

文章编号: 0253-2239(2009)02-0327-04

具有波长标定功能的多模光纤温度传感器

张 滢¹ 张建中¹ 刘志海¹ 孙伟民¹ 苑立波¹ 彭刚定²

(¹ 哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; ² 新南威尔士大学电子工程学院, 悉尼 2052 澳大利亚)

摘要 给出了基于宽谱光源问讯的具有波长标定功能的多模光纤温度传感器理论分析, 指出光谱中凹陷所对应的特征波长位置是由多模光纤中激励起的多个传输模式再次耦合到引出单模光纤中进行干涉决定; 特征波长由多模光纤的芯径、长度、纤芯和包层折射率决定。利用提出理论对光源光谱 ASE 的光谱范围中出现的特征波长的个数进行了分析模拟, 并优化设计了只出现一个特征波长的多模光纤温度传感器, 制作了三个长度分别约为 4 cm, 5.5 cm 和 10 cm 的只有一个特征波长的多模光纤温度传感头, 利用毛细玻璃管进行了封装, 并利用分辨率为 0.01 nm 的光谱分析仪进行了温度测量实验, 发现温度与特征波长漂移的线性关系约为 13 pm/°C。

关键词 光纤光学; 光纤传感; 多模光纤; 温度测量; 宽谱光源

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0327

Multimode Fiber Based Temperature Sensor with the Capability of Wavelength Encoding

Zhang Yan¹ Zhang Jianzhong¹ Liu Zhihai¹ Sun Weimin¹ Yuan Libo¹ Peng Gangding²

(¹ Department of Physics, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)
(² School of Electric Engineering, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia)

Abstract The theory analysis and experiments of multimode fiber (MMF) temperature sensors with the capability of wavelength encoding are presented. The analysis based on multimode-interference predicts the characteristic dip-wavelength positions of the MMF sensor according to the radius, the length and the refraction index of the MMF. It is used to optimize the sensor to produce only one characteristic dip-wavelength for a MMF temperature sensor in the wavelength range of a broadband source ASE. Three MMF temperature sensor heads with the length of 4 cm, 5.5 cm and 10 cm, packaged by a micro-silicon-tube, are fabricated and tested based on the ASE source with the wavelength range from 1525 nm to 1565 nm and optical spectral analyzer with the resolution of 0.01 nm separately. MMF temperature sensors with only one dip-wavelength and the temperature sensitivities ~ 13 pm/°C are gained, which agrees with the theoretical analysis well.

Key words fiber optics; fiber-optic sensor; multimode fiber; temperature measurement; broadband source

1 引 言

最近多模光纤(MMF)传感器再次在光纤传感领域受到广泛关注^[1~9]。其中包括利用渐变式多模光纤^[3]和具有柚子结构的多模光纤^[4]测量温度和应变; 利用多模光纤和长周期光纤光栅结合构成弯曲传感器^[5]; 利用多模光纤和光纤光栅实现温度应变同时测

量^[6]; 以及直接在多模光纤中写入光纤光栅^[7]等新颖的传感方案一一被提出。而文献[8,9]提出的基于阶跃式多模光纤的具有波长标定功能的温度传感器, 是利用多模光纤内模式相干, 在特定波长处形成凹陷, 此凹陷就成为温度标定的特征波长, 该传感结构可以用于高温测量。在文中对于特征波长的确定, 主要考

收稿日期: 2008-08-25; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 哈尔滨科技基金(2007RFLXG007)资助课题。

作者简介: 张 滢(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: elia_1561@yahoo.com.cn

导师简介: 张建中(1978—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光纤智能结构方面的研究。

E-mail: zhangjianzhong@hrbeu.edu.cn

虑两个主要模式之间的干涉而忽略了其他模式的作用,这样的近似不便于准确确定特征波长的位置。只有考虑多模干涉效应,可以较为准确地确定特征波长,从而才可以对此类传感器进行优化。

本文利用多模式干涉分析,对阶跃多模光纤温度传感器进行了模拟,对具有多个特征波长的温度传感器进行了温度测试。并重点设计在光源 ASE 光谱范围(1525~1565 nm)内具有一个主要特征波长的温度传感器,相应地制作了 3 个长度分别为 4.0 cm, 5.5 cm 和 10.0 cm 传感器头。最后对其温度响应进行了测试。

2 传感原理

基于阶跃多模光纤的温度传感器结构如图 1 所示,由两根普通单模光纤和一根长度为 L_0 的多模光纤直接焊接构成,并放置于微玻璃管内,保证多模光纤不被弯曲。传感系统由宽谱光源 ASE 和光谱分析仪以及计算机构成。光源将光抽运到多模光纤传感结构中,由于多模光纤内模式相干会形成不同光波长的透射能力不同,从而在特定波长处形成凹陷或凸起。凹陷较为容易判断,因而被用来表征此传感器,并称为特征波长。

