

基于表面等离子体共振的光纤温度传感器

魏勇^{1**}, 胡江西¹, 朱宗达², 刘璐³, 彭峰^{4*}

¹重庆三峡学院智能信息处理与控制重庆市高校市级重点实验室, 重庆 404100;

²哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

³哈尔滨工业大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

⁴济南大学物理科学与技术学院, 山东 济南 250022

摘要 设计了一种基于表面等离子体共振(SPR)的光纤温度传感器。将单模光纤和多模光纤端面研磨成楔形并进行拼接,在单模光纤的研磨面上镀制厚度为 50 nm 的金膜以形成 Kretschmann 结构,然后涂覆一层聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为温度敏感介质来实现温度传感。实验结果表明:当温度为 20~70 °C 时,该传感器的灵敏度的绝对值最大可达到 4.15 nm/°C,远大于其他类型的光纤温度传感器的灵敏度;与其他 SPR 光纤温度传感器相比,该传感器具有更窄的半峰全宽和更优的品质因数;该传感器具有较高的稳定性,其最大的温度标准差为 0.14 °C。该传感器结构简单,制作成本低廉,有望在工业领域内得到广泛应用。

关键词 传感器; 温度传感器; 表面的等离子体共振; 单模光纤; PDMS

中图分类号 TN253; O4-34

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1110003

Optical Fiber Temperature Sensor Based on Surface Plasmon Resonance

Wei Yong^{1**}, Hu Jiangxi¹, Zhu Zongda², Liu Lu³, Peng Feng^{4*}

¹Chongqing Municipal Key Laboratory of Intelligent Information Processing and Control of Institutions of Higher Education, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China;

²School of Aeronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

³School of Science, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

⁴School of Physics and Technology, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China

Abstract An optical fiber temperature sensor based on surface plasmon resonance (SPR) is designed. The ends of a single-mode fiber and a multi-mode fiber are ground into wedge shapes and spliced. The gold film with a thickness of 50 nm is plated on the polished surface of this single-mode fiber to form the Kretschmann configuration. Then a layer of polydimethylsiloxane (PDMS) is coated as temperature sensitive medium and thus temperature sensing is realized. The experimental results show that the maximum sensitivity of this sensor can reach 4.15 nm/°C when temperatures are between 20 °C and 70 °C, much higher than those of other types of optical fiber temperature sensors. Compared with other SPR-based optical fiber temperature sensors, this sensor has a much narrower full width at half maximum and a larger figure of merit. In addition, this sensor has a relatively high stability with the maximum temperature standard deviation of 0.14 °C. This sensor has a simple structure and low cost, and is expected to be widely used in the industrial field.

Key words sensors; temperature sensors; surface plasmon resonance; single-mode fiber; PDMS

OCIS codes 060.2300; 060.2370; 240.6680

收稿日期: 2018-05-25; 修回日期: 2018-06-13; 录用日期: 2018-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(61705025,61775044)、重庆市教委 2017 年度科学技术研究项目(KJ1710238, KJ1725391, KJ1710247)、第三批重庆市高等学校青年骨干教师资助(20165339)、重庆三峡学院 2016 年度重大培育科研项目(16PY13)、重庆市高校创新团队(CXTDX201601034)、重庆市高校市级重点实验室资助项目([2017]3)、重庆市发展和改革委员会资助项目([2017]1007)、山东省中青年科学家科研奖励基金(ZR2016FB17)

* E-mail: 1404476665@qq.com; ** E-mail: weiyong198747@163.com

1 引 言

温度测量在环境监测、工业制造、生物医学和农业生产等领域有着重要作用,虽然电学温度传感器性能良好,且在很多领域中得到了广泛应用,但随着技术的发展,光学温度传感器,如红外测温仪将逐渐取代电学温度传感器,这主要是因为光学温度传感器具有高灵敏度、抗电磁干扰、长寿命、抗腐蚀等优点。光纤温度传感器具有更多优势,例如:光纤尺寸很小,使得光纤温度传感器具有很小的体积以及更低的制作成本;光纤可作为波导,有利于光纤温度传感器的远距离传输。目前,已有的光纤温度传感器主要包括光纤布拉格光栅(FBG)温度传感器^[1-2]、长周期光纤光栅(LPFG)温度传感器^[3-4]、光纤干涉仪(OFI)温度传感器^[5-6]、光纤回音壁(WGM)温度传感器^[7]等,其中,前三者已经投入工业生产。

