤芯中进行传输(虚线箭头);光场通过第一个 RDFP 的第一个微球时,由于芯径不匹配,激发包层模(实线箭头);当纤芯模和包层模到达该 RDFP 的第二个微球时,在第二个微球与稀土光纤连接处,部分高阶包层模会重新耦合进入纤芯,然后沿光纤芯传播并同时与纤芯模发生干涉作用。由于不同的模式具有不同的相位,会产生模间相位差。第二个 RDFP 中的光场传输过程与第一个 RDFP 中的光场传输过程相同,经过级联的 RDFP 后,包层模功率占比增大。

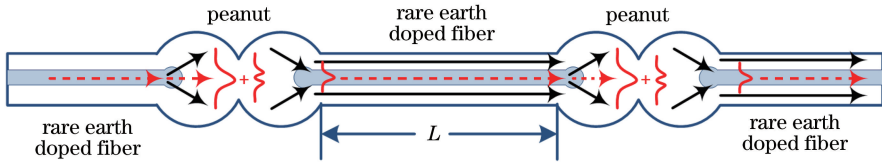


图 1 基于 RDDFP 的光纤温度传感器示意图

Fig. 1 Schematic of fiber temperature sensor based on RDDFP

图 1 中纤芯模式和包层模式在第二个 RDFP 中发生干涉后输出的光强可以表示为^[19]

$$I = I_{\text{core}} + I_{\text{clad}}^m + 2\sqrt{I_{\text{core}}I_{\text{clad}}^m} \cos \Delta\varphi, \quad (1)$$

式中: I_{core} 、 I_{clad}^m 分别为纤芯模式和 m 阶包层模式的光强。由于不同模式之间的传播常数不同,在传输相同距离之后,不同模式之间会产生相位差。RDFP 中激发到包层中的多阶包层模式参与干涉,不同阶数的包层模式对应不同的有效折射率,纤芯模式与 m 阶包层模式之间的相位差 $\Delta\varphi$ 为^[19]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda_0} = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad},m})L, \quad (2)$$

式中: λ_0 为中心波长; $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 、 $n_{\text{eff}}^{\text{clad},m}$ 分别为纤芯模式和 m 阶包层模式的有效折射率; Δn_{eff} 为二者有效折射率差; L 为两个 RDFP 之间的距离,即第二段稀土光纤的长度,或纤芯和包层模式的干涉长度。RDDFP 干涉光谱的自由光谱范围(FSR)可以表示为^[14]

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}}^m L}. \quad (3)$$

从(3)式可以看到,FSR 会随着干涉长度 L 的

增加而变大。当相位差 $\Delta\varphi = (2N + 1)\pi$ (N 为正整数) 时发生相消干涉, 干涉光谱处于波谷, 结合(2)式可得到此时波长为

$$\lambda_{\text{Dip}} = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2N + 1} \quad (4)$$

当外界温度发生变化时, 引起 Δn_{eff} 发生变化, 从而导致波长发生漂移。干涉光谱波长漂移量可以表示为^[14]

$$\Delta\lambda_{\text{Dip}} \approx 2\lambda_0 \left[\frac{1}{n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad},m}} \left(\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{core}}}{dT} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{clad},m}}{dT} \right) + \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \right] \Delta T \quad (5)$$

从(5)式可以看出, 该传感器的灵敏度与干涉距离 L 有关, 且呈非线性关系。当该传感器灵敏度达到最大时, 对应于一个最佳的干涉距离。则(5)式可简化为

$$\Delta\lambda_{\text{Dip}} \approx 2\lambda_0 \left[\frac{1}{\Delta n_{\text{eff}}} \delta + k \right] \Delta T \quad (6)$$

式中: δ 为光纤的热光系数; k 为光纤的热膨胀系数。温度的变化通过热光效应和热膨胀效应影响干涉光谱波长的变化。由(6)式可知, 本文提出的 RDDFP, 相比于普通单模光纤, 稀土光纤中的稀土掺杂离子使得光纤具有更强的热光效应, 能有效提高其温度传感灵敏度。同时通过实验发现, 掺铒和掺镱两种稀土掺杂光纤的热光系数是不同的, 对应传感器的温度灵敏度也不同, 后者高于前者。

