

多模光纤光栅温度传感特性的实验研究*

姜德生 李剑芝 梅家纯

(武汉理工大学光纤传感技术研究中心, 武汉 430070)

摘要: 利用氢敏化处理的多模光纤制作了多模光纤光栅,并对多模光纤光栅的温度传感特性进行了实验研究与理论分析,表明这种光栅三个反射峰的布拉格波长随温度变化均呈现出良好的线性关系,并且重复性相当好,同一光栅的各反射峰的理论温度灵敏度系数都等于 $0.01 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,实验测得的温度灵敏度系数为 $0.0098 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 或 $0.0099 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,与理论分析相当吻合,这些特性与单模光纤光栅的温度传感特性接近相同。因此可以用多模光纤光栅代替单模光纤光栅开发光纤光栅传感器,以降低成本;这一实验结果还可以作为对多模光纤光栅进一步深入研究的参考。

关键词: 导波与光纤光学;多模光纤;布拉格光栅;温度传感特性

中图分类号: TP212.14 文献标识码: A

Temperature Sensing Properties of Multimode Fiber Grating

Jiang Desheng Li Jianzhi Mei Jiachun

(Fiber Optic Sensing Technology Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

(Received 25 November 2002; revised 21 March 2003)

Abstract: Fiber Bragg grating was written in hydrogenated multimode fiber, and the temperature sensing properties of multimode fiber gratings are investigated experimentally and theoretically in this paper. Experimental results show that the Bragg wavelength of grating in multimode graded-index fiber is linearly dependent on its temperature; and its repeatability is good. The measured temperature sensitivity of each reflection peak is equal to $0.0098 \text{ nm}/^\circ\text{C}$; the temperature sensitivity attained from experimental data is tallies with theoretical analysis. The characteristics are similar to that of a conventional Bragg grating in single-mode fiber. So the multimode fiber grating may replace single-mode fiber grating to produce fiber sensors. The experimental results can also provide guidance for further studying on multimode fiber Bragg gratings.

Key words: guided wave and fiber optics; multimode fiber; fiber Bragg grating (FBG); temperature sensing characteristics

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)在光纤通信和光纤传感中的许多应用,已经日益引起人们的重视。光纤布拉格光栅是利用光纤材料的光敏特性在纤芯内形成的空间相位光栅^[1],即利用紫外光曝光引起纤芯折射率的永久变化形成的光栅。其作用实质是在纤芯内形成一个窄带的滤光器或反射镜,利用这一特性可构成

许多独特性能的光纤传感器^[2,3]。当光纤布拉格光栅的温度发生变化时,会引起光纤布拉格光栅的有效折射率 n_{eff} 和栅距 Λ 发生变化,从而导致光栅反射光的布拉格波长 λ_B 也发生变化($\Delta\lambda$),利用光纤布拉格光栅这个特性可以制作光纤光栅温度传感器。

目前几乎所有实用的光纤光栅都是单模的,由于用单模光纤光栅做传感器对光源、光探测器、光纤连接等要求都很高,所以将其产业化的成本比较高。因为多模光纤光栅具有以下优点:1) 很容易与光源耦合,可降低产业化的成本;2) 具有多峰结构的特点,能够给人们提供更多的信息,这对于光纤传感很

* 国家自然科学基金(50179029)资助课题。

E-mail: lijianzhigang@163.com

收稿日期:2002-11-25;收到修改稿日期:2003-04-21

有利。目前中心波长为1550 nm的超发光二极管在国内没有生产,国外也只有少数厂家可以生产,价格高昂,而中心波长为1310 nm的发光管或超发光二极管相对来说比1550 nm的发光管便宜得多,有利于光纤传感器的产业化。故对布拉格波长为1310 nm的多模光纤光栅的研究具有重要意义。近年来国外已分别报道了布拉格波长为753 nm和1550 nm多模光纤光栅的传感特性^[4,5],在国内还未见此类的报道。本文首次对布拉格波长为1310 nm的多模光纤光栅的传感特性进行了研究,并针对其多峰结构的特点,提出了利用多模光纤光栅制造传感器的新设想及新的解调应用前景。