表面等离子体共振(SPR)技术是近现代光学的重大成果之一。SPR对周围介质折射率的灵敏度较高,因此通常被用于设计各种折射率传感器^[8-11]。由于温度会影响介质折射率的变化,近几年来温度传感器也成为研究热点之一。Zhao等^[12]将传统的多模光纤SPR折射率传感器浸到酒精中实现温度传感,当温度为35~70℃时,该传感器的温度灵敏度为1.5745 nm/℃。Velázquez-González等^[13]将多模光纤SPR折射率传感器浸到聚合物中实现温度传感,当温度为20~60℃时,该传感器的温度灵敏度为2.6 nm/℃。这两种折射率传感器不仅灵敏度较低,其光谱的半峰全宽(FWHM)也很大(约200 nm),导致共振波长不容易被识别。朱晟昇等^[14]提出了一种基于光子晶体光纤的SPR温度传感器,可以同时测量温度和磁场的变化,当温度为0~100℃时,该传感器的温度灵敏度达到了1.575 nm/℃。Liu等^[15]提出了一种基于液体填充的光子晶体光纤SPR温度传感器,当温度为0~100℃时,该传感器的温度灵敏度为3.08 nm/℃。这些基于光子晶体光纤的SPR温度传感器可显著

减小光谱的FWHM(约50 nm),但光子晶体价格十分昂贵,传感器制作工艺非常复杂。Lu等^[16]将液晶填充到内壁镀有金膜的空心光纤中实现了温度传感,在20~34.5℃范围内其温度灵敏度达到了4.72 nm/℃,但该传感器温度检测范围较窄,且液晶性质不稳定,容易受到电磁场干扰。与其他类型的光纤温度传感器相比,基于SPR的光纤温度传感器具有更高的灵敏度,这意味着此类传感器更容易检测到微小的温度变化。

针对实际工业生产需求,本文提出了一种基于SPR技术的光纤温度传感器,将单模光纤(SMF)和多模光纤(MMF)的端面研磨成楔形,研磨后的两光纤反向对称熔接,并在单模光纤的研磨斜面上镀制厚度为50 nm的金膜;然后在整个熔接处包裹一层聚二甲基硅氧烷(PDMS)聚合物材料作为温度敏感介质来实现温度传感。光从单模光纤进入,到达单模光纤的研磨面时发生全反射并产生SPR现象,随后进入到多模光纤中并被光谱仪收集。由于PDMS的热系数较高,该传感器具有较高的灵敏度;由于光束在单模光纤中按基模传输,该传感器的透射光谱具有很小的FWHM,共振波长更容易被识别。本文也对该传感器的稳定性和温度误差进行了分析,证明该传感器具有很好的稳定性。

2 原理与仿真

2.1 传感器结构设计

图1为基于SPR的光纤温度传感探针结构示意图。单模光纤和多模光纤的一个端面分别被研磨成楔形,研磨角为 α 。研磨后的两光纤用光纤熔接机反向对称熔接。在单模光纤的研磨斜面上镀制几十纳米厚的金膜以形成Kretschmann结构,然后在整个熔接处包裹一层PDMS聚合物材料(厚度为1~2 mm)作为温度敏感介质。单模光纤的纤芯直径为8 μm ,折射率为1.4678,包层直径为125 μm ,折射率为1.4632;多模光纤的纤芯直径为105 μm ,包层直径为125 μm 。入射光从单模光纤进入,到达

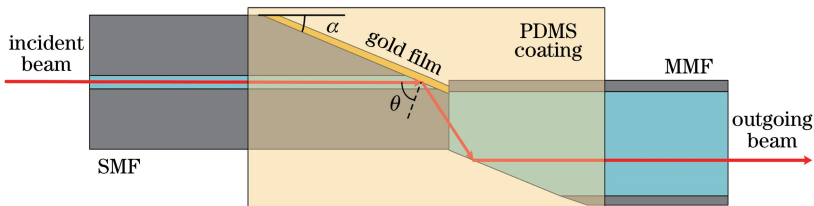


图1 温度传感探针的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of temperature sensing probe

