

基于 LP_{01} 和 LP_{11} 模式干涉的少模光纤温度传感器

刘强^{1,2}, 毕卫红^{1,2*}, 王思文^{1,2}, 吕欣^{1,2}, 付兴虎^{1,2}, 付广伟^{1,2}

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 提出了一种基于 LP_{01} 和 LP_{11} 模式干涉的少模光纤温度传感器, 利用单模光纤(SMF)和少模光纤(FMF)在入射端偏芯熔接、出射端对准熔接制作而成。利用标量法对 FMF 建立理论模型, 通过光场的电磁边界连续条件推导出了 FMF 的特征方程, 并通过特征方程数值求解详细分析了 FMF 中的传输模式; 通过有限元分析软件对上述理论模型仿真计算, 验证了理论计算结果的正确性; 利用制作的传感器进行温度传感实验, 并对不同温度下的传输光谱进行傅里叶变换, 对参与干涉的两种模式进行了分析。根据光纤的热光效应, 建立温度传感模型, 分析计算该传感器的温度灵敏度, 实验结果与理论计算一致。利用上述特性制作的传感器进行温度测量, 当温度发生变化时, 干涉峰发生漂移, 在 25.3~77.3 °C 范围内, 传感器长度为 16 mm 时, 温度灵敏度为 158.06 pm/°C。该传感器能广泛应用于工业生产、生物医学等领域的温度测量。

关键词 光纤光学; 传输模式; 有效折射率; 马赫-曾德尔; 少模光纤; 温度传感器

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0206001

Few-Mode Fiber Temperature Sensor Based on Interference Between LP_{01} and LP_{11} Modes

Liu Qiang^{1,2}, Bi Weihong^{1,2}, Wang Siwen^{1,2}, Lü Xin^{1,2}, Fu Xinghu^{1,2}, Fu Guangwei^{1,2}

¹ School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

² The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Heibei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract A few-mode fiber (FMF) temperature sensor based on the interference between LP_{01} and LP_{11} modes is proposed. The sensor is fabricated with an FMF, of which one end is spliced to a lead-in single-mode fiber (SMF) with small lateral core-offsets and the other is spliced to a lead-out SMF with alignment. Firstly, the theoretical model of FMF is established with the scalar method and the characteristic equation of FMF is derived by the light field of continuous electromagnetic boundary condition. Through the numerical solution of the characteristic equation, the transmission mode of FMF is analyzed in detail. Then, the theoretical results are verified through the finite element analysis. Finally, the sensor is used for temperature sensing experiments. Through the Fourier transform of the transmission spectra at different temperatures, the two modes of interference are analyzed. According to the thermo optic effect, the temperature sensing model is established. The temperature sensitivity of the sensor is analyzed and calculated, which is consistent with the experimental results. The temperature measurement experiment is carried out with the proposed sensor, and the results show that when the temperature changes, the interference peak drifts, and the temperature sensitivity of a 16-mm-long sensor is 158.06 pm/°C at 25.3-77.3 °C. The temperature sensor can be widely used in industrial production, biomedical and other fields.

Key words fiber optics; transmission mode; effective refractive index; Mach-Zehnder; few-mode fiber; temperature sensor

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.2400

收稿日期: 2017-04-20; 收到修改稿日期: 2017-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(61675176, 61475133, 61575170, 61640408)、河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(16961701D)、燕山大学“新锐工程”人才支持计划

作者简介: 刘强(1981—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: ysu2006@ysu.edu.cn

导师简介: 毕卫红(1960—), 女, 博士, 教授, 主要从事特种光纤传感方面的研究。

E-mail: whbi@ysu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

光纤传感器由于重量轻、体积小、抗电磁干扰能力强、低成本等优点,广泛应用于折射率、温度、气体浓度、应力、液位等环境参量的测量。各国学者不断地探索新结构、新方法、新机理的传感器,如单模-多模-单模光纤传感器^[1]、锥形光纤传感器^[2-3]、球形光纤传感器^[4-5]、错位熔接光纤传感器^[6]、法布里珀-罗光纤传感器^[7-8]、光纤光栅传感器^[9-10]等。目前,光纤温度传感器主要包括两类,一是基于微加工技术制作的光纤光栅型温度传感器^[11-12];二是基于熔接技术制作的异芯光纤级联型温度传感器^[13-16]。与光栅型传感器相比,级联型传感器具有更高的温度灵敏度,且不需要昂贵的加工设备,结构简单,更易制备。如李强等^[17]提出了一种基于单模-多模-单模结构的光纤传感器,可用于振动、应力及温度检测;赵娜等^[18]制作了一种基于粗锥级联的温度传感器,灵敏度为 115 pm/°C;Su 等^[19]设计了一种熔接点为球状的光纤传感器,可用于温度和折射率的测量,灵敏度分别为 131 pm/°C 和 111 nm/RIU(RIU 为单位折射率)。但这些级联型传感器主要利用包层模式和基模干涉形成的谐振峰对环境温度进行传感测量,激发的包层模式数目较多,不利于控制和分析;拉锥或腐蚀后光纤尺寸较小,易损坏;错位熔接时 2 个熔接点错位量难以一致。

少模光纤(FMF)传感器作为一种新型的光纤传感器,具有结构简单、模式个数有限、有效面积大、模式耦合可控等优点。传感器利用 FMF 中的高阶模式作为传感臂,随着外界环境参数的变化,高阶模传播常数发生改变,使干涉光谱发生漂移,通过分析干涉光谱,即可得到外界环境变化信息。近年来,基于 FMF 的光纤器件受到广泛关注和研究,Wang 等^[20]研究了一种 FMF 两端与单模光纤(SMF)错位级联的传感器,温度灵敏度为 17.6 pm/°C;邓靖等^[21]提出了基于 FMF 长周期光栅高灵敏度扭矩传感器,利用纤芯模式 LP₀₁ 和 LP₁₁ 耦合形成的谐振峰进行传感测量,扭转灵敏度为 0.528 nm/(rad·m⁻¹);张珊等^[22]设计了一种温度不敏感的应变 FMF 传感