2 光纤光栅的温度特性理论分析

光纤光栅反射光的布拉格波长 λ_B 满足如下关系:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中, Λ 为栅距也称光栅周期, n_{eff} 为光栅区的有效折射率。当光栅温度发生变化时,光栅的折射率和光栅的周期都会发生变化,从而形成了一个具有新的折射率调制和新的周期的光栅,使得原来光纤光栅的布拉格波长发生漂移,布拉格波长随温度变化的

关系为^[6,7]

$$\Delta\lambda = (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \cdot \lambda_B, \quad (2)$$

温度灵敏度公式为

$$\Delta\lambda/\Delta T = (\alpha + \xi)\lambda_B, \quad (3)$$

式中, $\Delta\lambda$ 表示温度变化造成的 λ_B 漂移幅度; α 为光纤材料的热膨胀系数,描述栅距随温度的变化; ξ 为热光系数,描述光栅的有效折射率随温度的变化; ΔT 为温度变化量。

$\Delta\lambda$ 与 ΔT 之间呈现线性关系,通过测量光纤光栅反射波长的移动 $\Delta\lambda$,便可确定光栅外的环境温度。对于石英光纤通常 α 为 $0.55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, ξ 为 $7 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,通过计算得到布拉格波长为1310 nm 多模光纤光栅的温度灵敏度为0.01 nm/ $^\circ\text{C}$ 。

多模光纤光栅的反射波为多峰结构,并满足下列关系^[4,8]:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 \sqrt{1 - 4\Delta \frac{N+1}{V}}, \quad (4)$$

β 为传播常量; n_1 为芯径的折射率; Δ 为相对折射率之差; N 为主模的阶数; ν 为归一化频率 ($\nu = 2\pi a NA/\lambda$)。 (4) 式根号中第二项比 1 小得多,数值孔径 $NA = n_1 \sqrt{2\Delta}$, 当满足布拉格条件时有 $\beta = \pi/\Lambda$ 。通过对(4)式进行微分化简整理后可得到

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{\lambda^2}{2n_1\Lambda^2} \frac{d\Lambda}{dT} + \left[\frac{\lambda^2}{2n_1^2\Lambda} - \frac{\lambda^2(N+1)(2n_1-n_2)}{2\pi\alpha n_1^2 \sqrt{2n_1(n_1-n_2)}} \right] \frac{dn_1}{dT} + \frac{\lambda^2(N+1)}{2\pi\alpha n_1 \sqrt{2n_1(n_1-n_2)}} \frac{dn_2}{dT}. \quad (5)$$

对掺锗的石英光纤 dn_1/dT 和 dn_2/dT 在波长为 589 nm 时为 $1 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。热膨胀系数 $\alpha = (d\Lambda/dT)/\Lambda$ 为 $0.55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ^[1,9]。参照以上数据,可得到(5)式右边第一项要比第二项和第三项小一个数量级。这说明对温度灵敏度的影响受折射率的变化要比热膨胀显著。文献[7]推导的方程计算得到温度灵敏度 $d\lambda/dT$ 随 N 的变化最大不超过 1.3%。本文对(4)式重新进行推导得到方程(5)式,经过计算得到温度灵敏度 $d\lambda/dT$ 随 N 的变化最大不超过 0.07%。因为这些值很小,所以各模式反射波的温度灵敏度几乎是一样的,即多模光纤光栅的多个反射峰的布拉格波长随温度变化的漂移幅度是相同的。

3 实 验

3.1 实验过程

实验采用长飞光纤光缆公司生产的渐变型多模光纤,纤芯直径为 50 μm ,数值孔径为 0.2,包层直径

为 125 μm 。为了提高多模光纤的光敏性,将多模光纤置于氢气高压器中,在常温下渗氢(载氢)两周。我们采用相位掩模板复制法制作多模光纤光栅,写入光栅的紫外光源为波长 248 nm 的准分子激光器(德国 Lambda Physik 公司的 COMPEX 150T 型)。多模光纤光栅写好后在 80 $^\circ\text{C}$ 温度下退火 48 h 就得到实验用的多模光纤光栅。

