

一种测定光纤光栅布拉格反射波长位移的简单方法*

杜卫冲 郑建成**

华南师范大学, 广州 510631

** 香港城市大学, 香港

摘 要 报道一种简单的光纤光栅对参考法测定光纤光栅布拉格(Bragg)波长的位移的方法, 其原理是利用一个布拉格波长可调谐的光纤光栅去跟踪另一个光纤光栅布拉格波长的变化, 测得的光栅布拉格波长的温度灵敏度为 $0.0088 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 这和用可调谐半导体激光器测得的结果十分接近。

关键词 光纤布拉格光栅, 光纤光栅传感器

1 引 言

近年来, 用紫外光直接在单模光纤中写入布拉格反射光栅在光纤通信和光纤传感器件中有许多应用^[1]。光纤光栅(FG)的布拉格反射波长($\lambda_B = 2n_{\text{core}}\Lambda$) 决定于单模光纤的模式折射率 n_{core} 和光栅周期 Λ , 当光纤光栅受到一个纵向(沿光纤方向)的应变作用或周围的温度发生改变, 从而引起 n_{core} 和 Λ 的变化, 即引起光纤光栅的布拉格波长发生位移, 通过测定这种布拉格波长的位移, 即可确定外部的温度变化或应变量的大小。这种传感机制的优点在于波长编码, 不受光源强度或损耗变化的影响, 并可以采用波分复用方法构造定域的传感器阵列。但测定布拉格波长的微小位移往往是比较困难的, 实验室中一般采用光学光谱分析仪或高精密的可调谐半导体激光器来测定布拉格波长, 这在一个传感器件中使用这类昂贵的仪器显然很不现实, 因而。最近几年来, 许多关于光纤光栅传感器的研究集中在发展一类简单可靠的技术来测定布拉格波长的位移, 如利用干涉法^[2]和宽带滤波器^[3], 耦合器^[4]或波分复用器^[5]的频率特性由强度信号的变化得到波长的位移量, 缺点是灵敏度低, 同时受到光源强度涨落的干扰, Jackson 等人^[6, 7]曾报道一种光纤光栅对参考技术, 用一个布拉格波长可调谐的光纤光栅去跟踪另一个光纤光栅的布拉格波长由温度的改变或外加应变而产生的位移, 但这种方法采用反射型结构, 需要用二个3 dB 耦合器将一光纤光栅对和光源与探测器连接起来, 增加了系统的能量损耗, 如果扩展成 N 个光纤光栅传感器阵列, 则需要 $2N$ 个3 dB 耦合器和 N 个探测器, 这需要一个高功率的宽带光源和相应复杂的数据采集与处理单元。本文则报道一种改

* 本研究得到香港大学资助委员会的资助。

收稿日期: 1995年9月20日; 收到修改稿日期: 1996年2月5日

进的光纤光栅对参考法, 采用透射式结构, 仅需要一个3 dB 耦合器, 更有可能扩展成光纤光栅传感器阵列, 而不需要增加3 dB 耦合器和探测器的数目, 因而结构简单, 同时能减少系统的能量损耗。

2 光纤光栅布拉格反射波长随温度或应变量的变化特性

图1为用一波长可扫描的调谐半导体激光器(HP8186A)来测定光纤光栅的透射光谱的实验安排, 一根记录有布拉格反射光栅的单模光纤固定在两个光纤夹之间, 实验中通过沿纵向

