

光纤光栅复用温度传感研究*

关柏鸥 刘志国 唐 涛 葛春风 王 江 董孝义
(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘 要 提出了一种基于匹配光栅调谐光纤激光器波长扫描寻址的新型光纤光栅复用传感解调方案, 理论上分析了系统的响应特性, 实验上完成了三光栅复用温度传感, 实验结果与理论值相一致。

关键词 光纤光栅复用, 温度传感, 解调。

1 引 言

近年来, 光纤光栅在传感领域中的应用引起了人们极大的兴趣。作为传感元件, 光纤光栅将被感测信息转化为其响应波长的移动, 即用波长编码, 因而不受光源功率波动的影响。另外, 由于光纤光栅与光纤之间天然的兼容性, 易于将多个光纤光栅串联在一根光纤上构成光纤光栅阵列, 实现分布式传感。这是其它传感元件所无法比拟的。如何检测光纤光栅响应波长的移动, 即对波长编码信号进行解调, 是实现光纤光栅复用传感的关键。迄今为止, 人们已提出了一些解调方案, 例如非平衡马赫-曾德尔干涉检测^[1, 2]、可调光纤法布里-珀罗滤波器检测^[3]、匹配光纤布拉格光栅可调滤波检测^[4, 5]等。本文提出了一种新型解调方案, 利用匹配光栅调谐光纤激光器波长扫描寻址方法实现了光纤光栅复用传感的解调。激光波长扫描由计算机控制, 系统输出信号由计算机同步采集。本解调方案具有信噪比高、可靠性好、适于恶劣环境下使用、成本低廉等特点, 可望在光纤光栅传感领域得到实际应用。

2 原 理

2.1 光纤光栅的温度特性

光纤光栅的中心反射波长 λ_g 可表示为

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

式中 Λ 为光栅周期, n_{eff} 为光栅区的有效折射率。 Λ 和 n_{eff} 均受外界环境影响(温度、压力等)而发生变化, 因而导致光纤光栅的反射波长发生移动。温度变化 ΔT 引起的光纤光栅反射波长移动可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_g}{\lambda_g} = (\alpha_s + \xi_s) \Delta T \quad (2)$$

* 国家攀登计划预选项目。

收稿日期: 1998-05-27

式中 $\xi_s = \frac{1}{n_{eff}} \frac{\Delta n_{eff}}{\Delta T}$ 为光纤的热光系数(下标 s 表示硅 Silica), 描述光纤折射率随温度的变化; $\alpha_s = \frac{1}{\Lambda} \frac{\Delta \Lambda}{\Delta T}$ 为光纤的热膨胀系数, 描述光栅的栅距随温度的变化。由于 $\Delta \lambda_g$ 与 ΔT 之间成线性关系, 通过测量光纤光栅反射波长的移动 $\Delta \lambda_g$, 便可确定环境温度 T 。

2.2 光纤光栅复用传感的解调

本工作设计的光纤光栅复用温度传感系统如图1所示。图中FBG₀为匹配光纤光栅, 起着对环形光纤激光器输出波长的调谐作用。FBG₁、FBG₂和FBG₃均为测量光栅。FBG₀粘于一悬臂梁上, 悬臂梁自由端经一丝杆与步进马达相连。计算机通过控制马达转动(经丝杆传动)来控制悬臂梁自由端的移动, 由此实现匹配光纤光栅(即激光器输出波长)的线性调谐。激光输出经隔离器、3 dB耦合器入射到测量光栅, 被反射后又经3 dB耦合器送到光电探测器。作传感测量时, 计算机控制匹配光栅步进调谐的同时, 同步采集光电探测器的输出信号。当匹