器,有效改善了温度和应变的交叉敏感问题。

为了提高温度灵敏度,简化传感器结构,克服干涉模式多、激发难以控制的问题,本文通过建立 FMF 模式传输理论模型,对纤芯模式进行了详细分析,并利用 COMSOL 有限元分析软件验证了计算结果的正确性,根据所建立的理论模型,提出了一种基于 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式干涉的 FMF 温度传感器,并对其温度传感特性进行了实验测量和理论分析。

2 模式传输理论模型

少模光纤是一种仅能传输几个模式的光纤,其传导的模式数量介于单模光纤和多模光纤之间,相比单模光纤仅能支持基模 LP₀₁,FMF 最少可以传输 LP₀₁ 和 LP₁₁ 两个模式^[23]。为了增大模场面积的同时减少传导模式数量,FMF 芯区结构分为多阶梯阶跃型、渐变型和带有外下陷包层的渐变型折射率分布等多种结构^[24]。本文所研究的 FMF 结构为多阶梯阶跃型,折射率分布如图 1 所示。

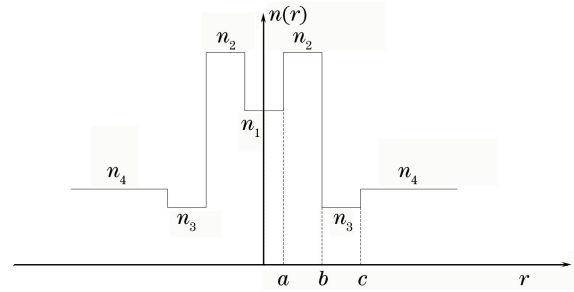


图 1 FMF 折射率分布

Fig. 1 Refractive index profile of the FMF

将光纤看作纤芯、第 1 内包层、第 2 内包层和外包层的 4 层结构,最内层为纤芯,半径为 a ,折射率为 n_1 ;第 1 内包层半径为 b ,折射率为 n_2 ;第 2 内包层半径为 c ,折射率为 n_3 ;外包层折射率为 n_4 ,该光纤折射率分布可表示为

$$n(r) = \begin{cases} n_1, & 0 < r < a \\ n_2, & a < r < b \\ n_3, & b < r < c \\ n_4, & r > c \end{cases} \quad (1)$$

由波动方程,采用标量近似法,光纤中的电场 e_y 可表示为^[25]

$$e_y = \begin{cases} A_1 J_m(U_1 r/a) \exp(im\varphi), & r < a \\ [A_2 J_m(U_2 r/a) + B_1 Y_m \times (U_2 r/a)] \exp(im\varphi), & a < r < b \\ [A_3 I_m(W_3 r/a) + B_2 K_m \times (W_3 r/a)] \exp(im\varphi), & b < r < c \\ A_4 K_m(W_4 r/a) \exp(im\varphi), & r > c \end{cases} \quad (2)$$

式中 $A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2$ 分别为常系数, J_m, Y_m 分别为 m 阶第一类贝塞尔函数和第二类贝塞尔函数, I_m, K_m 分别为 m 阶第一类虚宗量贝塞尔函数和第二类虚宗量贝塞尔函数。 $U_1 = a \sqrt{k^2 n_1^2 - \beta^2}$ 、 $U_2 = a \sqrt{k^2 n_2^2 - \beta^2}$ 、 $W_3 = a \sqrt{\beta^2 - k^2 n_3^2}$ 、 $W_4 = a \sqrt{\beta^2 - k^2 n_4^2}$ 、 $\beta = n_{\text{eff}} k$ 、 $k = 2\pi/\lambda$ 、 n_{eff} 为光纤有效折射率, λ 为自由空间波长。

根据光域中麦克斯韦方程组所推导的波动方程, 可求得 e_y 与 e_z 之间的关系。经推导, e_z 表达式为

$$e_z = \begin{cases} A_1 \frac{i}{\beta} \exp(im\varphi) \left[\frac{U_1 \sin \varphi}{a} J'_m \left(\frac{U_1}{a} r \right) + i \frac{m \cos \varphi}{r} J_m \left(\frac{U_1}{a} r \right) \right], & r < a \\ \frac{i}{\beta} \exp(im\varphi) \left\{ \frac{U_2 \sin \varphi}{a} \left[A_2 J'_m \left(\frac{U_2}{a} r \right) + B_1 Y'_m \left(\frac{U_2}{a} r \right) \right] + \frac{im \cos \varphi}{r} \left[A_2 J_m \left(\frac{U_2}{a} r \right) + B_1 Y_m \left(\frac{U_2}{a} r \right) \right] \right\}, & a < r < b \\ \frac{i}{\beta} \exp(im\varphi) \left\{ \frac{W_3 \sin \varphi}{a} \left[A_3 I'_m \left(\frac{W_3}{a} r \right) + B_2 K'_m \left(\frac{W_3}{a} r \right) \right] + \frac{im \cos \varphi}{r} \left[A_3 I_m \left(\frac{W_3}{a} r \right) + B_2 K_m \left(\frac{W_3}{a} r \right) \right] \right\}, & b < r < c \\ A_4 \frac{i}{\beta} \exp(im\varphi) \left[\frac{W_4 \sin \varphi}{a} K'_m \left(\frac{W_4}{a} r \right) + i \frac{m \cos \varphi}{r} K_m \left(\frac{W_4}{a} r \right) \right], & r > c \end{cases} \quad (3)$$