研磨面时会以入射角为 $\theta(\theta = 90^\circ - \alpha)$ 激发 SPR 现象,反射后的光进入到多模光纤中并传输到光谱仪。由于 PDMS 的折射率和金膜的介电函数都会随着温度发生明显变化,同时 SPR 的透射光谱又会随着这两者发生明显变化,因此可以将温度的变化转换为共振波长的变化,从而实现温度传感。

2.1.1 温度对 PDMS 折射率的影响

在基于 SPR 的光纤温度传感器中,PDMS 作为温度敏感介质起到了主要作用。为了测量 PDMS 的折射率随温度的变化规律,即测量 PDMS 的热光系数,需要制作 PDMS 薄膜。首先,将液态硅油与固化剂按 10:1 的质量比混合并搅拌均匀,并使用真空搅拌机分离搅拌过程中产生的大量气泡。充分搅拌至没有气泡后,取 0.5 mL 混合液倒入直径为 5 cm 的培养皿中,并静置使其均匀摊开,形成厚度约为 0.25 mm 的薄层。随后,将培养皿放入恒温干燥箱中,保持 60 °C 加热 2 h 使 PDMS 混合液完全固化。取出固化的 PDMS 薄层,在中间厚度最均匀处切下尺寸为 1 cm × 1 cm 的样品片,用阿贝折射仪测量该样品的折射率。阿贝折射仪内安装了温度计,同时安装了可以改变折射仪测量温度的恒温器。实验测得,当温度从 20 °C 升高到 70 °C 时,PDMS 的折射率从 1.4085 降低到 1.3861,通过线性拟合,可以得到 PDMS 的折射率随温度的关系为

$$n_{\text{PDMS}} = -4.5 \times 10^{-4} \cdot T + 1.4176, \quad (1)$$

式中: n_{PDMS} 为折射率; T 为测量温度;斜率 -4.5×10^{-4} RIU/°C 为 PDMS 的热光系数。

2.1.2 温度对金膜介电函数的影响

金膜的介电函数随光波频率的变化关系可表示为

$$\epsilon(\omega) = 1 - \omega_p^2 / [\omega(\omega + i\omega_c)], \quad (2)$$

式中: ϵ 为介电函数; ω 是光波频率; ω_p 是金的等离子体频率; ω_c 是金的碰撞频率。金的等离子体频率 ω_p 与其热膨胀系数的关系可表示为

$$\omega_p(T) = \omega_{p0} [1 + \gamma_e(T - T_0)]^{-0.5}, \quad (3)$$

式中: ω_{p0} 是当温度 $T = T_0 = 293$ K (20 °C) 时的等离子体频率; γ_e 是金膜的热膨胀系数。金的碰撞频率可以表示为

$$\omega_c(T) = \omega_{\text{cp}}(T) + \omega_{\text{ce}}(T), \quad (4)$$

式中: ω_{cp} 是声子-电子散射频率; ω_{ce} 是电子对散射频率。这两个散射频率都和温度有关,可以分别表示为

$$\omega_{\text{cp}}(T) = \omega_0 \left[\frac{2}{5} + 4 \left(\frac{T}{T_D} \right)^5 \int_0^{T_D/T} \frac{z^4}{e^z - 1} dz \right], \quad (5)$$

$$\omega_{\text{ce}}(T) = \frac{1}{6} \pi^4 \frac{\Gamma \Delta}{\hbar E_F} \left[(k_B T)^2 + \left(\frac{\hbar \omega}{4\pi^2} \right)^2 \right], \quad (6)$$

式中: \hbar 是普朗克常数; k_B 是玻尔兹曼常数; ω_0 为静态散射频率; T_D 为德拜温度; Γ 为费米能级平均散射概率; Δ 为反转散射; E_F 为费米能级。本实验所用到的部分参数的具体取值如表 1 所示^[17]。通过 (1)~(6) 式可计算得到金膜的介电函数随温度的变化关系。