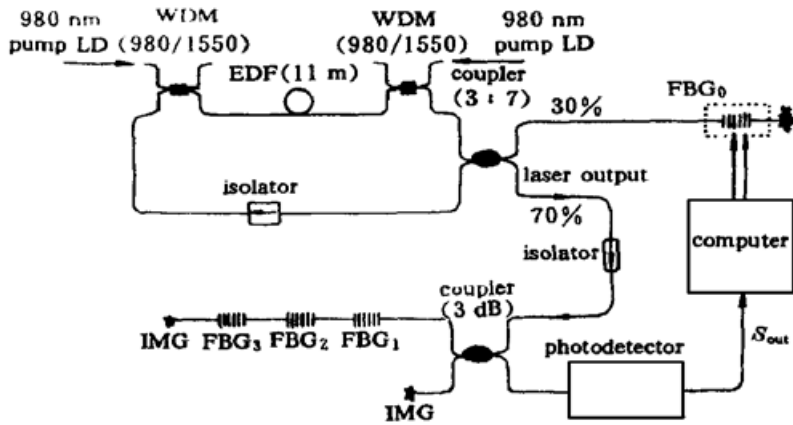


Fig. 1 Diagram of multiplexed fiber Bragg grating temperature sensor system. WDM: wavelength division multiplexer, IMG: index matching gel, EDF: erbium-doped fiber, S_{out} : signal output

配光栅与某一测量光栅相匹配(即反射波长相同)时, 入射激光被其反射, 光电探测器接收到较强光信号, 具有较大输出; 否则, 探测器接收不到光信号, 输出为零。事先测定激光输出波长-马达调谐步数关系曲线就可确定测量光栅反射波长的移动。如果事先测定测量光栅的温度-马达调谐步数(对应于光电探测器最大输出)关系曲线, 便可直接确定待测温度。

2.3 系统的响应特性

若步进马达每步调谐量(即激光扫描步长)为 $\Delta \lambda$, 则调谐步数 m (对应于光电探测器最大输出)与测量光栅波长移动 $\Delta \lambda_g$ 之间有如下关系

$$\Delta m = \frac{\Delta \lambda_g}{\Delta \lambda} \tag{3}$$

将(2)式代入上式, 可得

$$\Delta m = \frac{\lambda_g}{\Delta \lambda} (\alpha_s + \xi_s) \Delta T \tag{4}$$

由(4)式可知, 系统的灵敏度为

$$\frac{dm}{dT} = \frac{\lambda_g}{\Delta \lambda} (\alpha_s + \xi_s) \tag{5}$$

由于调谐步数 m 只能取整数, 因而系统的温度分辨率为

$$\Delta T (\Delta m = 1) = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_g} \frac{1}{(\alpha_s + \xi_s)} \tag{6}$$

3 实验结果及讨论

实验中采用两个 980 nm 半导体激光器(输出功率均在 20 mW 左右)双向泵浦, 掺铒光纤

(掺杂浓度为 13.3 mol/m^3) 长度为 11m 。所用匹配光栅反射带宽小于 0.1 nm , 激光输出功率为 1.7 mW , 输出谱线如图 2 所示。激光器调谐曲线如图 3 所示, 起始波长为 1558.08 nm ,

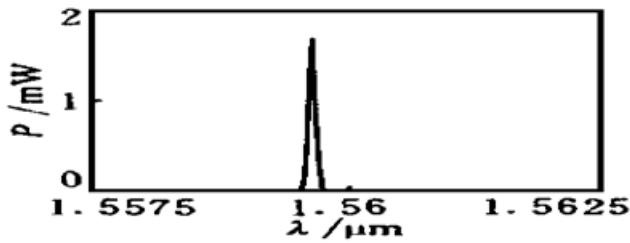


Fig. 2 Output spectrum of tunable fiber laser

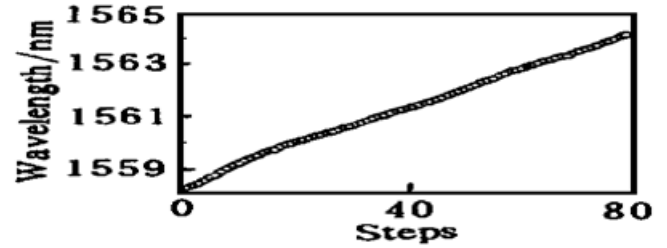


Fig. 3 The relationship between the laser output wavelength and the number of tuning steps