利用 e_y 和 e_z 两分量在 $r=a, b, c$ 处的边界条件, 可得系数矩阵 \mathbf{D} 为

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} J_m(U_1) & -J_m(U_2) & 0 & 0 & -Y_m(U_2) & 0 \\ 0 & J_m\left(\frac{U_2}{a}b\right) & -I_m\left(\frac{W_3}{a}b\right) & 0 & Y_m\left(\frac{U_2}{a}b\right) & -K_m\left(\frac{W_3}{a}b\right) \\ 0 & 0 & I_m\left(\frac{W_3}{a}c\right) & -K_m\left(\frac{W_4}{a}c\right) & 0 & K_m\left(\frac{W_3}{a}c\right) \\ U_1 J'_m(U_1) & -U_2 J'_m(U_2) & 0 & 0 & -U_2 Y'_m(U_2) & 0 \\ 0 & U_2 J'_m\left(\frac{U_2}{a}b\right) & -W_3 I'_m\left(\frac{W_3}{a}b\right) & 0 & U_2 Y'_m\left(\frac{U_2}{a}b\right) & -W_3 K'_m\left(\frac{W_3}{a}b\right) \\ 0 & 0 & W_3 I'_m\left(\frac{W_3}{a}c\right) & -W_4 K'_m\left(\frac{W_4}{a}c\right) & 0 & W_3 K'_m\left(\frac{W_3}{a}c\right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

由贝塞尔函数的递推公式

$$\begin{cases} J'_m(U) = -m/U J_m(U) + J_{m-1}(U) \\ K'_m(W) = -m/W K_m(W) - K_{m-1}(W) \\ Y'_m(U) = -m/U Y_m(U) + Y_{m-1}(U) \\ I'_m(W) = -m/W I_m(W) - I_{m-1}(W) \end{cases} \quad (5)$$

可知, 齐次方程如果有非零解, 则其系数矩阵 \mathbf{D} 的行列式必须为零, 将(5)式代入(4)式, 当 $m=0$ 时, 特征方程为

$$\begin{vmatrix} J_0(U_1) & -J_0(U_2) & 0 & 0 & -Y_0(U_2) & 0 \\ 0 & J_0\left(\frac{U_2}{a}b\right) & -I_0\left(\frac{W_3}{a}b\right) & 0 & Y_0\left(\frac{U_2}{a}b\right) & -K_0\left(\frac{W_3}{a}b\right) \\ 0 & 0 & I_0\left(\frac{W_3}{a}c\right) & -K_0\left(\frac{W_4}{a}c\right) & 0 & K_0\left(\frac{W_3}{a}c\right) \\ U_1 J_{-1}(U_1) & -U_2 J_{-1}(U_2) & 0 & 0 & -U_2 Y_{-1}(U_2) & 0 \\ 0 & U_2 J_{-1}\left(\frac{U_2}{a}b\right) & W_3 I_{-1}\left(\frac{W_3}{a}b\right) & 0 & U_2 Y_{-1}\left(\frac{U_2}{a}b\right) & W_3 K_{-1}\left(\frac{W_3}{a}b\right) \\ 0 & 0 & -W_3 I_{-1}\left(\frac{W_3}{a}c\right) & W_4 K_{-1}\left(\frac{W_4}{a}c\right) & 0 & -W_3 K_{-1}\left(\frac{W_3}{a}c\right) \end{vmatrix} = 0, \quad (6)$$

当 $m=1$ 时, 特征方程化简为

$$\begin{vmatrix} J_1(U_1) & -J_1(U_2) & 0 & 0 & -Y_1(U_2) & 0 \\ 0 & J_1\left(\frac{U_2}{a}b\right) & -I_1\left(\frac{W_3}{a}b\right) & 0 & Y_1\left(\frac{U_2}{a}b\right) & -K_1\left(\frac{W_3}{a}b\right) \\ 0 & 0 & I_1\left(\frac{W_3}{a}c\right) & -K_1\left(\frac{W_4}{a}c\right) & 0 & K_1\left(\frac{W_3}{a}c\right) \\ P_{41} & P_{42} & 0 & 0 & P_{45} & 0 \\ 0 & P_{52} & P_{53} & 0 & P_{55} & P_{56} \\ 0 & 0 & P_{63} & P_{64} & 0 & P_{66} \end{vmatrix} = 0, \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} P_{41} &= -J_1(U_1) + U_1 J_0(U_1), & P_{42} &= J_1(U_2) - U_2 J_0(U_2), & P_{45} &= Y_1(U_2) - U_2 Y_0(U_2), \\ P_{52} &= \frac{-a}{b} J_1\left(\frac{U_2}{a}b\right) + U_2 J_0\left(\frac{U_2}{a}b\right), & P_{53} &= \frac{a}{b} I_1\left(\frac{W_3}{a}b\right) + W_3 I_0\left(\frac{W_3}{a}b\right), & P_{55} &= \frac{-a}{b} Y_1\left(\frac{U_2}{a}b\right) + U_2 Y_0\left(\frac{U_2}{a}b\right), \\ P_{56} &= \frac{a}{b} K_1\left(\frac{W_3}{a}b\right) + W_4 K_0\left(\frac{W_3}{a}b\right), & P_{63} &= \frac{-a}{c} I_1\left(\frac{W_3}{a}c\right) - W_3 I_0\left(\frac{W_3}{a}c\right), & P_{64} &= \frac{a}{c} K_1\left(\frac{W_4}{a}c\right) + W_4 K_0\left(\frac{W_4}{a}c\right), \\ P_{66} &= \frac{-a}{b} K_1\left(\frac{W_3}{a}c\right) - W_3 K_0\left(\frac{W_3}{a}c\right). \end{aligned}$$