温度传感特性的实验装置如图 1 所示。光源为 1300 nm 的超发光二极管(SLED),型号为 5S423,带宽为 50 nm 左右,功率为 100 μW ; OSA (Optical spectrum analyzer) 为 AQ-6317B 光谱仪,波长分辨率设置为 0.05 nm。

光纤布拉格光栅置于恒温控制箱中。光源发出的宽带光经光分路器(coupler)耦合进多模光纤光栅,光栅反射回来的光再经过光分路器传输到 AQ-6317B 光谱仪进行反射数据检测;或者从光纤光栅的另一端直接接入光谱仪,进行透射数据检测。

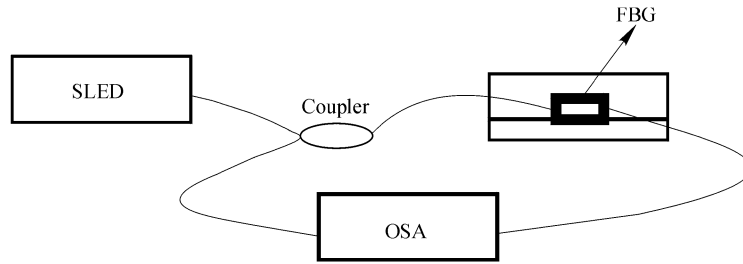


Fig. 1 Schematic diagram of measurement temperature. SLED: superluminescent diode

实验中,将 $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为温度起点,控制恒温箱的温度,使箱内温度逐渐升高,温度每升高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 让恒温控制箱温度恒定,分别测量透射图谱与反射图谱,并记下三个反射峰的布拉格波长,恒温箱的温度控制范围 $19\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

由反射图谱测得的三个反射峰的布拉格波长和透射测得的三个反射峰的布拉格波长基本相同,故本文只采用透射图谱的数据进行分析。

3.2 实验结果分析与讨论

实验结果如图 2、图 3 所示。

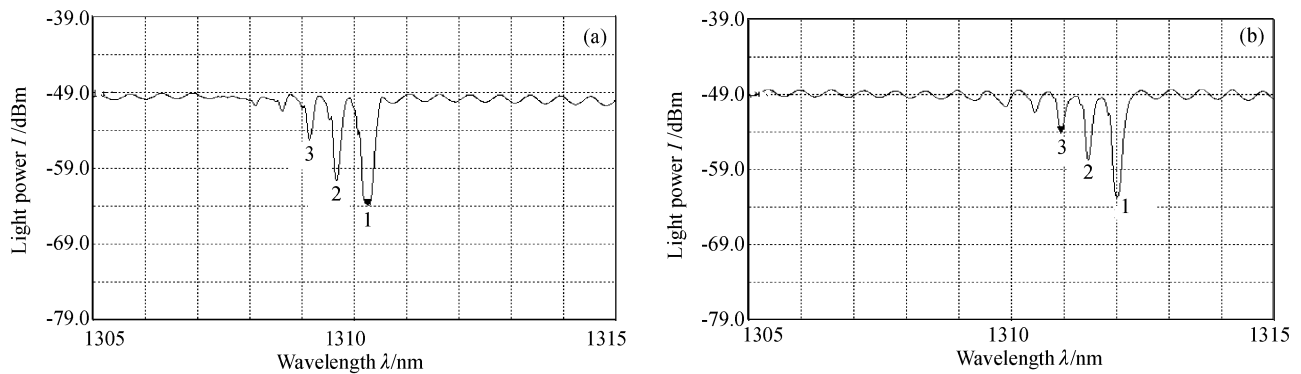


Fig. 2 Transmission spectrum of FBG at different temperature. (a) $T=19\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$