终止波长为 1564.20 nm , 波长调谐范围为 6.12 nm 。步进马达调谐步数为 78 步, 每步调谐量为 0.0785 nm 。从图 3 可以看出, 激光输出波长与马达调谐步数之间呈很好的线性关系, 线性度为 $R^2 = 0.9971$ 。在整个调谐范围内激光输出功率稳定, 输出功率与马达调谐步数之间的关系曲线如图 4 所示。实验中所用测量光栅 FBG_1 、 FBG_2 和 FBG_3 在室温条件下的反射波长分别为 1560.56 nm 、 1561.40 nm 和 1563.84 nm , 反射带宽分别为 0.32 nm 、 0.44 nm 和 0.28 nm 。系统典型的输出如图 5 所示, 三个测量光栅所处的环境温度分别为 10°C (FBG_1)、

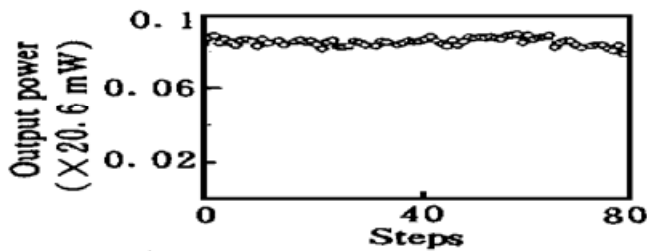


Fig. 4 The relationship between the laser output power and the number of tuning steps

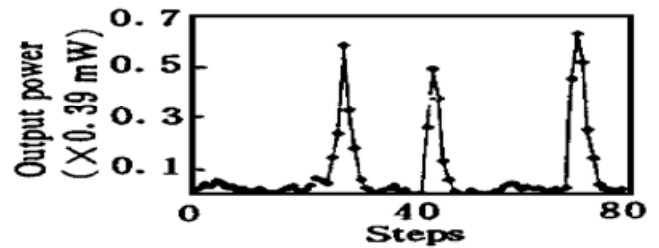


Fig. 5 Output of the wavelength multiplexed fiber Bragg grating temperature sensing system

58°C (FBG_2) 和 24°C (FBG_3)。三个测量光栅的温度-马达调谐步数(对应于光电探测器最大输出)关系曲线如图 6 所示。根据图 6 曲线可以确定图 5 中三个光栅所处的环境温度分别为 14°C 、 55°C 和 26°C 。

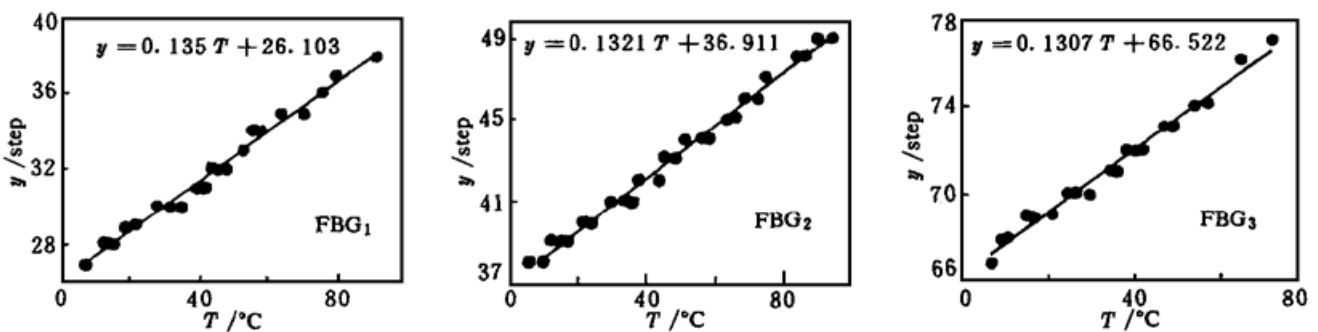


Fig. 6 The relationship between the temperature and the number of tuning steps corresponding to the maximum output of system for sensing gratings