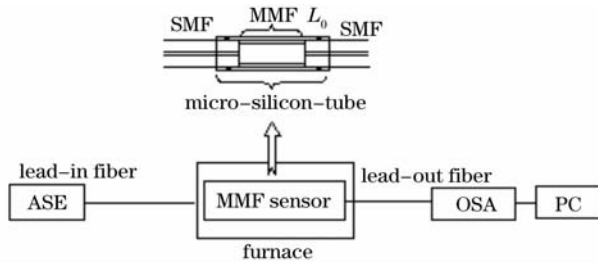


图 1 阶跃式多模光纤温度传感系统

Fig. 1 MMF based temperature sensor and sensing scheme

根据线性偏振近似^[10],光源激励起引入单模光纤(SMF)内的 LP_{01} 模式传输,当到达多模光纤时, LP_{01} 将激励起多模光纤内多个线偏 LP_{0i} 模式, LP_{0i} 模式通过多模光纤再次耦合到引出单模光纤到达光谱分析仪。多个线偏 LP_{0i} 模式之间将发生干涉,从而形成特定的相干光谱。不同的温度或应力施加于多模光纤上,将改变相干谱,因此相干谱可以用来感知多模光纤周围的温度和应变情况。到达光谱分析仪的相干谱 $s(\lambda)$ 可以表达为

$$s(\lambda) = \sum_{i=1}^N \eta_i^2 \cdot s_0(\lambda) + \sum_{i \neq j=1}^N \eta_i \cdot \eta_j \cdot s_0(\lambda) \cdot \cos(\Delta\varphi_{ij}), \quad (1)$$

式中 N 为多模光纤内激励起的模式数目, $s_0(\lambda)$ 为 ASE 光源的光谱。 η_i 和 η_j 分别为多模光纤内第 i 个和第 j 个模式的耦合效率,它们决定着模式 LP_{0i} 和 LP_{0j} 的耦合强度,可以容易利用参考文献[10]中模式重叠积分得到。经过多模光纤,第 i 个和第 j 个模式的相位差 $\Delta\varphi_{ij}$ 可以表达为

$$\Delta\varphi_{ij} = (\beta_i - \beta_j)L_0, \quad (2)$$

L_0 表示多模光纤长度。 β_i 和 β_j 表征模式 LP_{0i} 和 LP_{0j} 的传播常数,根据文献[9]有

$$\beta_i - \beta_j = \frac{u_i^2 - u_j^2}{2ka^2n_{co}}, \quad (3)$$

式中 $u_m = \pi(i-1/4)$ 和 $u_n = \pi(j-1/4)$, a 为多模光纤的纤芯半径, $k = 2\pi/\lambda$ 为波长为 λ 单色波的波数,而 n_{co} 则是纤芯的折射率。利用(1)式~(3)式,光通过任何长度的多模光纤,其相干谱可以被模拟。

3 温度传感实验

3.1 具有多特征波长的多模光纤温度传感器测试

随机截取了长度约为 13.1 cm 长的多模光纤和单模光纤焊接构成传感头。其透射谱如图 2(a)所示,可以看到相干谱随着温度增加发生了红移。利用(1)式模拟长度约为 13.08 cm 的多模光纤透射谱,如图 2(b)所示,其三个特征波长的位置和实验中的接近。但由于光谱分析仪分辨率、未考虑 ASE 光谱结构以及线偏振模式近似的原因,图 2(b)的光谱结构和图 2(a)的光谱结构有所偏差。13.1 cm 长多模光纤结构透射谱中的三个特征波长,分别在 1536 nm, 1546 nm 和 1556 nm 附近。测试了这三个特征波长对温度的响应,结果如图 3 所示,分别为 13.3 pm/°C, 12.2 pm/°C 和 14.7 pm/°C。而利用(1)式模拟的透射谱将随温度升高而红移,如图 2(b)所示,可以算出温度响应度为 13.3 pm/°C。模拟所用的多模光纤的参数示于表 1。实验中得到的不同特征波长的温度响应明显不同主要是由于 ASE 光源本身不够平坦所致。但不同特征波长的温度响应有着较好的重复性,经过标定可以用于温度测量。

表 1 实验模拟中的阶跃式多模光纤参数

Table 1 Parameters of multimode fiber in the experiment

Core/cladding diameter / μm	105/125
Core/cladding refractive index	1.4574/1.4420
Numerical aperture	0.2±0.02
Thermo-expansion coefficient / °C	5.5×10 ⁻⁷
Thermo-optic coefficient / °C	8.11×10 ⁻⁶