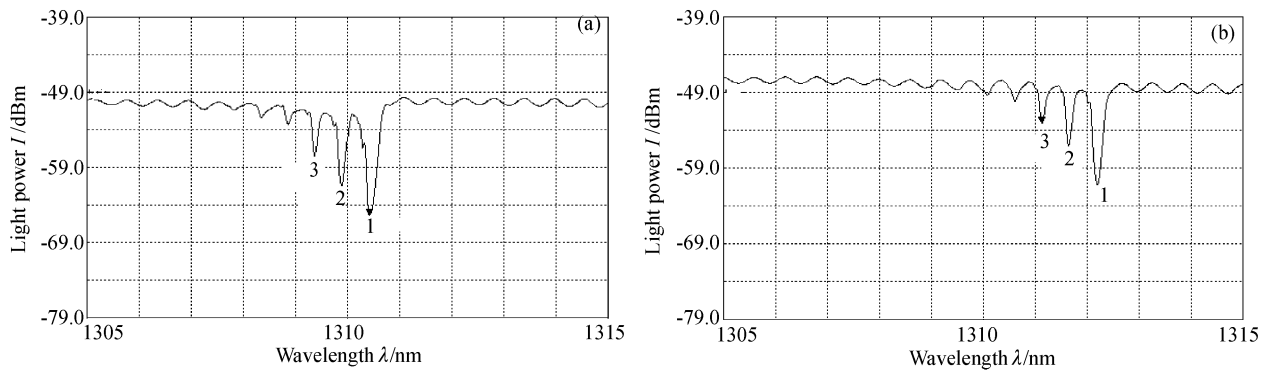


Fig. 3 Transmission spectrum of FBG at different temperature. (a) $T=19\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$

从图 2、图 3 中可以看出:每一多模光纤光栅有明显的 3 个反射峰,其中 1[#] 多模光栅反射峰 1、2、3 的布拉格波长分别由 1310.26 nm 、 1309.66 nm 、 1309.14 nm 变为 1312.00 nm 、 1311.46 nm 、 1310.94 nm ,相同温度下,各反射峰之间的间隔基本为 0.5 nm ;2[#] 多模光栅反射峰 1、2、3 的布拉格波长分别由 1310.42 nm 、 1309.90 nm 、 1309.38 nm 变为 1312.20 nm 、 1311.64 nm 、 1311.12 nm ,相同温度下,各反射峰之间的间隔基本为 0.5 nm 。图 4 中各种点标记为原始数据所做的曲线图,直线为拟合曲线,

可以看出所作的拟合曲线与实验数据相当重合,某些微小偏差,可能是由于箱门密封性不好,测谱时箱内温度场还没有达到热平衡所致。从图 4 中所作的拟合曲线的公式可以看到 1[#] 多模光栅 3 个反射峰的温度灵敏度分别为 $0.0098\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 、 $0.0099\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 、 $0.0099\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$;2[#] 多模光栅 3 个反射峰的温度灵敏度为 $0.0098\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 、 $0.0099\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 、 $0.0099\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,即每个峰平均每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 向长波方向漂移约 10 pm (0.01 nm)。本实验结果与根据光纤的热膨胀系数和热光系数计算得到的结果 $0.01\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 很吻合,这表明

各反射峰随温度的升高向长波方向漂移的幅度相同。这与多模光纤光栅的温度特性理论中各反射峰的温度关系分析一致。

从拟合曲线可知各反射峰随温度的变化都呈良

好的线性关系,并且1[#]多模光栅与2[#]多模光栅的温度灵敏度基本相同,而且多次进行温度实验,多模光栅的温度灵敏度为0.0098 nm/°C,可以看出多模光栅的重复性相当好。