表 1 金膜的物理参数

Table 1 Physical parameters of gold film

Parameter	Value
$\omega_{p0}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	1.3754×10^{16}
$\gamma_e/(\text{°C}^{-1})$	1.42×10^{-5}
$T_D/(\text{°C})$	-103
$E_F/(\text{eV})$	5.53
$\omega_0/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	2.0477×10^{13}
Γ	0.55
Δ	0.77

2.2 基于 MATLAB 的数值仿真

所设计传感器的 SPR 透射光谱可以通过菲涅耳公式求解,其总的透射率为

$$R = \left| \frac{r_{01} + r_{12} \exp(2ik_z h)}{1 + r_{01} r_{12} \exp(2ik_z h)} \right|^2, \quad (7)$$

式中: R 为总透射率; h 为金膜厚度; r_{01} 和 r_{12} 分别为光纤与金膜界面处的反射率以及金膜与 PDMS 界面处的反射率,可以表示为

$$r_{ik} = \frac{(\epsilon_i - \epsilon_0 \sin^2 \theta)^{0.5} / \epsilon_i - (\epsilon_k - \epsilon_0 \sin^2 \theta)^{0.5} / \epsilon_k}{(\epsilon_i - \epsilon_0 \sin^2 \theta)^{0.5} / \epsilon_i + (\epsilon_k - \epsilon_0 \sin^2 \theta)^{0.5} / \epsilon_k} \quad (i = 0, 1; k = 1, 2); \quad (8)$$

k_z 为金膜中波矢的垂直分量,可以表示为

$$k_z = \frac{2\pi}{\lambda} (\epsilon_1 - \epsilon_0 \sin^2 \theta)^{0.5}. \quad (9)$$

利用 MATLAB 软件,将 (7)~(9) 式编程,最终得到透射光谱随温度的变化规律。在该传感器中,光纤研磨角和金膜厚度是两个待确定的参数,可以通过仿真来研究它们对透射光谱的影响并确定最佳参数。

2.2.1 光纤研磨角对透射光谱的影响

固定温度为 20 °C,金膜厚度为 50 nm,分别仿真光纤研磨角 α 为 4°、6°、8° 和 10° 时的 SPR 透射光谱,仿真结果如图 2(a) 所示。可以看到,随着光纤研磨角的增大,透射光谱逐渐红移,同时,共振谷的 FWHM 也略有增大,当 $\alpha = 10^\circ$ 时,共振谷已经超出了检测范围,无法检测。另外,之前的研究工作证明了研磨角越大,灵敏度越高^[18]。为了尽可能实现更

高的灵敏度,本实验中光纤研磨角选择 8° 。

2.2.2 金膜厚度对透射光谱的影响

确定最佳光纤研磨角后,研究金膜厚度对透射光谱的影响。固定温度为 20°C ,光纤研磨角为 8° ,分别仿真当金膜厚度 h 分别为 30、40、50、60 nm 时的 SPR 透射光谱,仿真结果如图 2(b) 所示。可以

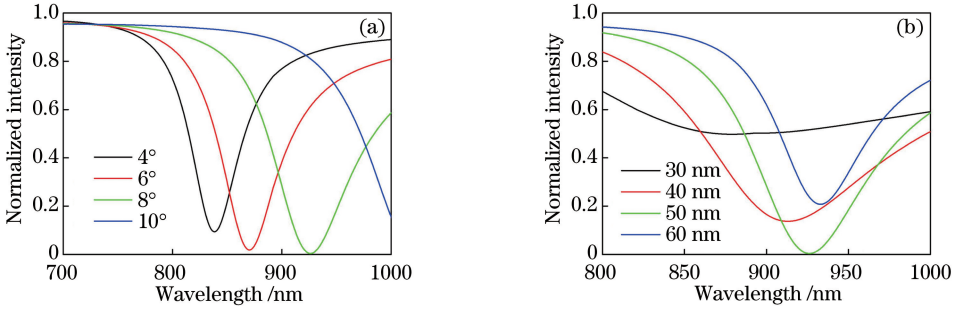


图 2 不同条件下的 SPR 透射光谱。(a)不同光纤研磨角;(b)不同金膜厚度

Fig. 2 SPR transmission spectra under different conditions. (a) Different fiber polishing angles; (b) different gold film thicknesses