如果对上述超越方程求解,需要观察根的取值范围,令 $f(n_{\text{eff}}) = |D|$, 选用参数 $n_1 = 1.4665, n_2 = 1.4667, n_3 = 1.4585, n_4 = 1.4597, a = 2 \mu\text{m}, b = 5.5 \mu\text{m}, c = 19 \mu\text{m}$ 作为光纤模型,使用 Mathematica 绘制波长为 1550 nm , $m = 0$ 和 $m = 1$ 时的 n_{eff} 和 $f(n_{\text{eff}})$ 的关系曲线如图 2 所示。

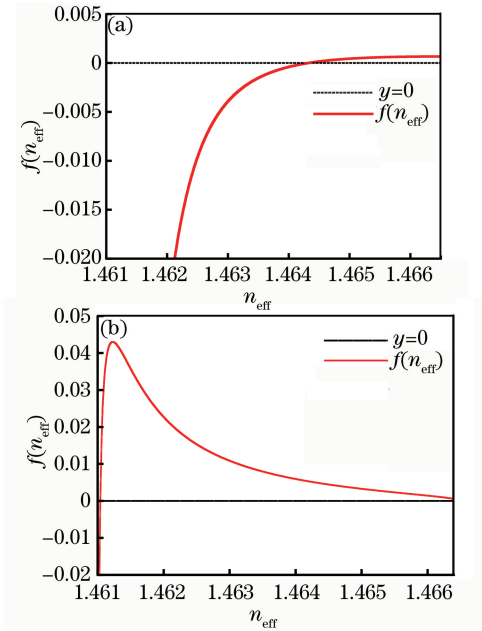


图 2 函数 $f(n_{\text{eff}})$ 图像。(a) $m = 0$; (b) $m = 1$

Fig. 2 Function chart of $f(n_{\text{eff}})$. (a) $m = 0$; (b) $m = 1$

当 $m = 0$ 时,曲线与 $y = 0$ 有且仅有一个交点,经过数值求解,其值为 1.46432 ;当 $m = 1$ 时,曲线与 $y = 0$ 也仅有一个交点,其值为 1.46105 。因此,该光纤仅能传输 LP_{01} 、 LP_{11} 模式,其有效折射率 n_{eff} 分别

为 1.46432 、 1.46105 。

利用 COMSOL 有限元分析软件对上述理论计算结果进行验证,当选取的建模参数与上述模型相同时,得到模场分布如图 3 所示。

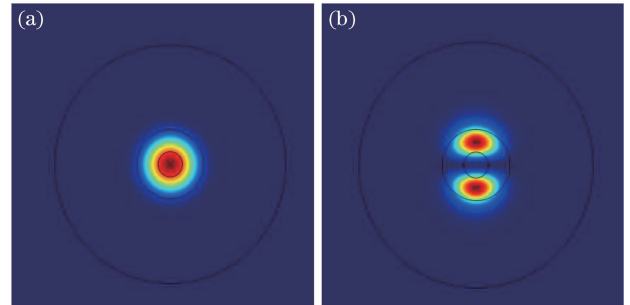


图 3 模场分布。(a) LP_{01} 模式; (b) LP_{11} 模式

Fig. 3 Mode distribution. (a) LP_{01} mode; (b) LP_{11} mode

由图 3 可得, LP_{01} 、 LP_{11} 模式有效折射率分别为 1.46432 、 1.46105 , 与标量近似法计算得到的理论计算值一致。利用 FMF 这种特性,制作了基于 LP_{01} 和 LP_{11} 模式干涉的马赫-曾德尔传感器,并研究其温度传感特性。

3 实验结果分析及讨论

3.1 传感器的制备与工作原理

传感器由 FMF 与 SMF 偏芯熔接而成,结构如图 4 所示。

具体制作方法如下:将一段 FMF 剥去涂覆层,截取长度为 16 mm ,用酒精将光纤端面擦拭干净,熔接机调成手动熔接模式,把 FMF 与出射端 SMF 对准熔接,出射端 SMF 与光谱仪连接,入射端 SMF

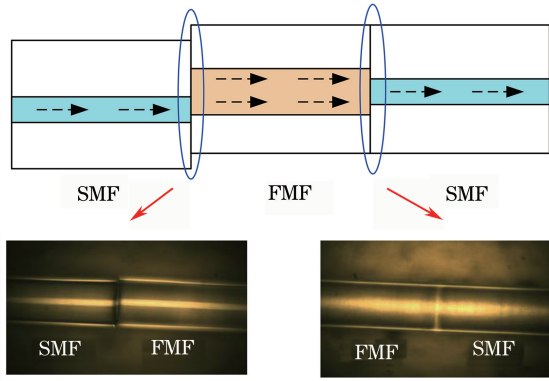


图 4 传感器结构图

Fig. 4 Configuration of the sensor

与宽带光源连接,通过熔接机(古河公司, S178A 型)调整 SMF 与 FMF 的错位位置,得到最大消光比,此时错位量约 $10 \mu\text{m}$,对错位点进行熔接,放电电流为 150 mA 。将制作好的传感头固定在洁净的载玻片上,并使其处于拉直状态。

当入射光从单模光纤经过偏芯结构进入 FMF 时,激发出 FMF 纤芯中的基模和高阶模,经过第 2 熔接点进入 SMF 时,两种模式耦合。当基模和高阶模存在一定的光程差,并满足相位匹配条件时,两种模式会发生干涉,两种模式在出射端 SMF 耦合时,测量的光强为^[26]

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[(2\pi\Delta n_{\text{eff}}L)/\lambda], \quad (8)$$

