

# 基于 Michelson 干涉仪的高灵敏度光纤 高温探针传感器\*

杨珅 荣强周 孙浩 张菁 梁磊 徐琴芳 詹苏昌 杜彦英  
冯定一 乔学光 忽满利†

(西北大学物理学系, 西安 710069)

(2012年9月27日收到; 2012年11月9日收到修改稿)

提出了一种简单的高灵敏度的光纤高温探针传感器, 该传感器由一小段多模光纤和一端镀有银膜的单模光纤熔接而成. 由于单模光纤和多模光纤的纤芯直径不同, 当光波从多模光纤传输至多模光纤和单模光纤的熔接端面时, 一部分纤芯光耦合进包层, 因为单模光纤纤芯的折射率和包层的折射率不同, 不同模式的光经过银膜反射后在多模光纤内重新耦合进单模光纤, 最终形成干涉. 随着外界温度的升高, 干涉谱峰值会向长波方向漂移. 实验结果证明这种传感器在  $470\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内具有很好的稳定性, 线性度达 99.7%, 灵敏度为  $120\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ , 可作为远距离反射型探针温度传感器, 在石油探测和油气田开发等领域有着广泛的应用前景.

**关键词:** 光纤传感, 温度测量, Michelson 干涉

**PACS:** 42.81.Pa, 07.20.Ka, 42.25.Hz

**DOI:** 10.7498/aps.62.084218

## 1 引言

温度的测量在生产生活和科学研究中具有十分重要的作用. 在一些特殊领域和环境下, 需要对温度进行实时精确测量, 目前传统的温度测量是由贵金属制成的热电偶传感器来完成的, 但是这种传感器在高温环境下的抗氧化能力比较差, 长期使用会产生较大的误差, 特别是在一些特殊环境下, 如高电压、强电磁和易燃易爆的情况下, 难以实现有效的实时测量.

近年来, 光纤温度传感器已经得到广泛的研究并应用于多个领域. 常见的光纤温度传感器有光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器<sup>[1-3]</sup>, 该传感器的优点是可以进行分布式的温度测量, 但是当温度高于  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右时, 光栅会被擦除, 灵敏度也不高 (约为  $10\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ). 长周期光纤光栅 (LPFG) 对温度有更高的灵敏度 (约为  $100\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ )<sup>[4-6]</sup>, 但高温同样会破

坏光栅结构, 并且该光栅对弯曲的灵敏度也较高, 价格也比较昂贵. 基于偏振保持光纤 (PMF) 的温度传感器<sup>[7]</sup>, 易于制造、灵活性和稳定性较好, 但是该传感器需要偏振控制器等较大的部件, 使得传感结构较为复杂. Dong 等<sup>[8]</sup>提出了一种基于单模光纤和光子晶体保偏光纤模场适配形成模式相干的传感器, 该传感器结构小, 但不适用于远程和狭小空间的探测. 李伟等<sup>[9]</sup>提出基于蓝宝石光纤的高温传感器, 可用于高温测量; 隋成华等<sup>[10]</sup>利用电子束蒸发技术, 在蓝宝石光纤端面上生长出 ZnO 薄膜, 利用 ZnO 薄膜的禁带宽度检测相应的环境温度. 光纤法布里-珀罗 (F-P) 干涉仪的出现, 为温度测量提供了一种新的方法, 非本征的 F-P 干涉传感器测量温度一般低于  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 灵敏度也较低<sup>[11]</sup>. Zhang 等<sup>[12]</sup>提出的基于光子晶体 F-P 腔的高温传感器, 测量范围从室温到  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 灵敏度为  $0.018\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ . 也有人采用光纤布拉格光栅作为 F-P 腔<sup>[13]</sup>, 并对它的温度和应变特性进行了分析. 但对于大多

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61077006) 和陕西省自然科学基金 (批准号: FS11131) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: huml@nwu.edu.cn

数的基于 F-P 干涉的高温传感器, 制作起来都不容易且一致性也不好. 采用多模干涉的方法测量温度成为一种新的趋势<sup>[14,15]</sup>, Nguyen 等<sup>[16]</sup>提出了基于多模干涉理论的多模-单模-多模 (MM-SM-MM) 结构的高温传感器, 该传感器可以测量 900 °C 的高温, 灵敏度为 0.088 nm/°C, 传感方式为透射式.