2.2 理论建模与分析

图 2(a) 为 RDDFP 的几何结构图。图 2(b) 为使用 BPM 算法仿真模拟 RDDFP 中基模、包层模功率以及总能量大小随传输距离 z 增加的变化过程, 分别对应图 2(b) 中的 core-mode、clad-mode、power, 其中色度条代表能量强度的大小。光沿着 z 轴, 由下至上传输。设置 RDFP 周围折射率为 1.0, 光纤包层折射率为 1.456, 纤芯折射率为 1.461, 其中单模光纤包层直径为 $125 \mu\text{m}$, 纤芯直径为 $8 \mu\text{m}$, RDDFP 中的微球透镜直径设为 $200 \mu\text{m}$, RDDFP 总长度为 $3320 \mu\text{m}$, 入射光波长设为 1550 nm , 栅格尺寸设为 $0.51 \mu\text{m}$ 。从图 2(b) 可以看出, 基模传输至第一个 RDFP 附近时功率减小, 部分光场耦合至包层中继续传输, 高阶包层模功率增大; 经过第一个 RDFP 后, 部分高阶包层模耦合至纤芯中, 基模功率开始增大。当光经过第二个 RDFP 时, 再次激发高阶包层模, 基模功率再次减小; 经过第二个 RDFP 后, 较少的包层模再次耦合至纤芯, 使得基模功率重新增大。由于传输过程中有部分损耗, 光功率相较于最开始传输时有所减小。经过两个 RDFP 后, 激发的高阶包层模能量增加, 基模能量进一步降低。整个过程中总能量守恒, 保持不变。从图 2(b) 可以看出, 光场的干涉强度分布在两个 RDFP 之间, 在 $1400 \mu\text{m}$ 至 $2400 \mu\text{m}$ 范围内呈“蛇形”分布。

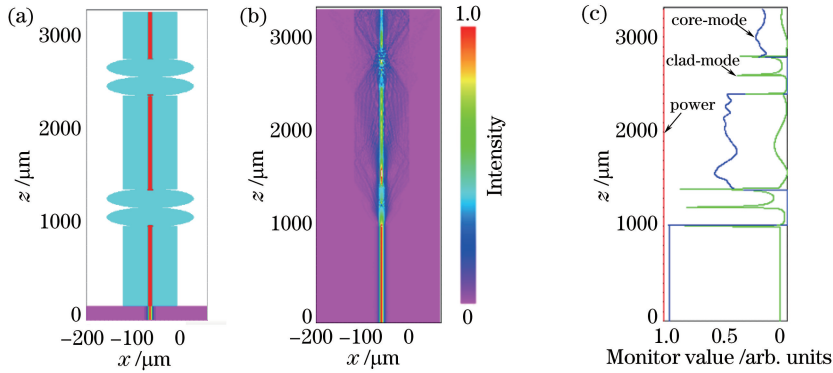


图 2 RDDFP 仿真图。(a) 几何结构图; (b) 纤芯和包层模式的光场传输模拟计算结果; (c) 纤芯模、包层模功率以及总能量随传输距离的变化关系

Fig. 2 Simulation of RDDFP. (a) Geometric structure design; (b) simulation results of mode field propagation of core-mode and cladding-mode in the RDDFP; (c) relationship between power of core-mode, power of cladding-mode, and total energy of RDDFP and distance of transmission

图 3 是利用模拟计算 RDDFP 中光场干涉强度与干涉长度 L 的关系。结果表明, 随着 L 的增加, 干涉强度的变化呈正弦分布。存在一个最佳值 L , 在 2.13 cm 附近, 相应的干涉强度达到最大值。仿真结果与实验结果具有一致性, 都存在一个最佳的

干涉距离 L , 通过仿真, 有效地简化了该温度传感器的制作过程。

2.3 实验装置与传感器结构

图 4 为光纤温度传感实验装置示意图。宽带光源 (BBS, 波长范围为 $1250 \sim 1650 \text{ nm}$) 通过左侧的

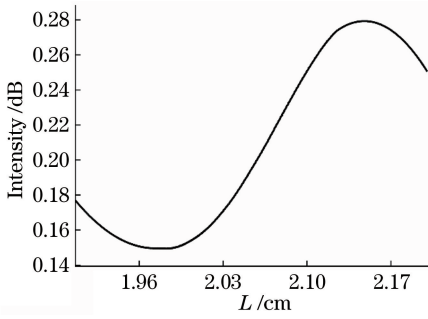


图 3 干涉强度随干涉长度 L 变化的模拟

Fig. 3 Simulation of relation between interference intensity and interference length L