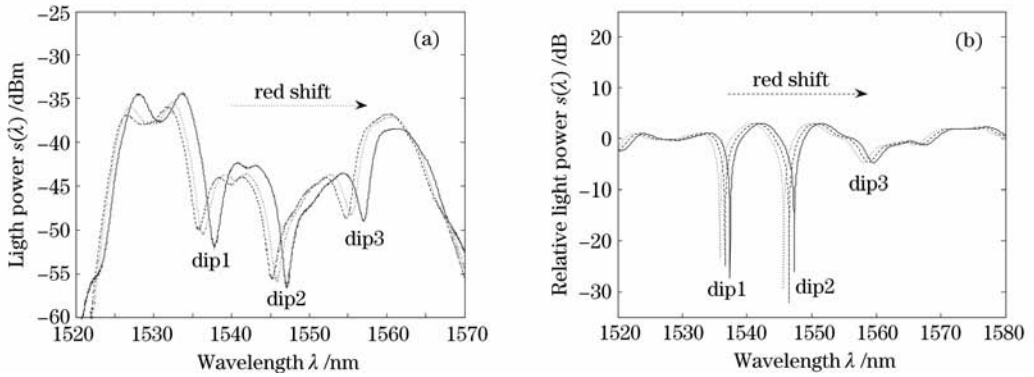


图 2 具有多特征波长的多模光纤温度传感器。(a) 长 13.1 cm 的多模光纤透射谱;(b) 模拟长 13.08 cm 的多模光纤透射谱

Fig. 2 (a) Transmission spectrum of 13.1 cm long MMF; (b) simulation transmission spectrum of 13.08 cm long MMF

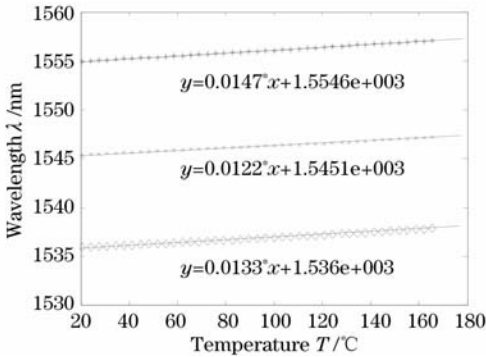


图 3 长 13.1 cm 的多模光纤特征波长的温度响应测试

Fig. 3 Temperature responses of 13.1 cm long MMF characteristic wavelength dips

3.2 具有单特征波长的多模光纤温度传感器制作与测试

尽管带有多个特征波长的传感头可以用来实现

温度传感,然而多个特征波长不便于复用,因而设计在光源光谱范围内只有一个特征波长的传感头具有实际意义。通过对不同长度而其他参数如表 1 所示的多模光纤透射谱的计算,类似于图 2(b)所示。发现在 1~11 cm 范围内有多个可以选择的多模光纤长度来实现在 ASE 光谱范围内只有一个主特征波长的多模光纤传感器。根据扫描计算结果,制作了多个不同长度的多模光纤传感头。其中长度分别为 4.0 cm,5.5 cm 和 10.0 cm 三个样品的透射谱如图 4(a)~图 4(c)所示。通过对比可以发现,多模光纤越长,相应的特征波长所在处凹陷越细锐,这样越有利于准确地确定特征波长而实现较为准确的传感。但实际中又希望传感头越小越便于应用。因而选取构成传感头的多模光纤的长度时要根据不同的需要而定。测试了三个样品的温度特性,结果分别为

