

文章编号 : 0253-2239(2002)07-0867-03

利用双周期光纤光栅实现应变和温度同时测量*

王目光 魏 淮 童 治 李唐军 简水生

(北方交通大学光波所, 北京 100044)

摘要: 提出了一种新颖双周期光纤光栅传感器。在同一段氢载光纤上先后写入长周期光纤光栅、短周期布拉格光纤光栅, 利用长周期光栅和布拉格光栅对应变和温度敏感性的差异, 可实现应变和温度的同时测量。实验中采用这种灵敏结构的双周期光栅, 在 0~1700 μs 和 20 $^{\circ}\text{C}$ ~120 $^{\circ}\text{C}$ 范围内, 测量精度可达到 $\pm 16 \mu\text{s}$ 和 $\pm 0.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

关键词: 双周期光纤光栅; 应变; 温度; 同时测量

中图分类号: TP212.14 文献标识码: A

1 引 言

光纤光栅的出现给发展缓慢的光纤传感领域带来了新的动力。传统的光纤传感器由于基于光强的测量原理, 稳定性受到环境的制约。而光纤光栅传感器是一种本征型传感器, 采用波长编码方式, 且易于复用, 实现分布式测量, 因此得到了广泛的重视。

但光纤光栅布拉格波长对应变和温度的交叉敏感性一直是光纤光栅传感器的一个关键问题。针对这一问题, 人们已提出了很多解决方案^[1~7], 包括双布拉格光栅法^[1], 不同包层直径法^[2], 长周期光栅(LPG)布拉格光栅(FBG)混合法^[3], 最近 Caraleiro 等人分别在掺锗和硼锗共掺光纤上写入光栅, 利用它们对应变、温度的不同敏感性, 也实现了应变和温度的同时测量^[4]。

但这些方案有一个共同的缺点, 即需要两个光栅, 且难以保证测量的是同一点的应变和温度情况, 从而影响了测量精度。据此, Bhatia 等人利用一个长周期光纤光栅的两个谐振波长对应变和温度的不同敏感性, 实现了应变和温度的同时测量^[5]。但是该方案需要两个发光二极管光源, 且由于两波长间隔较大, 光谱仪的扫描带宽很宽, 测量的实时性受到限制。针对这一问题, 本文提出了一种基于双周期长周期光栅、布拉格光栅复合型光纤光栅传感单元的点传感器。在裸光纤的同一点先后写入长周期光栅和布拉格光栅, 形成双周期光纤光栅, 利用长周期光栅和布拉格光栅对应变和温度的不同敏感性, 实

现了应变和温度的同时测量。该方案确保了测量位置, 提高了测量精度。且长周期光栅的周期(大约 200 μm ~500 μm)比布拉格光栅周期(大约 0.5 μm)大得多, 易于实现二次写入, 因此具有良好的实用价值。

2 原 理

实验系统原理图如图 1 所示。系统核心传感单元是一个 2 cm 长的双周期光纤光栅, 该双周期光纤光栅的特点是将长周期光栅和布拉格光栅巧妙地写于同一段氢载光纤, 保证了测量的是同一点的应变和温度。假定波长变化量分别与应变 ϵ 和温度的改变量 ΔT 呈线性关系, 且忽略应变、温度的交叉感应, 布拉格光栅波长 λ_B 对应变和温度的敏感性可用下式表示:

$$\Delta\lambda_B = K_{\epsilon B}\epsilon + K_{TB}\Delta T, \quad (1)$$

式中 $K_{\epsilon B}$ 、 K_{TB} 分别为布拉格光栅应变系数和温度系数, 其大小主要由光纤材料、布拉格光栅周期决定。

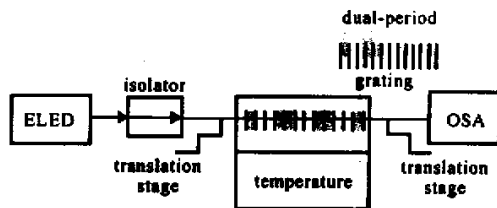


Fig.1 Schematic diagram of dual-period grating sensor. ELED: edge-emitting LED; OSA: optical spectrum analyzer