式中 I_1 和 I_2 分别为沿 FMF 传输的基模和高阶模的光强, I 为出射端的光强, L 为 FMF 长度, Δn_{eff} 为基模和高阶模的有效折射率之差。由(8)式可知,两路光传输的相位差为

$$\Delta\varphi = (2\pi\Delta n_{\text{eff}}L)/\lambda. \quad (9)$$

当 $\Delta\varphi$ 为 $(2m+1)\pi$ 时,出现干涉极小,第 m 阶峰值波长为

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2m+1}. \quad (10)$$

两个相邻干涉极小的波长间隔可表示为

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}}L}. \quad (11)$$

当外界温度发生变化时,由(10)式对温度求微分可知,传感器温度灵敏度为

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \frac{\lambda_m}{\Delta n_{\text{eff}}L} \left(\Delta n_{\text{eff}} \frac{\partial L}{\partial T} + L \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}}{\partial T} \right). \quad (12)$$

由热膨胀系数的定义 $\alpha = \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T}$, 基模和高阶模

有效折射率差的热光系数的定义 $\epsilon = \frac{1}{\Delta n_{\text{eff}}} \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}}{\partial T}$,

(12)式简化为

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \lambda_m (\alpha + \epsilon). \quad (13)$$

3.2 温度传感实验及分析

用酒精将光纤传感器和载玻片擦拭干净,使传感器处于自然平直状态,FMF 两端用 AB 胶牢固粘贴在载玻片上,固定过程中 2 个粘贴点距离略大于 FMF 长度,避免 AB 胶接触到熔接点。将制备好的光纤传感器放入温控箱内,两端分别连接宽带光源和光谱仪,实验装置如图 5 所示。实验中选用的放大自发辐射光源(上海飞秒光电有限公司, ASE3700 型)的波长范围为 $1520 \sim 1610 \text{ nm}$,最大输出光功率为 40 mW ;光谱仪(OSA,日本横河, AQ6375 型)的波长响应范围为 $1200 \sim 2400 \text{ nm}$,波长分辨率设置为 0.1 nm ;温控箱(WHL-30B 型)的控温精度为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

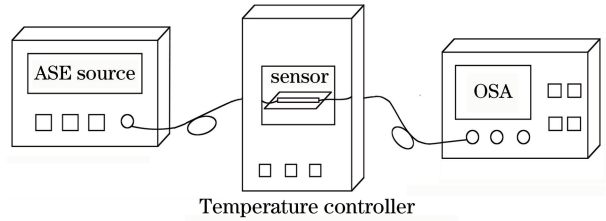


图 5 温度传感实验系统

Fig. 5 Experimental setup used in the temperature sensing measurement

实验过程中,调节温控箱设定温度预设值,温度达到预设值后稳定 30 min ,记录实验数据,如此反复进行,当温控箱温度从 $25.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 升温到 $77.3 \text{ }^\circ\text{C}$,测量其传输光谱,得到不同温度下传感器测量光谱,如图 6 所示。

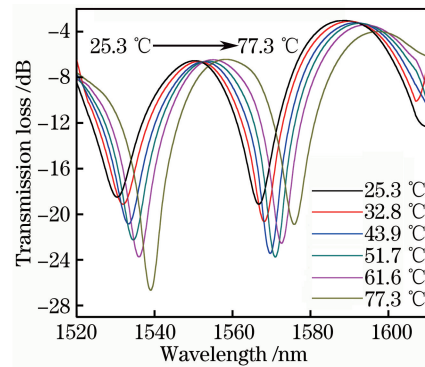


图 6 传感器在不同温度下的传输光谱

Fig. 6 Transmission spectra of the sensor under different temperatures

随着温度的升高,干涉波谷波长由 1530.6 nm 漂移到 1538.9 nm ,得到如图 7 所示的温度灵敏度曲线,干涉谷波长与温度呈线性关系,灵敏度为 $158.06 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

为进一步分析传感器的传输特性,对图 6 中

25.3, 43.9, 77.3 °C时的传输光谱进行快速傅里叶变换(FFT),得到的空间频谱如图 8 所示。

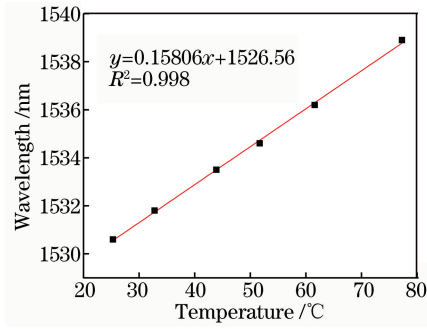


图 7 干涉谷波长随温度的变化

Fig. 7 Interference valley wavelength versus temperature

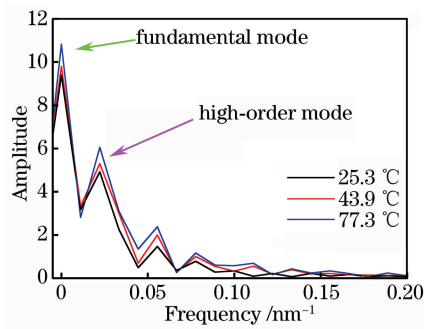


图 8 不同温度下传输光谱的傅里叶频谱

Fig. 8 FFT frequency spectra of transmission spectra under different temperatures

从图 8 中可以看出,干涉光谱的空间频谱中主要含有 2 种不同频率,即基模和高阶模,当温度发生变化时,高阶模对应的频率均为 0.02219 nm⁻¹,这说明产生该干涉条纹的主要模式并未随温度变化而改变,干涉模式稳定。此外,空间频谱可以表示为^[27]

$$\kappa = \Delta n_{\text{eff}} L / \lambda_0^2, \quad (14)$$

式中 κ 为空间频率, λ_0 为中心波长。当波长为 1550 nm 时,模式有效折射率差为 0.003331,与理论计算值 0.00327 基本一致。由传感器基本原理可知,该干涉条纹主要由 FMF 纤芯中的 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式干涉形成。