2.2.3 温度传感仿真

确定了最佳的光纤研磨角和金膜厚度后,对不同温度下的 SPR 透射光谱进行数值仿真。结合上述所有公式,分别仿真温度 T 分别为 20、30、40、50、60、70 $^\circ\text{C}$ 时的透射光谱,并得到相应的共振波长。仿真结果如图 3 所示。

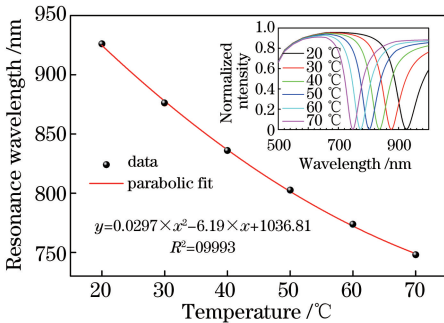


图 3 共振波长随温度变化的仿真结果 (插图:为不同温度下透射光谱)

Fig. 3 Simulation results of resonance wavelength versus temperature (Inset: transmission spectra under different temperatures)

由图 3 可知,当温度逐渐升高时,SPR 透射光谱逐渐蓝移,相应的共振波长往短波长方向移动,从 20°C 时的 926.2 nm 降低到 70°C 时的 748.1 nm。对共振谷进行二次方拟合,可以得到共振波长 λ (单位为 nm) 与温度 T (单位为 $^\circ\text{C}$) 的函数关系为

$$\lambda = 0.0297 \cdot T^2 - 6.19 \cdot T + 1036.81, \quad (10)$$

拟合优度 $R^2 = 0.9993$ 。对(10)式进行求导,可以得

看到,当金膜厚度从 30 nm 增加到 50 nm 时,共振谷的深度也逐渐增加,同时 FWHM 也逐渐减小,金膜厚度为 50 nm 时,共振谷深度最深,当金膜厚度继续增加时,尽管共振谷的 FWHM 继续减小,但其深度也开始变浅。因此,当金膜厚度为 50 nm 时,所产生的 SPR 现象最明显。

到灵敏度 S (单位为 $\text{nm}/^\circ\text{C}$):

$$S = 0.0594 \cdot T - 6.19. \quad (11)$$

该灵敏度为负数,其绝对值随温度的升高而降低。当温度在 20°C 附近时,该传感器的灵敏度的绝对值最大能达到 $5.00 \text{ nm}/^\circ\text{C}$;当温度升高到 70°C 附近时,灵敏度的绝对值降低到 $2.03 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

3 探针制备与测试系统搭建

提出的光纤温度传感器的具体制作步骤如下:

1) 光纤研磨和抛光。利用光纤研磨技术对单模光纤和多模光纤进行研磨。首先用粗砂纸研磨外形,研磨角度为 8° 。在光纤研磨过程中,通过 CCD 实时监测光纤研磨程度,当光纤尖端的研磨深度约为 $55 \mu\text{m}$ 时,停止研磨。然后换用抛光砂纸对研磨面抛光 2 h,使研磨面足够光滑。

2) 光纤熔接。利用光纤熔融焊接机 (FSM-100P) 将 2 根研磨抛光后的光纤熔融焊接。在熔接过程中,需要将 2 根光纤旋转,使 2 个研磨面互相平行。然后调节熔接电流和熔接时间,保证 2 根光纤能够成功熔接,同时在熔接过程中不发生形变。

3) 镀制金膜。将熔接好的光纤探针放在等离子体溅射仪 (JS-1600) 中镀制厚度为 50 nm 的金膜,镀膜方法和具体流程参考文献[18]。

4) 涂覆 PDMS 感温层。取出镀完膜的光纤,并将 PDMS 混合液涂覆到焊点处,然后放入到恒温干燥箱中加热固化,加热温度为 60°C ,加热时间为 2 h。

光纤探针制作完成后,搭建如图 4 所示的温度测

试系统进行传感器测试。光源使用海洋光学公司的 HL-2000 型卤素灯,其波长范围为 360~2000 nm,光谱仪使用横河公司的 AQ6373 型,其波长检测范围为