在此基础上, 本文提出了一种结构简单、造价低、易于制作、高灵敏度和高稳定性的可用于远距离狭小空间温度测量的光纤高温探针传感器. 该传感器由一段 2 mm 的多模光纤接一段一端镀有银膜的单模光纤构成. 传感器在 470 °C—600 °C 的范围内具有很好的线性度和灵敏度.

## 2 传感器的设计与原理

传感器的结构如图 1 所示. 将一段剥去涂覆层的单模光纤一端切平整, 置于镀膜仪器中, 镀膜仪采用 MSP/ED-300C 磁控溅射镀膜机, 镀膜时间为 6000 s, 镀膜厚度为 2 μm; 将端面镀膜的单模光纤剥去涂覆层, 另一端与一段多模光纤熔接, 熔接机采用 Fujikura (FMS-60S), 放电电流 104 mA, 放电时间 1.5 s. 多模光纤的纤芯与包层的直径分别为 105/125 μm, 单模光纤的纤芯与包层直径分别为 9/125 μm. 在这个结构中, 多模光纤充当耦合器的作用, 将纤芯模耦合进单模光纤包层, 单模光纤作为传感臂, 银膜起高反镜的作用.

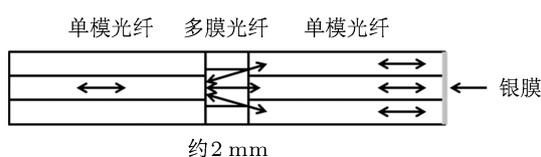


图 1 传感器的结构图

当光沿着多模光纤传输至单模光纤时, 由于纤芯失配, 多模光纤会将一部分纤芯传播的基模 (LP<sub>01</sub>) 耦合进单模光纤的包层, 包层模和纤芯模经银膜的反射后, 进入多模光纤再次耦合产生干涉图样. 由耦合模理论可知, 干涉谱的传输取决于相位匹配条件  $\cos^2(kL_0)$  其中  $k$  是包层模与纤芯模的耦合效率,  $L_0$  是多模光纤的长度. 因此, 不同长度的多模光纤会激发出不同的包层模, 影响熔接端面的场分布, 经过反复多次的试验, 多模光纤的长度最终定为 2 mm, 这样可以获得相对更高的消光比、更均匀的干涉图样、更加紧凑的结构和低损耗. 银膜

作为反射镜, 可以提高反射光的光强, 减小传输的包层模的损耗, 改善干涉谱图样.

由于单模光纤的纤芯和包层的折射率不同, 两束光分别沿着纤芯和包层传输, 产生了一定的相位差<sup>[17]</sup>, 即

$$\begin{aligned} \Phi^m &= \frac{2\pi(n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding}})}{\lambda} 2L \\ &= \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}^m}{\lambda} 2L, \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$  是光纤纤芯折射率,  $n_{\text{eff}}^{\text{cladding}}$  是光纤包层折射率,  $\Delta n_{\text{eff}}^m$  为纤芯与包层的有效折射率差,  $\lambda$  是自由空间波长,  $L$  是单模光纤即传感臂的长度.

光经过银膜反射后再次通过多模光纤时, 两束光在多模光纤内耦合, 形成干涉<sup>[15]</sup>. 由模式干涉理论可知, 在波长为  $\lambda_m$  处干涉谱的衰减最大:

$$\lambda_m = \frac{4\pi\Delta n_{\text{eff}}^m L}{(2m+1)\pi}, \quad (2)$$

两个干涉峰之间的间隔表示为

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_m &= \frac{4n_{\text{eff}}^m L}{(2m+1)(2m-1)} \\ &\approx \frac{\lambda_m^2}{\Delta n_{\text{eff}}^m L}, \end{aligned} \quad (3)$$

干涉谱的自由光谱范围可以表示为

$$\text{FSR} = \Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{2\Delta n_{\text{eff}}^m L}. \quad (4)$$

由 (4) 式我们可以看出, 当传感臂的长度  $L$  减小时, 自由光谱范围会增大.