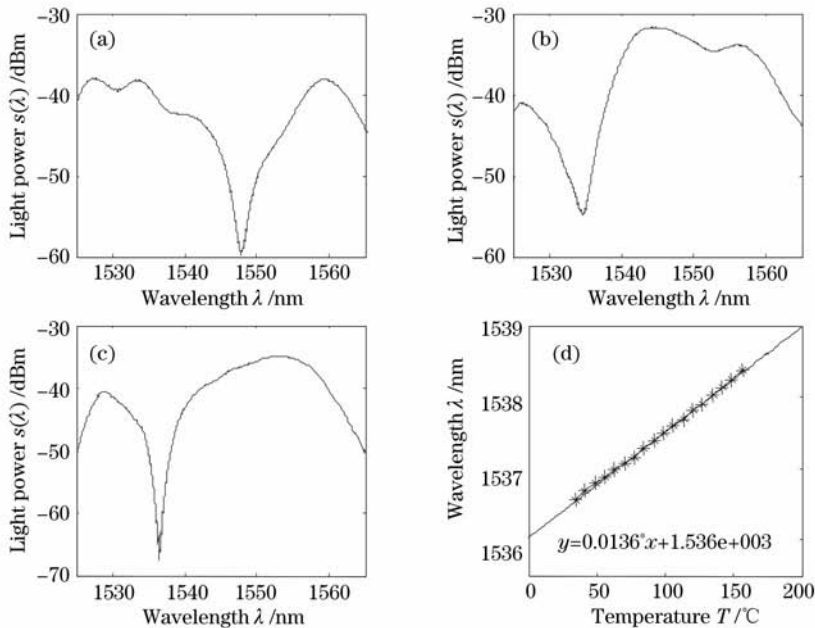


图 4 长 4cm,5.5 cm 和 10 cm 的多模光纤传感头透射谱及温度响应

Fig. 4 Transmission spectra of MMF temperature sensor of 4 cm 5.5 cm and 10 cm in length

14.0 pm/°C, 13.1 pm/°C 和 13.6 pm/°C。其中长度为 10.0 cm 的样品的结果在图 4(d) 给出。

4 结 论

利用模式间干涉形成的具有波长标定功能的多模光纤传感器对弯曲和振动交叉敏感, 因为弯曲会导致不同模式间耦合以及模式泄露^[11~14]。当用作温度传感器时要选择适当的封装避免弯曲。同时, 如图 4(a)~图 4(c) 所示, 此类多模光纤结构可以实现带阻型滤波功能。

利用多模干涉模拟计算透射式多模光纤温度传感器的透射谱及温度响应, 制作了一个长度约为 13.1 cm 的带有三个特征波长的多模光纤传感头, 测试其温度响应, 结果和模拟计算结果基本吻合。实验发现多个特征波长都可以用来标定温度, 但不同特征波长的漂移量略有不同, 三个特征波长对温度的响应度分别为 13.3 pm/°C, 12.2 pm/°C 和 14.7 pm/°C。优化设计了只有一个特征波长的多模光纤温度传感器; 相应制作了三个长 4.0 cm, 5.5 cm 和 10.0 cm 的不同样品, 测试了其温度响应, 发现温度灵敏度分别为 14.0 pm/°C, 13.1 pm/°C 和 13.6 pm/°C。

参 考 文 献

- 1 Arun Kumar, Ravi K. Varshney, Siny Antony *et al.*. Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **219**: 215~219
- 2 Arun Kumar, Ravi K. Varshney, Rakesh Kumar. SMS fiber optic microbend sensor structures; effect of the modal interference [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **232**: 239~244
- 3 Y. Liu, L. Wei. Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fiber [J]. *Appl. Opt.*,

- 2007, **46**(13): 2516~2519
- 4 Yuntao Wang, Haiwen Cai, Ronghui Qu *et al.*. Specklegram in a grapefruit fiber and its response to external mechanical disturbance in a single-multiple-single mode fiber structure [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(20): 3543~3548
- 5 O. Frazao, J. Viegas, P. Caldas *et al.*. All-fiber Mach-Zehnder curvature sensor based on multimode interference combined with a long-period grating [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 3074~3076
- 6 Da-peng Zhou, Li Wei, Wing-ki Liu *et al.*. Simultaneous measurement for strain and temperature using fiber Bragg gratings and multimode fibers [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(10): 1668~1672
- 7 Jiang Desheng, Li Jianzhi, Mei Jiachun. Temperature sensing properties of multimode fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 175~178
- 姜德生, 李剑芝, 梅家纯. 多模光纤光栅温度传感特性的实验研究 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 175~178
- 8 E. Li, X. Wang, C. Zhang. Fiber-optic temperature sensor based on interference of selective higher-order modes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**: 091119
- 9 E. Li. Sensitivity-enhanced fiber-optic strain sensor based on interference of higher order modes in circular fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(16): 1266~1268
- 10 Waleed S. Mohammed, Alok Mehta, Eric G. Johnson. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2): 469~477
- 11 L. Jeunhomme, J. P. Poeholle. Mode coupling in a multimode optical fiber with microbends [J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(10): 2400~2405
- 12 M. B. J. Diemeer, E. S. Trommel. Fiber-optic microbend sensors: sensitivity as a function of distortion wavelength [J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(6): 260~262
- 13 Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Influence of bending diameter on the output capability of multimode fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 323~326
- 李立波, 楼祺洪, 周 军 等. 弯曲直径对多模光纤激光器输出性能的影响 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 323~326
- 14 Wang Honghai, Tong Weijun. Effect of periodic scrambling on the transmitting characteristic of multimode fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2): 177~180
- 汪洪海, 童维军. 周期性扰动对多模光纤传输性能的影响 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 177~180