450~1200 nm,波长分辨率为 0.02 nm。将光纤探针浸入到恒温水浴箱中以改变环境温度,水浴箱的温度控制范围是室温到 100 °C,精度为 0.1 °C。

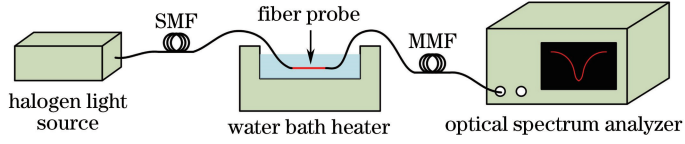


图 4 温度传感的测试系统

Fig. 4 Test system of temperature sensing

4 结果与讨论

分别测试了温度为 20、30、40、50、60、70 °C 时的共振光谱变化,并得到相应的共振波长,结果如图 5 所示。由图 5 可知,当温度逐渐升高时,SPR 透射光谱逐渐蓝移,相应的共振波长往短波长方向移动,从 20 °C 时的 922.1 nm 降低到 70 °C 时的 763.9 nm。同时,共振谷的 FWHM 有所下降。对共振谷进行二次方拟合,可以得到共振波长 λ (单位为 nm) 与温度 T (单位为 °C) 的函数关系为

$$\lambda = 0.0205 \cdot T^2 - 4.97 \cdot T + 1011.83, \quad (12)$$

拟合优度 $R^2 = 0.9930$ 。对(12)式进行求导,可以得到灵敏度 S (单位为 nm/°C):

$$S = 0.0410 \cdot T - 4.97. \quad (13)$$

该灵敏度为负数,其绝对值随温度的升高而降低。当温度在 20 °C 附近时,该传感器的灵敏度的绝对值最大能达到 4.15 nm/°C;当温度升高到 70 °C 附近时,灵敏度的绝对值降低到 2.1 nm/°C。相比于同类型的光纤温度传感器^[13],所设计传感器的最高灵敏度提高了约 50%。与仿真结果对比,可以发现实验所得的共振波长范围与仿真结果基本一致,灵敏度略低于仿真结果。

分析了该传感器得到的传感光谱的 FWHM 随温度的变化关系,结果如图 6 所示。可以看到,随着温度的升高,光谱的 FWHM 逐渐减小,这意味着光谱质量逐渐提高,共振波长更容易被识别。平均的 FWHM 约为 90 nm,比同类型的光纤 SPR 温度传感器^[13]降低了约 55%。这是主要是因为该传感器使用的单模光纤可以让光束基模传输,从而有效地减少了光束的发散,使得 FWHM 显著下降。同时,还分析了该传感器的品质因数(FOM)随温度的变化关系,结果如图 6 所示。FOM 是衡量 SPR 传感器传感性能优劣程度的一个重要指标,FOM 越大,传感性能越好。FOM 可以表示成灵敏度和 FWHM 的比值,即

$$F_{OM} = S/W_{FHM}. \quad (14)$$

由图 6 可知,光谱的 FOM 在 20~40 °C 之间略有提高,随后开始下降,并且温度越高,下降速率越大。这意味着随着温度升高,传感器的分辨能力也随之下降,这主要是灵敏度下降导致的。尽管如此,平均的 FOM 约为 0.034 °C⁻¹,比同类型的光纤 SPR 温度传感器^[13]提高了约 1.5 倍。

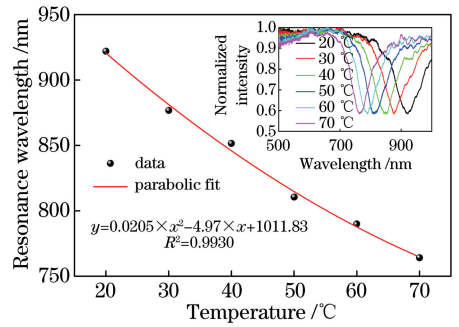


图 5 共振波长随温度变化的实验结果
(插图为不同温度下透射光谱)

Fig. 5 Experimental results of resonance wavelength versus temperature (Inset: transmission spectra under different temperatures)