当外界环境温度变化时, 纤芯和包层的折射率  $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$  和  $n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}$  会随之发生变化, 由 (2) 式可知, 干涉谱峰值的漂移量  $\delta\lambda_m$  可表示为

$$\delta\lambda_m = \frac{4\pi L_t}{(2m+1)\pi} \delta n_{\text{eff}}^m. \quad (5)$$

由 (5) 式可知, 干涉谱峰值的漂移量  $\delta\lambda_m$  正比于传感器的长度  $L_t$  和有效折射率  $\delta n_{\text{eff}}^m$  的大小.

随着温度的升高, 传感器由于热膨胀的影响, 长度会有所增加, 同时热光效应引起有效折射率的增加, 导致干涉光谱向长波方向漂移. 普通单模光纤的热膨胀系数为  $5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ <sup>[18]</sup>, 而单模光纤的热光系数为  $6.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ <sup>[19]</sup>, 热光系数大于热膨胀系数一个数量级以上, 在此热光系数起主要作用, 热膨胀的影响可以忽略不计.

为了验证不同长度传感器对温度的响应, 分别制作长度  $L = 4.2, 3.2, 2.2$  cm 的传感器 (其中多模

光纤的长度都为 2 mm), 其不同长度下的干涉光谱如图 2 所示. 由 (4) 式可知, 传感器的探测范围受其自由光谱范围限制, 长度  $L = 4.2, 3.2, 2.2$  cm 的自由光谱范围分别为 6.36, 8.04 和 12.3 nm.

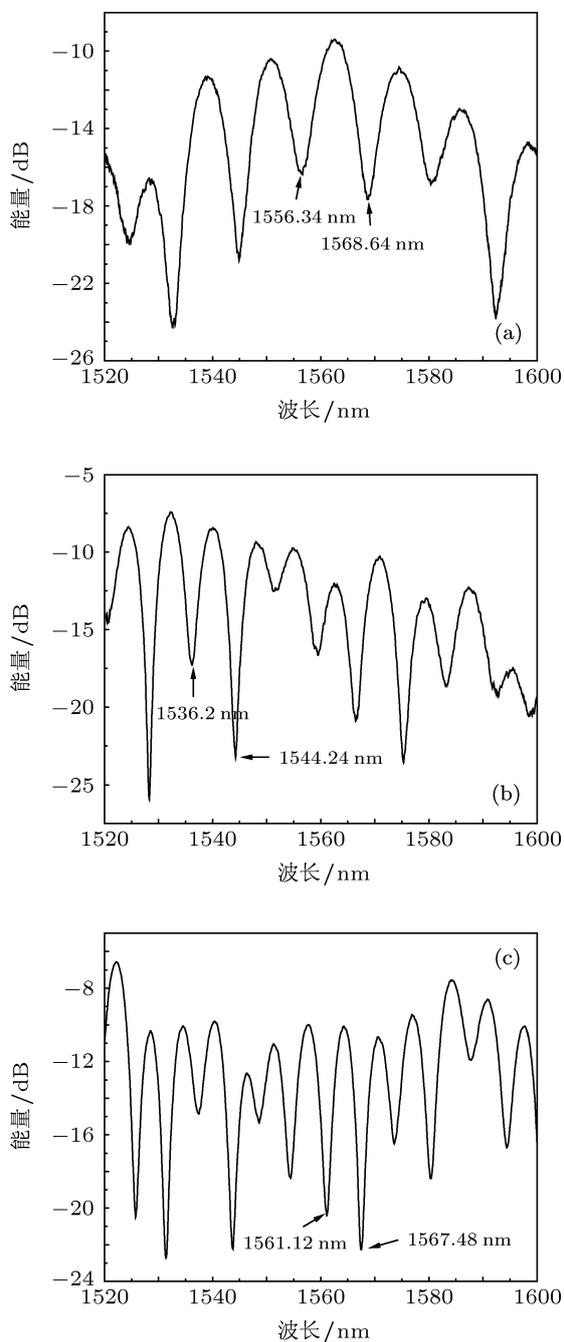


图 2 不同长度的传感器的干涉光谱图 (a)  $L = 2.2$  cm; (b)  $L = 3.2$  cm; (c)  $L = 4.2$  cm

### 3 实验与结果

光从宽带光源输出经过环形器到达传感器部分, 经传感器反射的光输入到光谱仪, 实验装置如图 3 所示.