稀土光纤输入 RDDFP。将整个 RDDFP 传感单元置于微型精密可调恒温控制器中,控制其温度从室温变化至 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由光谱仪(OSA, YOKOGAWA AQ6370D)实时记录传感器右侧输出的干涉光谱,实验中光谱分析仪的分辨率设置为 0.02 nm 。图 4 的下部分为实验制备得到的 RDDFP 显微镜实物照片,实验中采用光纤熔接机电弧放电的方式制作 RDDFP,熔接机放电时间和电流大小是决定 RDDFP 面形的关键参数。具体步骤为:对一段洁净的稀土光纤进行端面垂直切割处理后放置于熔接机的 V 型槽内;调节好光纤在熔接机中的位置,设置熔接机的放电电流大小和放电时间后进行电弧放电,该段光纤由于表面张力效应在其端面附近熔融成球形透镜;用同样的方法制备另一个球形透镜,将两个球形透镜同时放置于熔接机中,调整二者的位置和间距,再次进行放电熔接,最终得到单个 RDDFP;最后将两个 RDDFP 熔接起来,构成两个光纤花生结级联的 RDDFP。实验中分别制备了掺铒光

纤双花生结(EDDFP)和掺镱光纤双花生结(YDDFP)两种结构。通过高分辨率显微镜测试得到,EDDFP 的结构参数为 $l_1 \approx 201.46\text{ }\mu\text{m}$, $l_2 \approx 201.48\text{ }\mu\text{m}$, $l_3 \approx 205.33\text{ }\mu\text{m}$, $l_4 \approx 203.77\text{ }\mu\text{m}$, $L \approx 2.02\text{ cm}$; YDDFP 的结构参数为 $l_1 \approx 202.9\text{ }\mu\text{m}$, $l_2 \approx 201.89\text{ }\mu\text{m}$, $l_3 \approx 202.2\text{ }\mu\text{m}$, $l_4 \approx 202.8\text{ }\mu\text{m}$, $L \approx 2.00\text{ cm}$ 。

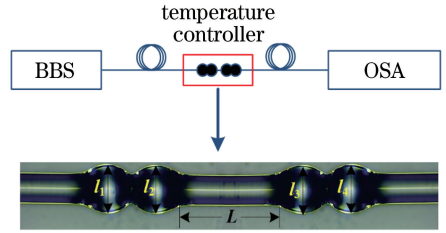


图 4 光纤温度传感器实验系统装置

Fig. 4 Experimental setup of proposed fiber temperature sensor

3 实验结果与分析

3.1 不同掺杂类型对 RDDFP 传感特性的影响

将 EDDFP 平直放置于图 4 所示的可调恒温控制器中,在保证其他条件不变的情况下,温度变化范围为 $22\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行一次测量和记录。在整个温度测试范围内,线性度最高的区间位于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $39\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围。图 5(a)所示为在温度升高情况下 EDDFP 干涉谱的波长漂移测试结果。图 5(b)为波长的漂移量与温度的变化关系,其中离散点为实验测量值,直线为线性拟合曲线。从图 5 可以看出,温度上升导致透射光谱向长波方向漂移(红移),拟合曲线的斜率,即 EDDFP 传感器的灵敏度为 $890\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,线性拟合度为 0.996 。

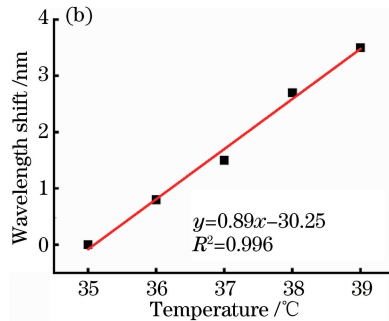
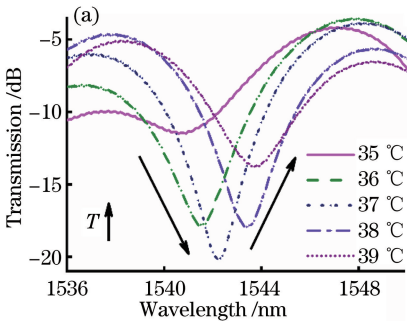


图 5 EDDFP 干涉光谱随温度变化的实验结果。(a)不同温度下的干涉光谱图;(b)波长漂移量和温度的关系

Fig. 5 Experimental results of interference spectra of EDDFP varying with temperature. (a) Interference spectra measured at different temperatures; (b) relationship between wavelength shift and temperature

将 YDDFP 放置于可调恒温控制器中,保证其他条件不变的情况下,温度变化范围也设置为 $22\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,每升高 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行一次测量和记录。实验发

现, $25\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, YDDFP 具有较高的线性和灵敏度。图 6(a)所示为在温度升高情况下 YDDFP 干涉谱的波长漂移测试结果。图 6(b)所示