长周期光纤光栅是基模与同向包层模耦合形成的^[8], 因此表现出与布拉格光栅不同的复杂应变温

* 国家自然科学基金(69907001)资助课题。

E-mail: wangmuguang@263.net

收稿日期 2001-08-06; 收到修改稿日期 2001-09-26

度敏感性,但一般亦可认为长周期光纤光栅中心波长 λ_L 分别与应变和温度呈线性关系,可简写为

$$\Delta\lambda_L = K_{\varepsilon L}\varepsilon + K_{TL}\Delta T, \quad (2)$$

式中 $K_{\varepsilon L}$ 、 K_{TL} 分别为长周期光栅应变系数和温度系数,它们不仅和光栅材料有关,且和长周期光栅周期、包层模耦合阶数有关。因此由(1)式、(2)式可看出,通过双周期光纤光栅中的 λ_L 、 λ_B 的改变量,利用矩阵法可以很容易获知应变和温度的变化量。(3)式给出了它们之间的关系:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon B} & K_{TB} \\ K_{\varepsilon L} & K_{TL} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta\lambda_L \end{bmatrix}. \quad (3)$$

实验和理论都已表明^[3,9,10],长周期光纤光栅对温度的敏感性比布拉格光栅强得多,而布拉格光纤光栅与长周期光纤光栅相比对应变较敏感。因此 $\Delta = K_{\varepsilon B}K_{TL} - K_{\varepsilon L}K_{TB} \neq 0$,且较大,确保了(3)式有唯一解。显然通过多次的重复实验,确定出系数矩阵的值就可以实现应变和温度的同时测量。

3 实验与结果分析

实验所用长周期光栅、布拉格光栅复合型双周期光纤光栅是采用扫描法紫外侧面写入的,所用光纤由 Corning 公司的 G.652 普通单模光纤在室温和 1.1×10^7 Pa 大气压下氢载处理 8 周而成。紫外光源采用工作波长为 248 nm 的 KrF 准分子激光器,光束面积为 $15 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,首先在该段裸光纤上写入长周期光纤光栅,随后在同一点写入布拉格光纤光栅,同时用光谱仪进行实时监测。写入时波长分别为 1580 nm 和 1542.06 nm,经 160°C 高温退火 5 h,双周期光栅的双波长分别为:长周期光栅波长 $\lambda_L = 1529 \text{ nm}$,布拉格光栅波长 $\lambda_B = 1541.20 \text{ nm}$,如图 2 所示,所用光源是中心波长为 1545.5 nm 的边缘发射发光二极管(ELED),光谱仪为 AQ6317,分辨率选择 0.05 nm。

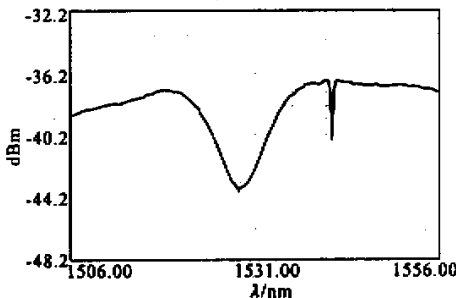


Fig. 2 Transmission spectrum of dual-period grating

将该光栅置入图 1 所示的实验系统中,利用移动台和恒温箱来改变光纤光栅的应变和温度。首先固定应变(温度),改变温度(应变),由光谱仪读出其相应的波长改变量,可得到双周期光栅的两波长各自的温度(应变)响应曲线。图 3(a)是在室温下所测的实验数据及波长改变量与应变的响应拟合曲线;图 3(b)是在无应变的情况下测得的实验数据和拟合的波长改变量与温度变化的关系曲线。

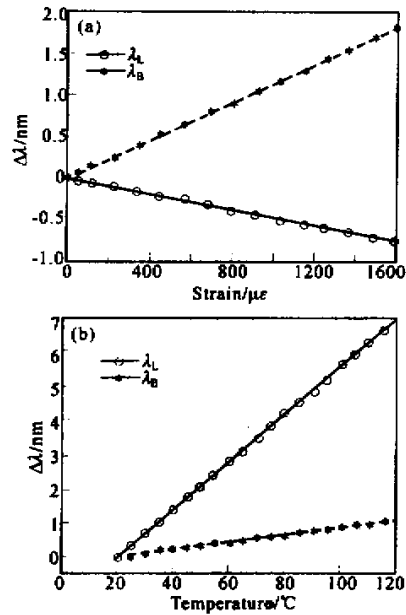


Fig. 3 (a) λ_B , λ_L versus strain in $\mu\varepsilon$ measured at a temperature of 20°C ; (b) λ_B , λ_L versus temperature in $^\circ\text{C}$ measured without any strain applying on it

由图 3 中的拟合曲线可知,双周期光纤光栅的应变温度响应系数矩阵为

$$\begin{bmatrix} K_{\varepsilon B} & K_{TB} \\ K_{\varepsilon L} & K_{TL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0011 & 0.0105 \\ -0.0005 & 0.0694 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