当温度发生变化时,由于光纤材料的热膨胀效应,FMF 的长度 L 会发生相应的变化。与此同时,光纤存在热光效应,导致纤芯中传输的模式有效折射率差 Δn_{eff} 也发生相应的变化。根据文献可知,石英光纤的热膨胀系数为 $5.6 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ^[28],热光系数为 $8.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ^[29],热光系数比热膨胀系数大一个数量级以上,说明热光效应起主要作用,热膨胀效应的影响可以忽略不计,温度灵敏度可简化为

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \lambda_m \epsilon. \quad (15)$$

根据热光效应,当温度由 T_0 变为 T 时,光纤的折射率变化满足表达式

$$n(T) = n(T_0)(1 + \epsilon_0 \Delta T), \quad (16)$$

式中 $\Delta T = T - T_0$ 为温度的改变量, ϵ_0 为光纤热光系数。由(16)式可计算出不同温度下光纤的折射率取值,将上述折射率取值代入到理论模型中,可得波长为 1530 nm,温度在 25.3, 32.8, 43.9, 51.7, 61.6, 77.3 °C 时,LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式有效折射率差分别为 3.220×10^{-3} , 3.222×10^{-3} , 3.226×10^{-3} , 3.229×10^{-3} , 3.232×10^{-3} , 3.238×10^{-3} 。对该数据拟合,得到 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式有效折射率差随温度变化曲线如图 9 所示。

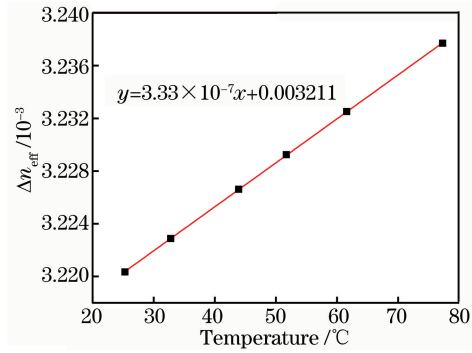


图 9 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式有效折射率差随温度的变化

Fig. 9 Effective refractive index difference between LP₀₁ and LP₁₁ versus temperature

由图 9 可知,随着温度的升高,纤芯中 LP₀₁ 和 LP₁₁ 有效折射率都会增加,但前者的增加量要大于后者的增加量。 Δn_{eff} 随温度线性增加,拟合后曲线斜率为 3.33×10^{-7} ,该值为 $\partial \Delta n_{\text{eff}} / \partial T$ 。由(15)式可知该传感器谐振波长随温度增加向长波方向发生漂移。将 25.3 °C 和 77.3 °C 下 Δn_{eff} 取值分别代入到(15)式中,可得在波长 1530 nm 处温度灵敏度范围为 0.15736 ~ 0.15821 nm/°C,该值与实验得到的数值 0.15806 nm/°C 基本吻合。热光系数取值与折射率分布有关,导致仿真时的不同温度下折射率取值存在误差,使实验得到的温度灵敏度和理论计算的结果存在较小的误差。

用相同熔接参数制作 FMF 长度为 12 mm 和 24 mm 的传感器并进行温度传感实验,长度为 12 mm 传感器在不同温度下传输光谱及温度灵敏度曲线如图 10 所示,随着温度的升高,传输光谱整体向长波方向漂移,1577.8 nm 处干涉波谷灵敏度为 181.59 pm/°C。

长度为 24 mm 的传感器随温度变化的传输光谱及温度灵敏度曲线如图 11 所示,随着温度的升

高,传输光谱向长波方向漂移,1587.8 nm 处干涉波谷灵敏度为 146.23 pm/°C。

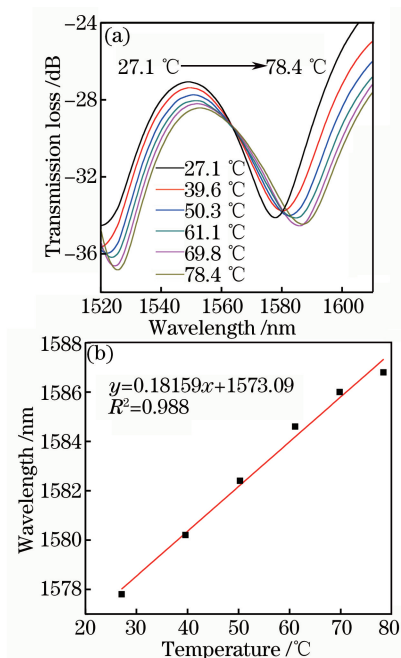


图 10 (a)长度为 12 mm 传感器在不同温度下的传输光谱;
(b)干涉波谷波长随温度的变化

Fig. 10 (a)Transmission spectra of the 12-mm-long sensor under different temperatures;
(b) interference valley wavelength versus temperature

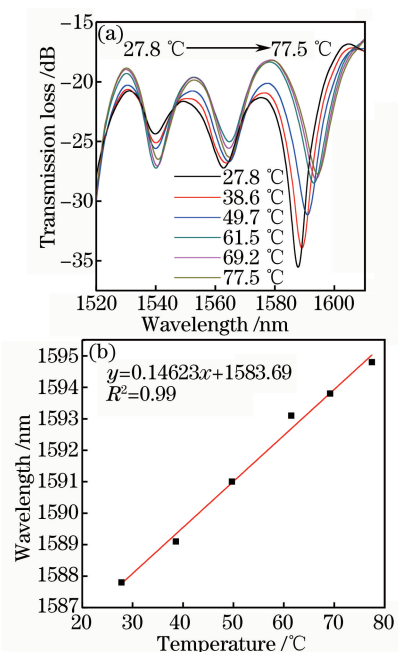


图 11 (a)长度为 24 mm 传感器在不同温度下的传输光谱;
(b)干涉波谷波长随温度的变化

Fig. 11 (a)Transmission spectra of the 24-mm-long sensor under different temperatures;
(b)interference valley wavelength versus temperature