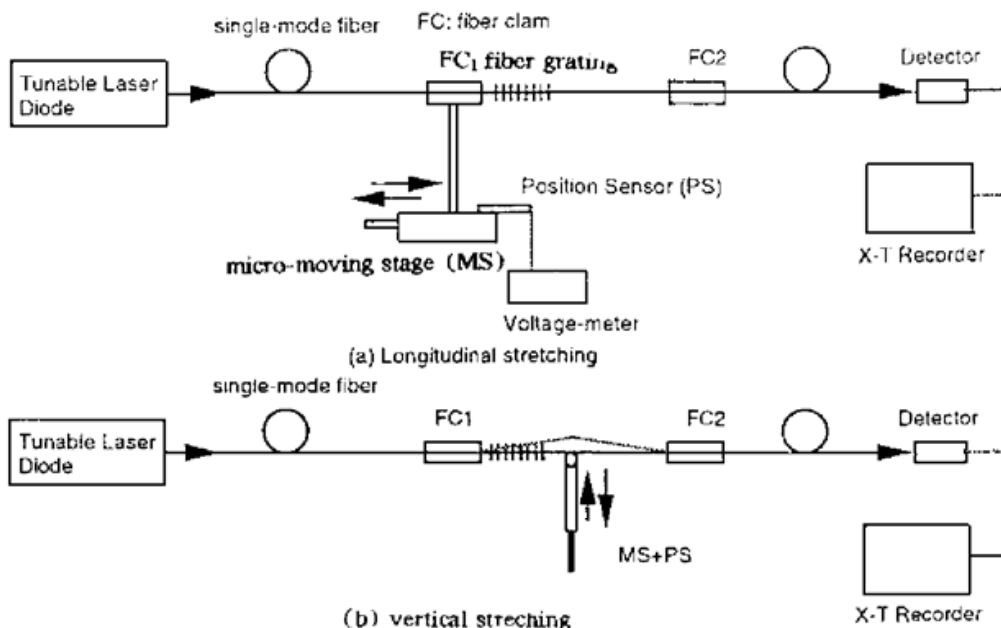


Fig. 1 Experimental arrangement to measure the transmission spectrum of a fiber grating and Bragg wavelength sensitivities to strain or temperature by using a tunable laser diode

(a) for longitudinal stretching; (b) for vertically stretching on the fiber

(光纤方向)移动其中一个光纤夹[图1(a)]或在二光纤夹中点垂直于光纤方向[图1(b)]移动一金属杆来对光纤施加一应变变量, 从而可以变化光栅的布拉格波长, 光纤的纵向或横向移动量可通过一个普通的线性位移传感器的电压输出值 V 来确定, 该传感器的灵敏系数 $r = 1.32$ V/mm。同样, 实验中可以通过一个电热片来控制光纤光栅附近的温度来改变它的布拉格波长, 图2所示为一光纤光栅在自然状态下(室温 $T = 22.0$ °C, 无外加应力)测得的透射光谱, 相应的透射率最小位置对应的即为布拉格反射波长 λ_B , 图中 $\lambda_B = 1539.220$ nm, 带宽约为0.2 nm。实验中通过测定不同温度下或不同应变变量下光栅的透射光谱来确定布拉格反射波长随温度或应变变量变化的特性。

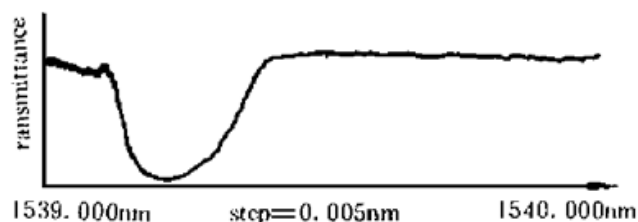


Fig. 2 Transmission spectrum of a fiber grating (with its Bragg wavelength of 1539.220 nm and line width of 0.2 nm)

图3所示为一光纤光栅布拉格反射波长的位移量随温度线性变化的实验结果, 相应的温度灵敏度 $\Delta\lambda_B/\Delta T$ 为 0.0091 nm/°C, 图4所示为对光纤纵向拉伸时, 布拉格波长位移量随应变变量(由位移传感器的电压输出值 V 表示)的线性变化, 相应的线性系数 $\Delta\lambda_B/\Delta V = 5.79$ nm/V, 对于纵向拉伸的情况, 应变变量 ϵ 可表示为