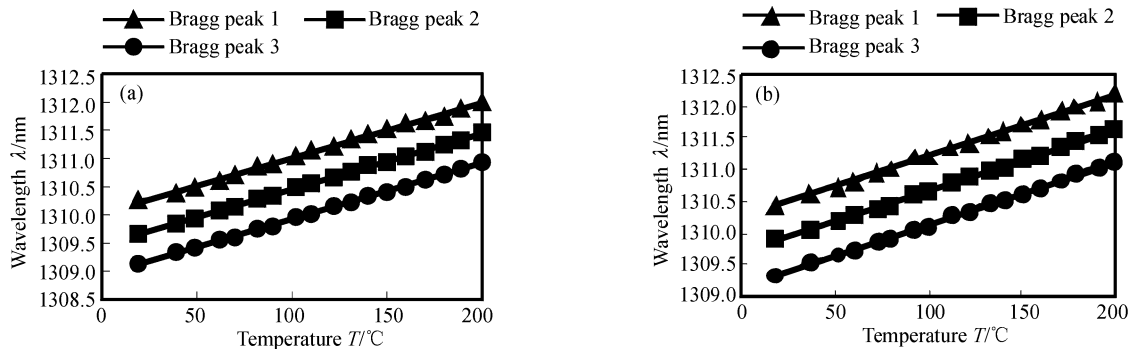


Fig. 4 Temperature response curve of FBG. (a) 1[#] grating (equation of each peak $\lambda_1 = 0.0098X + 1310$, $\lambda_2 = 0.0099X + 1309.5$, $\lambda_3 = 0.0099X + 1308.9$), (b) 2[#] grating (equation of each peak $\lambda_1 = 0.0098X + 1310.2$, $\lambda_2 = 0.0098X + 1309.7$, $\lambda_3 = 0.0099X + 1309.1$)

1[#]退火后的波长为1310.26 nm,而进行温度实验后的波长为1310.08 nm。2[#]光栅退火后的波长为1310.42 nm,经过温度实验后测的常温下的布拉格波长为1310.26 nm,与进行温度实验前的波长相比漂移了约0.2 nm。这一实验结果表明,若要将光纤光栅作为高温传感器使用时,应先进行高温退火处理。

结论 本文对布拉格波长为1310 nm的多模光纤光栅的温度特性进行了实验研究,表明多模光栅的布拉格波长随温度的变化呈现良好的线性关系,与理论分析吻合;多模光纤光栅实验的重复性优良,其特性与单模光纤光栅的传感特性接近相同,故可以用多模光纤光栅可以降低传感器产业化成本;由于多模光纤光栅具有多峰结构的特点,有可能解决一直困扰单模光纤光栅温度与应力交叉敏感的问题^[10~13]与光栅解调中匹配光栅易受外界因素影响的问题,这对于光栅解调仪很有用处,故对多模光纤光栅的研究具有十分重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15):823~825
- 2 Bennion I, Reid D C J, Rowe C J *et al.*. High-reflectivity monomode-fiber grating fibers. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(6):341~343
- 3 Whalen M S, Divino M D, Alferness R C. Demonstration of a narrowband Bragg-reflection filter in a single-mode fiber directional coupler. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(12):

- 681~682
- 4 Zhao W, Claus R O. Optical fiber grating sensors in multimode fibers. *Proc. SPIE*, 2000, **3986**:50~55
- 5 Mizunami T, Djambova T V, Niiho T *et al.*. Bragg gratings in multimode and few-mode optical fibers. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(2):230~235
- 6 Liao Yanbiao. *Fiber Optics* (光纤光学). Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 197~206 (in Chinese)
- 7 Guan Baiou, Liu Zhiguo, Kai Guiyun *et al.*. Temperature sensor based fiber Bragg grating. *J. Transduction Technol.* (传感技术学报), 1996, (2):89~93 (in Chinese)
- 8 Liao Bangquan, Zhao Qida, Feng Dejun *et al.*. Coupled-mode theory for optical fiber and its application to fiber Bragg grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(11):1340~1344 (in Chinese)
- 9 Meltz G, Morey W W. Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity. *Proc. SPIE*, 1992, **1516**:185~189
- 10 Wang Muguang, Wei Huai, Tong Zhi *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single dual-period fiber grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7):867~869 (in Chinese)
- 11 Yu Youlong, Tan Huayao, Zhong Yongkang. A fiber Bragg grating sensor system with interferometric demodulation technique. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(8):987~989 (in Chinese)
- 12 Guan Baiou, Tam H Y, Ho S L *et al.*. Study on strain/temperature two parameters sensing with a single fiber Bragg grating. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(4):372~374 (in Chinese)
- 13 Tang Wei, Shi Yikai. Optical fiber Bragg grating sensing technology. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2002, **10**(1):79~83 (in Chinese)