对 12 mm 和 24 mm 传感器室温下传输光谱进行傅里叶变换,空间频谱如图 12 所示。

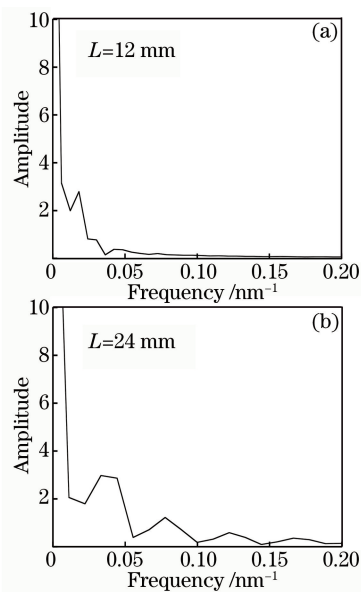


图 12 (a)长度为 12mm 传感器傅里叶频谱;
(b)长度为 24mm 传感器傅里叶频谱

Fig. 12 (a)FFT frequency spectrum of the 12-mm-long sensor;

(b)FFT frequency spectrum of the 24-mm-long sensor

由图 12 可知,能量较强的干涉峰对应的空间频率分别为 0.01815 nm^{-1} 和 0.03329 nm^{-1} ,由(14)式可得,模式有效折射率差为别为 0.003635, 0.003332,与理论计算值基本一致,说明实验制作的不同长度的传感器干涉条纹主要由 LP_{01} 和 LP_{11} 模式干涉形成。

由实验结果可见,FMF 长度为 12,16,24 mm 的传感器灵敏度分别为 181.59, 158.06, 146.23 pm/°C,随着传感器长度的增加,灵敏度有所下降。主要原因是:谐振波长不同,灵敏度不同;实验过程中传感器两端用 AB 胶固定,随着温度的增加,光纤受热膨胀发生弯曲,长度越大,影响越大。当长度为 12 mm 时,光谱监测范围内仅出现一个干涉峰,观测过程中容易超出光源波长范围,因此传感器长度不易过短。

为了测量传感器最高工作温度,对 12 mm 长传感头加热,当温度升高到 130 °C 时,其传输光谱如图 13 所示。

从图 13 中可以看出传感器光谱发生畸变,主要原因是:当温度较高时,错位熔接点受热发生形变较大,激发出高阶包层模,使干涉条纹出现毛刺,因此上述实验方法制作的传感器测量温度不能高于 130 °C。

与之前报道的温度传感器相比,例如,长周期光

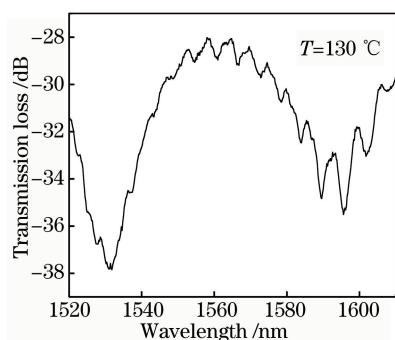


图 13 传感器在 130 °C 时传输光谱

Fig. 13 Transmission spectrum of the sensor at the temperature of 130 °C

栅传感器在温度范围 24 ~ 140 °C 内,灵敏度为 45 pm/°C^[11];布拉格光栅传感器灵敏度为 18.8 pm/°C,测温上限为 90 °C^[12];光子晶体光纤级联传感器在温度范围 20 ~ 80 °C 内,灵敏度为 49.52 pm/°C^[13];多芯光纤级联传感器在温度范围 25 ~ 175 °C 内,灵敏度为 55.81 pm/°C^[14];细芯光纤级联传感器灵敏度为 39.2 pm/°C,最高测量温度为 55 °C^[15];硫化铅光纤级联传感器在温度范围 33.8 ~ 93.3 °C 内,灵敏度为 55.45 pm/°C^[16],本文提出的传感器结构紧凑、制作简单,具有较高的温度灵敏度。

4 结 论

采用标量近似法,对实验用 FMF 建立了理论模型,并详细分析了其传输模式,计算结果与矢量有限元法一致。利用 FMF 中传输模式数量少、模式耦合可控等特点,根据马赫-曾德尔干涉原理,制作出一种基于 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式干涉的全光纤传感器,该传感器由 FMF 与 SMF 偏芯熔接而成,利用传感器传输光谱中的波谷处的波长漂移量测量外界温度。在实验中,传感器的输出特性与理论计算一致,随着温度的增加,传输光谱向长波方向发生漂移,且波长漂移量与温度变化量具有很好的线性关系,在 25.3 ~ 77.3 °C 范围内,传感器长度为 16 mm 时,温度灵敏度为 158.06 pm/°C。该传感器还具有结构简单、体积小、抗干扰能力强等优点,因此适用于多种环境的温度测量。

参 考 文 献

[1] Fu X H, Xie H Y, Yang C Q, *et al.* Research on the temperature sensing characteristics of triple cladding quartz specialty fiber based on cladding mode resonance [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(2): 024211.
付兴虎, 谢海洋, 杨传庆, 等. 基于包层模谐振的三

包层石英特种光纤温度传感特性 [J]. *物理学报*, 2016, 65(2): 024211.