### 3.1 高温实验

将传感器放置于加热板表面, 为了避免外界振动的影响, 把传感器用光纤加持器固定在温控箱的金属平台上, 使光纤处于自由伸直状态. 加热过程中, 温控箱内的温度从  $470\text{ }^{\circ}\text{C}$  逐渐上升到  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 每隔  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  记录一次光谱, 降温时方法不变.

图 4 为长度为 2.2 cm 的传感器在  $470\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内的升温 and 降温光谱变化图, 随着外界环境温度的不断升高, 干涉谱的峰值波长向长波

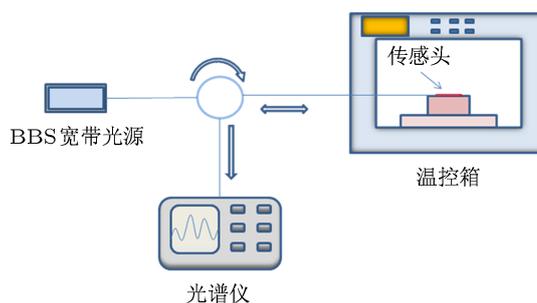


图 3 温度测量实验设备

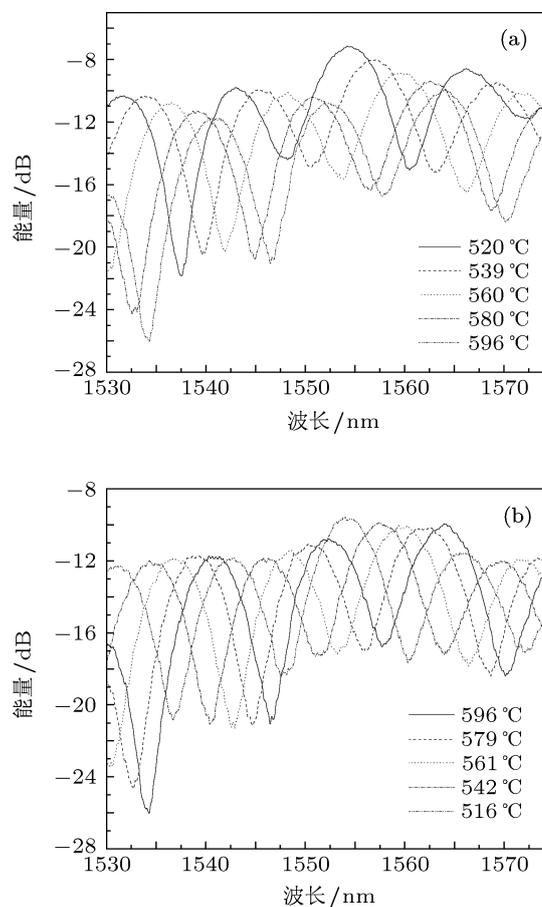


图 4 升温和降温过程光谱响应曲线 (a) 升温; (b) 降温

方向移动, 当温度降低时, 干涉谱的峰值波长向短波方向移动. 实验发现当温度升高到接近  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 干涉光谱仍然很平滑, 没有出现抖动, 由于受实验设备的影响, 没有进行  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上的高温测量. 但是从实验结果分析, 该传感器的高温测量上限将高于  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