三个光纤光栅传感器的灵敏度分别为 $0.1315 \text{ step}/^\circ\text{C}$ 、 $0.1321 \text{ step}/^\circ\text{C}$ 和 $0.1307 \text{ step}/^\circ\text{C}$, 分辨率分别为 7.605°C 、 7.570°C 和 7.651°C 。根据文献[6], 在室温至 150°C 温度范围内, 光纤光栅温度系数 ($\alpha_s + \xi_s$) 为 6.7×10^{-6} 。由(5)、(6)两式得到三个光栅传感器的灵敏度理论值分别为 $0.1332 \text{ step}/^\circ\text{C}$ 、 $0.1333 \text{ step}/^\circ\text{C}$ 和 $0.1335 \text{ step}/^\circ\text{C}$, 分辨率理论值分别为 7.508°C 、 7.502°C 和 7.491°C 。所得到的实验值与此理论值吻合得很好。

当系统用于分布式温度测量时,三个测量光栅的反射光谱须互不重叠,而且全部位于激光器的波长调谐范围内,这便决定了三个光栅的测温范围。本系统中激光器的调谐范围为 6.12 nm,光纤光栅的波长随温度的变化为 1.06×10^{-2} nm/°C,再考虑到光纤光栅的带宽因素,每个测量光栅的测温范围为 180°C。

由于直接采用光纤光栅作为温度传感元件,而光纤光栅的温度系数较小,加之激光输出波长扫描步长较大,因此,系统的温度分辨率和灵敏度尚不够高。如果将测量光栅粘于热膨胀系数较大的材料上,系统的分辨率和灵敏度可得到提高。例如,将 FBG1 粘于铝材料上后,其灵敏度变为 0.3361 step/°C,温度分辨率为 2.731°C。如果采用更小的马达步进量和更长的悬臂梁结构,还可以进一步提高系统的分辨率和灵敏度。

参 考 文 献

- [1] Weis R S, Kersey A D, Berkoff T A. A four-element fiber grating sensor array with phase-sensitive detection. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1994, **6**(12) : 1469~ 1472
- [2] Kersey A D, Berkoff T A. Dual wavelength fiber interferometer with wavelength selection via fiber grating elements. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(13) : 1215~ 1216
- [3] Kersey A D, Berkoff T A, Morsey W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16) : 1370~ 1372
- [4] Jackson D A, Lobo Ribeiro A B, Reekie L *et al.*. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(14) : 1192~ 1194
- [5] Lobo Ribeiro A B, Ferreira L A, Santos J L *et al.*. Analysis of the reflective-matched fiber Bragg grating sensing interrogation scheme. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(4) : 934~ 939
- [6] Meltz G, Morey W W. Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity. *Proc. SPIE*, 1991, 1516 : 185~ 199

Study on Multiplexed Fiber Bragg Grating Temperature Sensors

Guan Bai'ou Liu Zhiguo Tang Tao Ge Chunfeng

Wang Jiang Dong Xiaoyi

(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*)

(Received 27 May 1998)

Abstract A new approach for demodulation of the multiplexed fiber Bragg grating sensor system based on the use of wavelength-matched fiber grating tuned fiber laser to interrogate the sensing gratings is proposed. The response characteristics have been analyzed theoretically. Experimental results of three grating sensors multiplexed system are presented for temperature measurement, which agree well with theoretical ones.

Key words multiplexed fiber Bragg grating, temperature sensors, demodulation.