所以由(4)式可得到

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 850.594 & -128.692 \\ 6.128 & 13.482 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta\lambda_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 4.017 \\ 0.113 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中等式右边第二项为修正项。由(5)式可知,双周期光纤光栅中的长周期光栅波长 λ_L 的变化表现为负应变系数; $K_{\varepsilon L} = -0.5 \times 10^{-4} (\text{nm}/\mu\varepsilon)$,这与文献[9]中的报道相符,据分析,这与光纤芯层和包层材料的弹光系数有关,虽然,应力使光栅的周期变大,但由于光栅的芯层和包层的相对折射率变小且起主要作用,从而由长周期光纤光栅相位匹配公式

$$\lambda_L = (n_{\text{core}}^{\text{eff}} - n_{\text{clad}}^{\text{eff}}) \Lambda$$

可知, 谐振波长 λ_L 可以表现为负应变系数特性, 幸运的是这样可以使系数行列式较大, 有利于提高测量精度。我们利用该应变温度传感数学模型进行了应变温度传感实验, 发现在不考虑其他计量器误差的情况下, 最大误差为 $\pm 16 \mu\epsilon$ 和 $\pm 0.8 \text{ }^\circ\text{C}$, 可测应变温度范围是 $0 \sim 1700 \mu\epsilon$, $20 \text{ }^\circ\text{C} \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$ 。此时光谱仪分辨率为选择 0.05 nm 。分辨率与测量精度直接相关, 如果采用分辨更高的波长检测方式, 可以进一步提高该传感方案的测量精度。

结束语 设计和制作了一个新颖的应变温度同时测量传感器单元: 双周期(布拉格光栅和长周期光栅)复合光纤光栅。该传感单元结构精巧, 易于制作, 布拉格光纤光栅和长周期光纤光栅写于同一点, 确保所测应变和温度为同一位置, 有较高的测量精度, 因此具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Xu M G, Archambault J L, Reekie L *et al.*. Discrimination between strain and temperature using dual-wavelength fibre grating sensors. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(13):1085~1087
- [2] James S W, Dockney M L, Tatam R P. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-

fiber Bragg grating sensors. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(12):1133~1134

- [3] Patrick H J, Williams G M, Kersey A D *et al.*. Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination. *Photon. Technol. Lett.*, 1997, **8**(9):1223~1225
- [4] Cavaleiro P M, Araujo F M, Ferrerira L A *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using Bragg gratings written in germanosilicate and boron-doped germanosilicate fibers. *Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(12):1635~1637
- [5] Bhatia V, Campbel D, Claus R O. Simultaneous strain and temperature measurement with long-period gratings. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(9):639~641
- [6] Du Weichong, Tao Xiaoming, Tam Hwa-Yaw. Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature. *Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1):105~107
- [7] Guan Baiou, Tam Hwa-Yaw, Tao Xiaoming *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating. *Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(6):675~677
- [8] Chen Genxiang, Liu Chunling, Li Tangjun *et al.*. Study on long-period fiber grating. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 2000, **20**(5):624~628(in Chinese)
- [9] Bhatia V, Vengsarkar A M. Optical fiber long-period grating sensors. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9):692~694
- [10] Qin Li, Wei Zhanxiong, Wang Qingya *et al.*. Analysis and improvement of temperature stability for long-period fiber grating. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 2000, **20**(2):190~194(in Chinese)

Simultaneous Measurement of Strain and Temperature Using a Single Dual-Period Fiber Grating

Wang Muguang Wei Huai Tong Zhi Li Tangjun Jian Shuisheng
(Light-Wave Technology Institute, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

(Received 6 August 2001; revised 26 September 2001)

Abstract: A novel dual-period fiber grating sensor is demonstrated, which can measure strain and temperature simultaneously. The dual-period fiber grating consists of a long-period fiber grating (LPG) and a fiber Bragg grating (FBG) which is written in the same section of an uncovered hydrogen-loaded fiber orderly. The Bragg wavelength of LPG and that of FBG have different sensitivity to strain and temperature, then strain and temperature can be determined simultaneously by measuring the two transmitted Bragg wavelengths of the dual-period fiber grating. The accuracy of the sensory in measuring strain and temperature is estimated to be $\pm 16 \mu\epsilon$ in a range from 0 to 1700 $\mu\epsilon$ and $\pm 0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ from $20 \text{ }^\circ\text{C}$ to $120 \text{ }^\circ\text{C}$ respectively.

Key words: dual-period fiber grating; strain; temperature; simultaneous measurement