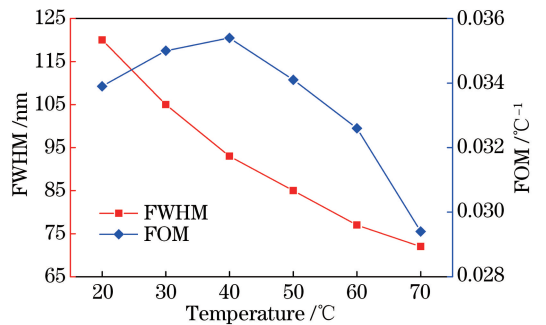


图 6 SPR 谷的 FWHM 和品质因数随温度的变化
Fig. 6 FWHM of SPR dip and figure of merit versus temperature

对(12)式进行求解,可以得到温度随波长的解调函数

$$T = 120.94 - \sqrt{48.69 \cdot \lambda - 34634.9}. \quad (15)$$

根据解调函数,可通过共振波长计算出实时温度。为了测试所设计传感器的稳定性和温度误差,在每个温度下进行了10次重复性实验,表2所示为每个温度下10次重复实验所得的共振波长平均值和标准差、根据(15)式计算所得的温度平均值和标准差,以及由计算所得温度减去实际温度所得的温度误差。可以看出,每次重复性实验所得的共振波

长标准差和温度标准差较小,说明该传感器具有较好的稳定性;另外,温度误差偏大,这是因为(12)式中的拟合优度太低,产生了较大的误差,在实际的生产应用中,可以通过逐点标定的方式来代替拟合曲线,从而极大地减小温度误差,但同时可能会显著地增加生产成本,降低生产效率。另外,可以通过提高光源和光谱仪的稳定性来减小其余误差。

表2 稳定性测试及误差分析

Table 2 Stability test and error analysis

Actual temperature / °C	20	30	40	50	60	70
Average of resonance wavelength / nm	922.49	877.36	851.89	810.86	790.53	764.38
Standard deviation of resonance wavelength / nm	0.26	0.24	0.33	0.23	0.29	0.30
Average of calculated temperature / °C	19.8	31.4	38.7	51.9	59.6	71.2
Standard deviation of calculated temperature / °C	0.06	0.07	0.10	0.08	0.12	0.14
Temperature error / °C	-0.2	1.4	-1.3	1.9	-0.4	1.2

表3给出了所设计传感器与其他类型光纤温度传感器的灵敏度对比,包括FBG温度传感器、LPFG温度传感器、OFI温度传感器、WGM温度传感器等。可以看出,相比于这些类型的光纤温度传感器,SPR技术在温度测量上有着较大的优势,所设计的SPR光纤温度传感器的灵敏度有了很大程度的提升。

FOM也得到显著提高。本文也对该传感器的稳定性和温度误差进行了合理的分析,证明了该传感器具有很好的稳定性。所提出的光纤温度传感器制作简单、成本低廉,有望在工业领域内得到广泛应用。

参 考 文 献

表3 不同类型光纤温度传感器的灵敏度对比

Table 3 Sensitivity comparison among different types of optical fiber temperature sensors

Types	Sensitivity / (nm·°C ⁻¹)	Detection range / °C
FBG ^[1]	0.042	30~120
LPFG ^[3]	0.77	20~100
OFI ^[6]	0.115	30~400
WGM ^[7]	0.377	25~45
SPR ^[13]	2.60	20~60
Proposed	4.15	20~70

[1] Park C S, Joo K I, Kang S W, *et al.* A PDMS-coated optical fiber Bragg grating sensor for enhancing temperature sensitivity[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2011, 15(4): 329-334.

[2] Guo M J, Jiang D S, Yuan H C. Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensors with two package methods[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(3): 326-330.
郭明金, 姜德生, 袁宏才. 两种封装的光纤光栅温度传感器的低温特性[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 326-330.

[3] Zou F, Liu Y Q, Zhu S, *et al.* Temperature sensitivity enhancement of the nano-film coated long-period fiber gratings [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8): 2460-2465.