- [2] Ji Y S, Fu G W, Fu X H, *et al.* Sensing characteristics of Mach-Zehnder interferometer based on the fused tapered photonic crystal fiber sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1006005.
纪玉申, 付广伟, 付兴虎, 等. 熔融拉锥型光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪传感特性 [J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1006005.
- [3] Shen C Y, Wang Y Q, Chu J L, *et al.* Optical fiber axial micro-displacement sensor based on Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 31984-31992.
- [4] 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.
- [5] Sun M M, Wang J F, Jin Y X, *et al.* All-fiber Mach-Zehnder interferometer based on lateral-offset and peanut shape structure [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(5): 1560-1564.
孙明明, 王剑锋, 金永兴, 等. 基于错位和花生形结构的全光纤马赫-曾德尔干涉仪的研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(5): 1560-1564.
- [6] Wang F, Zhu H, Li Y P, *et al.* Combined transmission laser spectrum of core-offset fiber and BP neural network for temperature sensing research [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(11): 3732-3736.
王芳, 朱晗, 李云鹏, 等. 错位光纤干涉激光谱结合 BP 神经网络的温度传感研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(11): 3732-3736.
- [7] Wang T T, Ge Y X, Chang J H, *et al.* Refractive index sensing characteristic of a hybrid-Fabry-Perot interferometer based on an in-fiber ellipsoidal cavity [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(24): 240701.
王婷婷, 葛益娴, 常建华, 等. 基于椭圆封闭空气腔的光纤复合法布里-珀罗结构折射率传感特性研究 [J]. *物理学报*, 2014, 63(24): 240701.
- [8] Xian P, Feng G X, Zhou S H. A compact and stable temperature sensor based on a gourd-shaped microfiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(1): 95-98.
- [9] Shao M, Qiao X G, Fu H W, *et al.* Fiber humidity sensor based on fiber Bragg grating sandwiched in sms fiber structure [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(9): 3008-3013.
邵敏, 乔学光, 傅海威, 等. 光纤布拉格光栅嵌入 SMS 光纤结构的湿度传感器 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(9): 3008-3013.
- [10] Cao Y, Pei Y W, Tong Z R. Simultaneous

- measurement of temperature and bending-curvature using a single local micro-structured long period fiber grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(2): 024206.
- 曹晔, 裴庸惟, 童峥嵘. 仅用一根局部微结构长周期光纤光栅实现温度与弯曲曲率的同时测量[J]. *物理学报*, 2014, 63(2): 024206.
- [11] Ranjan R, Esposito F, Iadicicco A, *et al.* Comparative study of long-period gratings written in standard and fluorine-doped fibers by electric arc discharge[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(11): 4265-4273.
- [12] Gonzalez-reyna M A, Alvarado-mendez E, Estudillo-ayala J M, *et al.* Laser temperature sensor based on a fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(11): 1141-1144.
- [13] Wang B, Zhang W G, Li J L, *et al.* Mach-Zehnder interferometer based on S-tapered all-solid photonic bandgap fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(17): 1849-1852.
- [14] Wang X L, Chen D R, Li H T, *et al.* In-line Mach-Zehnder interferometric sensor based on a seven-core optical fiber [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(1): 100-104.
- [15] Castellani C, Ximenes H, Silva R L, *et al.* Multi-parameter interferometric sensor based on a reduced diameter core axial offsetted fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(2): 239-242.
- [16] Fu X H, Yang C Q, Wang S W, *et al.* Refractive index and curvature insensitive Pbs fiber temperature sensor based on inter-modal interference principle[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1210002.
- 付兴虎, 杨传庆, 王思文, 等. 基于模间干涉的折射率/曲率不敏感型 Pbs 光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1210002.
- [17] Li Q, Huang Z J, Xu Y Q, *et al.* Optical fiber sensing system based on multimode interference of single-mode-multimode-single-mode fiber structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1630-1636.
- 李强, 黄泽铎, 徐雅芹, 等. 基于单模-多模-单模光纤模间干涉的传感系统[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(5): 1630-1636.
- [18] Zhao N, Fu H W, Shao M, *et al.* Research on high sensitivity temperature sensor based on Mach-Zehnder interferometer with waist-enlarged fiber bitapers[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(6): 1722-1726.
- 赵娜, 傅海威, 邵敏, 等. 基于光纤粗锥型马赫-曾德尔干涉仪的高灵敏度温度传感器的研制[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(6): 1722-1726.
- [19] Su J, Tong Z R, Cao Y, *et al.* Double-parameters optical fiber sensor based on spherical structure and multimode fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(4): 427-430.
- [20] Wang B, Zhang W G, Bai Z Y, *et al.* Mach-Zehnder interferometer based on interference of selective high-order core modes [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(1): 71-74.
- [21] Deng J, Feng Y H, Gao S C, *et al.* Torsion sensors with enhanced sensitivity and extend working range based on long period gratings inscribed in few-mode fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 100602.
- 邓靖, 冯元华, 高社成, 等. 基于少模长周期光纤光栅的高灵敏度扭矩传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 100602.
- [22] Zhang S, Huang Z H, Li G F, *et al.* Temperature-insensitive strain sensing based on few mode fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0210002.
- 张珊, 黄战华, 李桂芳, 等. 温度不敏感的少模光纤应变传感[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0210002.
- [23] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, *et al.* Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 521-531.
- [24] Liang X. Characteristic analysis and development of novel few mode fiber and related devices[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016: 5-22.
- 梁骁, 新型少模光纤波导特性分析及其器件的研制[D]. 北京: 北京交通大学, 2016: 5-22.
- [25] Makouei S, Oskouei M S, Rostami A. Study of bending loss and mode field diameter in depressed inner core triple-clad single-mode optical fibers [J]. *Optics Communications*, 2007, 280(1): 58-67.
- [26] Yu X J, Bu D, Chen X F, *et al.* Lateral stress sensor based on an in-fiber Mach-Zehnder interferometer and Fourier analysis[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 6801710.
- [27] Choi H Y, Kim M J, Lee B H. All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2007, 15(9): 5711-5720.
- [28] Yu B, Pickrell G, Wang A B. Thermally tunable extrinsic Fabry-Perot filter[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(10): 2296-2298.
- [29] Shibata N, Shibata S, Edahiro T. Refractive index dispersion of lightguide glasses at high temperature [J]. *Electronics Letters*, 1981, 17(8): 310-311.