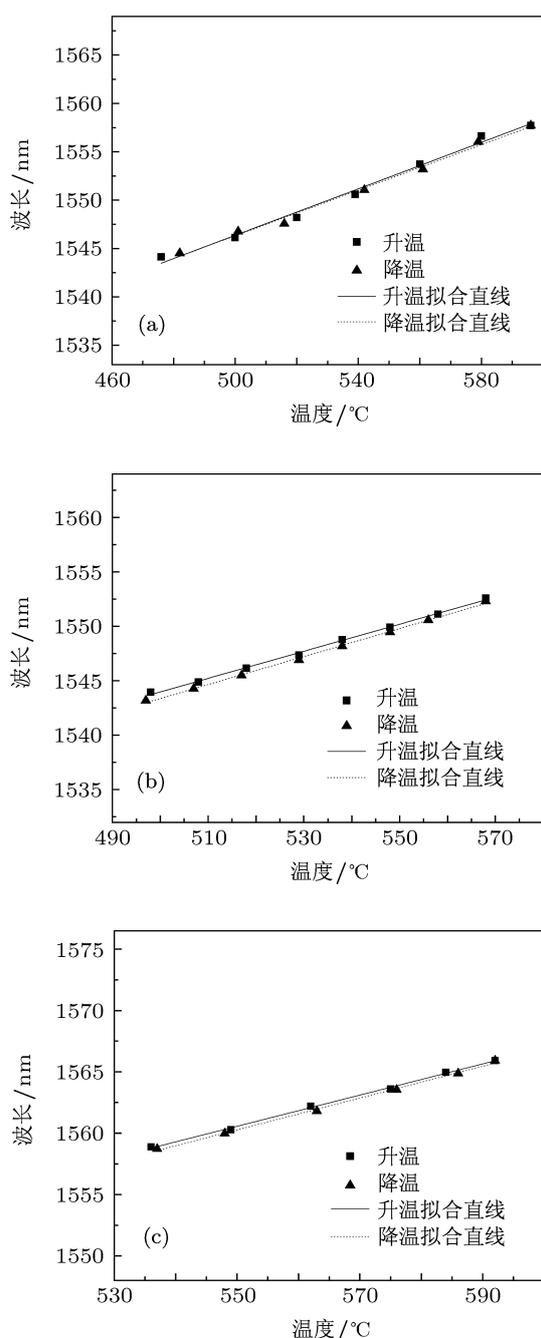


图5 不同长度的传感器升温 and 降温过程的响应曲线  
(a)  $L = 2.2\text{ cm}$ ; (b)  $L = 3.2\text{ cm}$ ; (c)  $L = 4.2\text{ cm}$

图5中, 拟合直线的斜率表示温度每变化  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  的干涉谱峰值波长的漂移量, 即为该传感器的灵敏度. 由实验结果可知,  $2.2\text{ cm}$  长度的传感器其升温

和降温时的灵敏度分别为  $117\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$  和  $120\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ , 拟合直线的线性度分别为  $0.997$  和  $0.999$ ;  $3.2\text{ cm}$  的传感器升温 and 降温时其灵敏度分别为  $124\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$  和  $128\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ , 拟合直线的线性度分别为  $0.997$  和  $0.998$ ;  $4.2\text{ cm}$  长度的传感器在升温 and 降温过程中的灵敏度为  $127\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$  和  $129\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ , 拟合直线的线性度分别为  $0.998$  和  $0.997$ . 随着传感器长度的增加, 传感器的灵敏度略有增大, 符合(5)式理论分析的结果, 但实验结果表明不同长度的传感器对温度的灵敏度相差不大. 由于采用波长解调的方法, 传感器的测量范围受其自由光谱范围的限制, 考虑到实际应用中应使传感器尺寸尽量小, 测量范围尽量大的原则, 因此采用  $2.2\text{ cm}$  长度的传感器.

由实验结果可知, 传感器在升降温过程中的响应有一定的差异, 这是由于当外界温度变化时, 能量由光纤表面传递到光纤纤芯内部需要一个过程, 纤芯内部的温度变化始终滞后于光纤表面和外界温度的变化, 导致了测量温度的滞后.