[4] Liang L L, Liu M S, Li Y, *et al.* Solutions of strain and temperature cross-sensitivity of long period fiber grating temperature sensing [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(3): 1020-1023.
梁丽丽, 刘明生, 李燕, 等. 长周期光纤光栅温度传感器应变交叉敏感的研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 1020-1023.

[5] Hu X W, Shen X, Wu J J, *et al.* All fiber M-Z interferometer for high temperature sensing based on a hetero-structured cladding solid-core photonic bandgap fiber [J]. Optics Express, 2016, 24(19): 21693-21699.

5 结 论

提出了一种基于SPR技术的光纤温度传感器,将单模光纤和多模光纤的端面研磨成楔形,研磨后的两光纤反向对称熔接,并在单模光纤的研磨斜面上镀制厚度为50 nm的金膜,然后在整个熔接点处包裹一层PDMS聚合物材料作为温度敏感介质实现温度传感。该传感器的温度检测范围为20~70 °C。由于PDMS的热光系数较大,该传感器具有高灵敏度的优点,其温度灵敏度的绝对值最高可达4.15 nm/°C;由于光束在单模光纤中按基模传输,该传感器的透射光谱具有很小的FWHM,平均约为90 nm,共振波长更容易被识别,同时传感谱线的

- [6] 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.
- [7] Liu Z H, Liu L, Zhu Z D, *et al.* Whispering gallery mode temperature sensor of liquid microresonator [J]. Optics Letters, 2016, 41(20): 4649-4652.
- [8] Wang W H, Xiong Z Y, Shi W Q, *et al.* Fiber-optic surface plasmon resonance sensing technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 090008.
王文华, 熊正辉, 师文庆, 等. 光纤表面等离子体共振传感技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 090008.
- [9] Zhang Y, Zhu X S, Shi Y W. Hollow optical fiber surface plasmon resonance sensor based on light intensity detection [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0606001.
张珂, 朱晓松, 石艺尉. 光强检测型空芯光纤表面等离子体共振传感器 [J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0606001.
- [10] Wang X P, Hong X Y, Zhan S Y, *et al.* Surface plasmon resonance sensing technology and bioanalytical instrument [J]. Progress in Chemistry, 2014, 26(7): 1143-1159.
王晓萍, 洪夏云, 詹舒越, 等. 表面等离子体共振传感技术和生物分析仪 [J]. 化学进展, 2014, 26(7): 1143-1159.
- [11] Chen X L, Luo Y H, Xu M Y, *et al.* Refractive index and temperature sensing based on surface plasmon resonance fabricated on a side-polished fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0206005.
陈小龙, 罗云瀚, 徐梦云, 等. 基于侧边抛磨光纤表面等离子体共振的折射率和温度传感研究 [J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0206005.
- [12] Zhao Y, Deng Z Q, Hu H F. Fiber-optic SPR sensor for temperature measurement [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(11): 3099-3104.
- [13] Velázquez-González J S, Monzón-Hernández D, Martínez-Piñón F, *et al.* Surface plasmon resonance-based optical fiber embedded in PDMS for temperature sensing [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(2): 126-131.
- [14] Zhu C H, Tan C, Wang Y, *et al.* Photonic crystal fiber high sensitivity magnetic field and temperature sensor based on surface plasma resonance effect and defect coupling [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0310001.
朱晟昇, 谭策, 王琰, 等. 基于 SPR 效应和缺陷耦合的光子晶体光纤高灵敏度磁场与温度传感器 [J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0310001.
- [15] Liu C, Wang F M, Lü J, *et al.* A highly temperature-sensitive photonic crystal fiber based on surface plasmon resonance [J]. Optics Communications, 2016, 359: 378-382.
- [16] Lu M D, Zhang X P, Liang Y Z, *et al.* Liquid crystal filled surface plasmon resonance thermometer [J]. Optics Express, 2016, 24(10): 10904-10911.
- [17] Sharma A K, Gupta B D. Influence of temperature on the sensitivity and signal-to-noise ratio of a fiber-optic surface-plasmon resonance sensor [J]. Applied Optics, 2006, 45(1): 151-161.
- [18] Liu Z H, Wei Y, Zhang Y, *et al.* Twin-core fiber SPR sensor [J]. Optics Letters, 2015, 40(12): 2826-2829.