为波长的漂移量与温度的变化关系,其中离散点为实验测量值,直线为线性拟合曲线。从图 6 可以看出,温度上升导致透射光谱向短波方向漂移(蓝移);

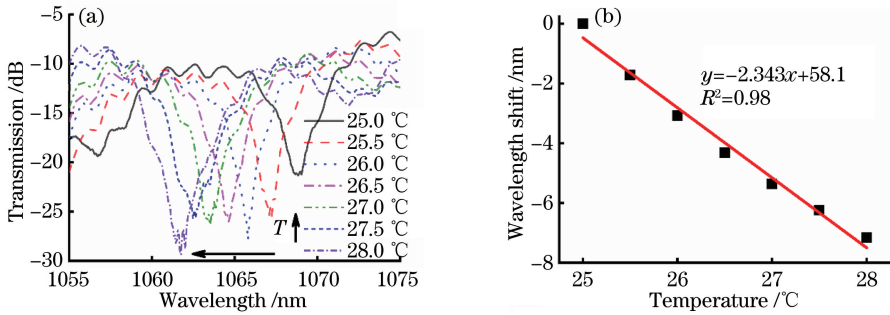
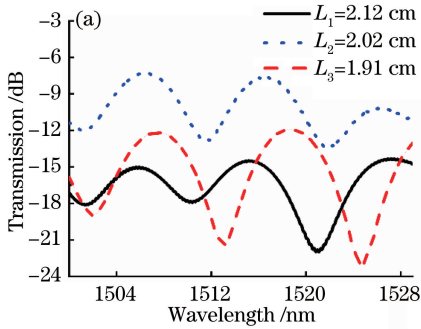


图 6 YDDFP 干涉光谱随温度变化的实验结果。(a)不同温度下的干涉光谱图;(b)波长漂移量和温度的关系
Fig. 6 Experimental results of interference spectra of YDDFP varying with temperature. (a) Interference spectra measured at different temperatures; (b) relationship between wavelength shift and temperature

3.2 不同干涉长度 L 对 RDDFP 温度传感特性的影响

由(4)式可知,不同的干涉长度 L 对 RDDFP 的灵敏度有着直接的影响。以 EDDFP 为例,制作三组不同干涉长度 L 、花生结直径 D 都为 $203 \mu\text{m}$ 左



右的 EDDFP,将它们分别放置在图 3 所示的可调恒温控制器中进行温度传感测试。图 7(a)所示为实验测得的三组干涉长度的 EDDFP 干涉谱。图 7(b)为这三组干涉长度的 EDDFP 温度传感灵敏度拟合曲线。

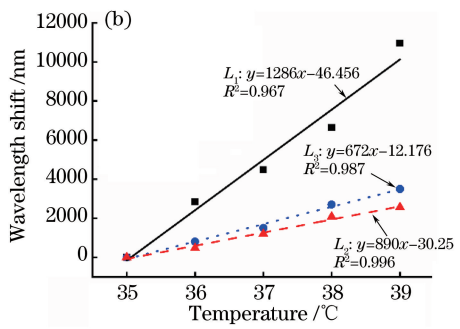


图 7 不同干涉长度 L 下 EDDFP 传感器特性实验测试结果。(a)在相同温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 下测得的干涉谱;(b)温度灵敏度
Fig. 7 Experimental results of EDDFP sensor for different L . (a) Interference spectra measured at the same temperature of $25 \text{ }^\circ\text{C}$; (b) temperature sensitivity

为了便于对比,在表 1 中列出 EDDFP 实验测得的干涉光谱参数和灵敏度。通过对比发现, L 对 RDDFP 干涉谱的 FSR、消光比以及温度灵敏度有直接的影响。

表 1 不同干涉长度 L 的 EDDFP 实验测得的干涉光谱参数和灵敏度

Table 1 Measured interference spectral parameters and sensitivity of EDDFP for different interference lengths

No.	L /cm	Extinction ratio /dB	Free spectral range /nm	Sensitivity / ($\text{pm}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
1	2.10	3	9.1	1286
2	2.02	6	10.4	890
3	1.90	9	11.21	672

从表 1 可以看出,随着干涉长度 L 的增大,FSR 和消光比减小,这和理论分析部分结果一致。同时也可以看出, L 越大,RDDFP 的灵敏度也越大。然而当干涉长度太长时,RDDFP 的损耗会开始增大。实验过程中 L 的长度需要精确控制,与理论分析结果一致,对于一定的稀土光纤双花生结传感器结构,存在一个最佳的 L 值。可以看到,长度为 2.10 cm 的 EDDFP 的温度灵敏度达到了 $1286 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