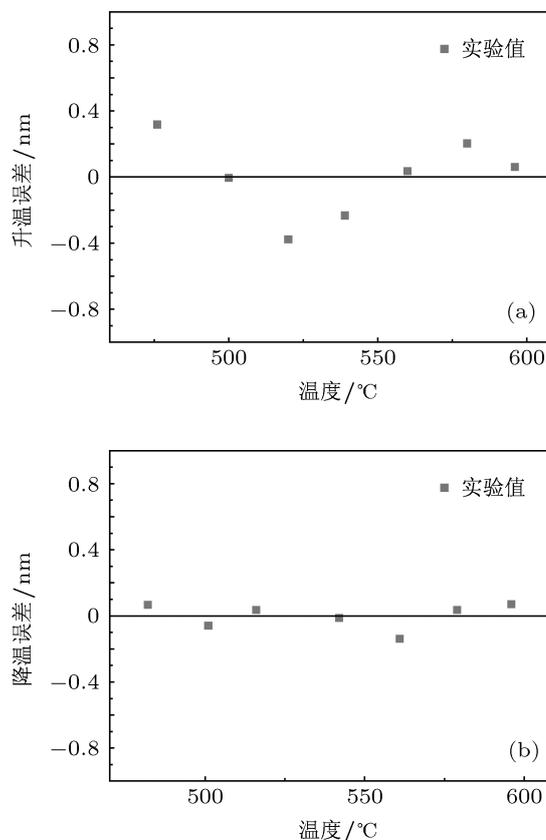


图6 传感器温度响应的理论值与实际测量值之间的误差 (a) 升温; (b) 降温

图6为  $2.2\text{ cm}$  的传感器温度响应的理论值与实际测量值之间的误差图, 升温 and 降温过程中的最

大误差不超过 0.4 nm, 即升温 and 降温过程的温度测量误差小于 4 °C.

### 3.2 稳定性实验

为了测试该传感器的稳定性, 将传感器置于 550 °C 的温控箱内, 先将温度稳定 30 min, 而后每隔 5 min 测量一次峰值波长, 测量其在 1 h 内的波长变化情况, 测量结果如图 7 所示.

由图可知, 在 1 h 内, 实验结果与理论值 1552.28 nm 的最大误差约为 0.30 nm, 传感器的灵敏度为 120 pm/°C, 因此温度测量误差小于 3 °C.

## 4 结论

本文提出了一种基于 Michelson 干涉的光纤高温探针传感器, 该传感器由一小段多模光纤连接一段端面镀有银膜的单模光纤构成, 传感器的长度约为 2.2 cm, 实验结果表明传感器在 470 °C—600 °C

范围内有良好的稳定性, 升温 and 降温过程的最大测量误差为 4 °C, 恒温过程的最大测量误差小于 3 °C, 线性度为 99.7%, 温度灵敏度为 120 pm/°C. 由于该传感器灵敏度高、结构简单、体积小、制作容易、造价低和抗电磁干扰等优点, 可适用于狭小空间和复杂环境下的温度测量, 在石油探测和油气田开发等领域有着广泛的应用前景.