4 结 论

本文提出并研究了基于 RDDFP 的高灵敏度光纤温度传感器。采用掺铒和掺镱两种稀土光纤制备

RDDFP,利用其强热光效应,有效提高了温度传感灵敏度。理论和实验研究表明,对于 EDDFP,其干涉谱随温度的升高发生红移,温度灵敏度可达 1286 pm/°C。对于 YDDFP,其干涉谱随温度的升高发生蓝移,温度灵敏度可达 -2343 pm/°C,皆表现出较高的灵敏度和线性度。

参 考 文 献

- [1] Layeghi A, Latifi H, Frazão O. Magnetic field sensor based on nonadiabatic tapered optical fiber with magnetic fluid[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(19): 1904-1907.
- [2] Lei X Q, Chen J J, Shi F Q, et al. Magnetic field fiber sensor based on the magneto-birefringence effect of magnetic fluid[J]. Optics Communications, 2016, 374: 76-79.
- [3] Gao L, Zhu T, Deng M, et al. Long-period fiber grating within D-shaped fiber using magnetic fluid for magnetic-field detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(6): 2095-2104.
- [4] Koo K P, Kersey A D. Bragg grating-based laser sensors systems with interferometric interrogation and wavelength division multiplexing[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1243-1249.
- [5] Kim Y J, Paek U C, Lee B H. Measurement of refractive-index variation with temperature by use of long-period fiber gratings[J]. Optics Letters, 2002, 27(15): 1297-1299.
- [6] Wang D Y, Sun M M, Jin Y X, et al. Simultaneous measurement of curvature and temperature based on optical fiber sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(11): 1106004.
王栋远, 孙明明, 金永兴, 等. 同时测量温度和曲率的光纤传感器[J]. 光子学报, 2015, 44(11): 1106004.
- [7] Sun M M, Jin Y X, Dong X Y. All-fiber Mach-Zehnder interferometer for liquid level measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(7): 3984-3988.
- [8] Wang J Q, Li Z, Zhao L, et al. A differential pressure principle based mine wind velocity sensor using fiber Bragg grating [C]//2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICO CN), August 7-10, 2017, Wuzhen, China. New York: IEEE, 2017: 17466138.
- [9] Feng D Y, Qiao X G, Albert J. Off-axis ultraviolet-written fiber Bragg gratings for directional bending measurements[J]. Optics Letters, 2016, 41(6): 1201-1204.
- [10] Zhou Q, Zhang W G, Chen L, et al. Bending vector sensor based on a sector-shaped long-period grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(7): 713-716.
- [11] Zu P, Chan C C, Lew W S, et al. Temperature-insensitive magnetic field sensor based on nanoparticle magnetic fluid and photonic crystal fiber[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(2): 491-498.
- [12] Chen L H, Ang X M, Chan C C, et al. Layer-by-layer (chitosan/polystyrene sulfonate) membrane-based Fabry-Perot interferometric fiber optic biosensor[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2012, 18(4): 1457-1464.
- [13] Wu D, Zhu T, Chiang K S, et al. All single-mode fiber Mach-Zehnder interferometer based on two peanut-shape structures[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(5): 805-810.
- [14] Wu D, Zhu T, Liu M. A high temperature sensor based on a peanut-shape structure Michelson interferometer[J]. Optics Communications, 2012, 285(24): 5085-5088.
- [15] Bian J C, Lang T T, Kong W, et al. A polarization maintaining fiber sensor for simultaneous measurement of temperature and strain[J]. Optik, 2016, 127(20): 10090-10095.
- [16] Cao Y, Zhao Y, Tong Z R, et al. Magnetic field sensor based on peanut-shape structure and multimode fiber[J]. Optoelectronics Letters, 2017, 13(3): 184-187.
- [17] Tan Z, Liao C R, Liu S, et al. Simultaneous measurement sensors of temperature and strain based on hollow core fiber and fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1206007.
谭展, 廖常锐, 刘申, 等. 基于空芯光纤和光纤布拉格光栅的温度应变同时测量传感器[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1206007.
- [18] Liu Q, Bi W H, Wang S W, et al. Few-mode fiber temperature sensor based on interference between LP₀₁ and LP₁₁ modes[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0206001.
刘强, 毕卫红, 王思文, 等. 基于 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式干涉的少模光纤温度传感器[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0206001.
- [19] Sun M M, Jin Y X, Dong X Y. All-fiber Mach-Zehnder interferometer for liquid level measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(7): 3984-3988.