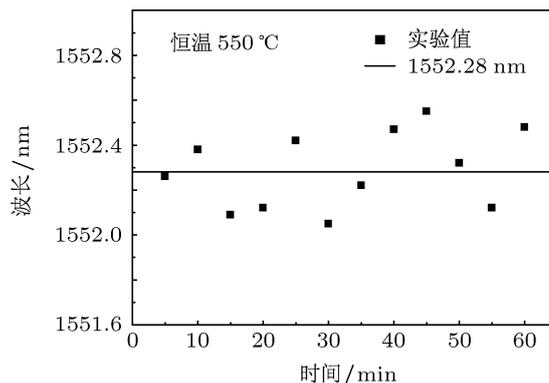


图 7 传感器恒温下的稳定性实验

- [1] Koo K P, Kersey A D 1995 *Lightwave Technol.* **13** 1243
- [2] Ball G A, Morey W W, Cheo P K 1993 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5** 267
- [3] Qiao X G, Jia Z A, Fu H W, Li M 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 494 (in Chinese) [乔学光, 贾振安, 傅海威, 李明 2004 物理学报 **53** 494]
- [4] Bhatia V, Vengsarkar A M 1996 *Opt. Lett.* **21** 692
- [5] Wang Y P, Member, Rao Y J 2005 *IEEE Sens. J.* **5** 839
- [6] Wang Y P, Rao Y J, Ran Z L, Zhu T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1432 (in Chinese) [王义平, 饶云江, 冉曾令, 朱涛 2003 物理学报 **52** 1432]
- [7] Liu Y G, Liu B, Feng X H, Zhang W G, Zhou G, Yuan S Z, Kai G Y, Dong X Y 2005 *Appl. Opt.* **44** 2382
- [8] Dong B, Zhou D P, Wei L 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 1011
- [9] Li W, Hao X J, Zhou H C 2010 *Elec-Opt. Technol. Appl.* **25** 54 (in Chinese) [李伟, 郝晓剑, 周汉昌 2010 光电技术应用 **25** 54]
- [10] Sui C H, Cai P G, Xu X J, Chen N B, Wei G Y, Zhou H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2792 (in Chinese) [隋成华, 蔡萍根, 许晓军, 陈乃波, 魏高亮, 周红 2009 物理学报 **58** 2792]
- [11] Rao Y J, Zhu T, Yang X C 2007 *Opt. Lett.* **32** 2262
- [12] Zhang J, Sun H, Rong Q Z, Ma Y, Liang L, Xu Q F, Zhao P, Feng Z Y, Hu M L, Qiao X G 2012 *Chin. Opt. Lett.* **10** 070607
- [13] Lü C G, Cui Y P, Wang Z Y, Yun B F 2003 *Acta Phys. Sin.* **53** 145 (in Chinese) [吕昌贵, 崔一平, 王著元, 恽斌峰 2003 物理学报 **53** 145]
- [14] Li Y B, Wang X L, Zhang C 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 091119
- [15] Liu Y, Wei L 2007 *Appl. Opt.* **46** 2516
- [16] Nguyen L V, Hwang D, Moon S, Moon D S, Chung Y 2008 *Opt. Express* **16** 11369
- [17] Tian Z B, Yam S S H, Loock H P 2008 *Opt. Lett.* **33** 1105
- [18] Liu Y, Liu B, Feng X, Zhang W, Zhou G, Yuan S, Kai G, Dong X 2005 *Appl. Opt.* **44** 2382
- [19] Zhang Z J, Shi W K, Gao K, Fang Z J 2004 *Opt. Technol.* **30** 525 (in Chinese) [张自嘉, 施文康, 高侃, 方祖捷 2004 光学技术 **30** 525]

# High temperature probe sensor with high sensitivity based on Michelson interferometer\*

Yang Shen Rong Qiang-Zhou Sun Hao Zhang Jing Liang Lei Xu Qin-Fang  
Zhan Su-Chang Du Yan-Ying Feng Ding-Yi Qiao Xue-Guang Hu Man-Li<sup>†</sup>

(*Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

(Received 27 September 2012; revised manuscript received 9 November 2012)

## Abstract

We propose a high sensitivity fiber optical temperature sensor with simple structure. The sensor is composed of a multimode fiber (MMF) and a short single mode fiber (SMF) whose end is coated with silver film as a reflective mirror. Due to the mismatch between the MMF core and the SMF core, part of guided mode is coupled with the cladding modes of downstream SMF cladding. The mode index difference between the fiber core and cladding is attributed to the phase difference, resulting in interference. When ambient temperature increases, the interference spectrum presents red-drift because of the difference in thermo-dependence. A high temperature sensitivity of 120 pm/°C is achieved, and the linearity is 99.5%. The configuration is simple and has a compact size, making it a good candidate for distant temperature sensing and oil prospecting.

**Keywords:** fiber sensor, temperature measurement, Michelson interferometer

**PACS:** 42.81.Pa, 07.20.Ka, 42.25.Hz

**DOI:** 10.7498/aps.62.084218

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61077006) and the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. FS11131).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: huml@nwu.edu.cn