$$\epsilon = \Delta L/L = rV/L \quad (1)$$

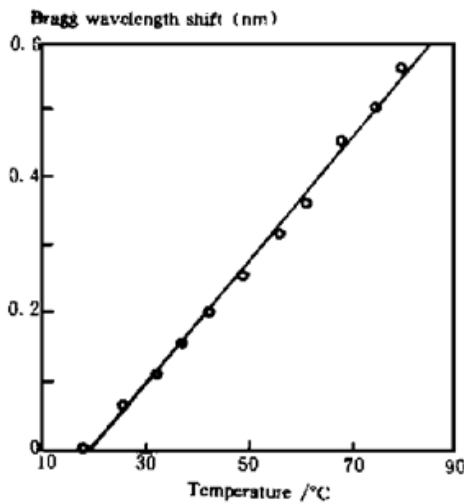


Fig. 3 Linear dependence of fiber grating Bragg wavelength shift versus temperature

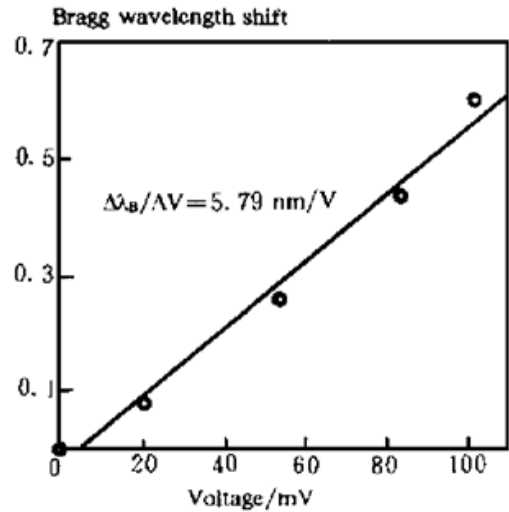


Fig. 4 Linear dependence of the fiber grating Bragg wavelength shift versus strain (in voltage)

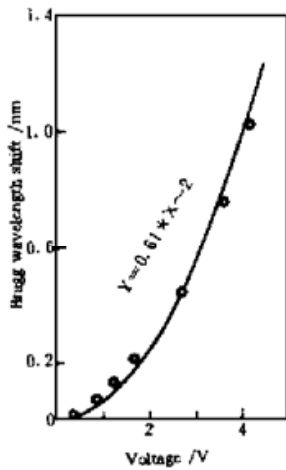


Fig. 5 Quadratic dependence of the fiber grating Bragg wavelength shift versus the vertical stretching range (in voltage)

式中 L 是两个光纤夹之间的距离, ΔL 为纵向拉伸量, 正比于位移传感器的电压输出 V , 实验中 $L = 150 \text{ mm}$, 由此可得布拉格反射波长对应变量的灵敏度 $\Delta\lambda_B/\epsilon$ 为 $1.14 \text{ nm}/\mu\epsilon$ 。为了防止拉断光纤, 仅仅测了很少几个数据点(图4), 为此采用横向拉伸的方法 [如图 1(b) 所示], 相应的应变变量可表示为

$$\epsilon = d^2/2D^2 = (rV)^2/2D^2 \tag{2}$$

式中 D 为两个光纤夹距离之半, d 为横向拉伸的范围, 图5为布拉格反射波长位移量随光纤横向拉伸量的变化曲线, 图中的实线是通过方程

$$\Delta\lambda_B = \rho\epsilon = \tau V^2 \tag{3}$$

拟合获得的, 式中 ρ 为应变变量灵敏系数, τ 为二次系数, 拟合获得 $\tau = 0.061 \text{ nm}/V^2$, 利用(2)式转换成布拉格波长对应变量的灵敏系数 $\rho = 1.19 \text{ nm}/\mu\epsilon$, 这和上述纵向拉伸时得到的值($1.14 \text{ nm}/\mu\epsilon$)十分接近。

3 光纤光栅对参考法测定布拉格波长位移的简单结构

上节中采用一可调谐的半导体激光器测定光纤光栅的布拉格反射波长的变化, 下面则给出一种十分简单的测试方法来确定布拉格波长的位移, 图6给出了这种方法的实验装置安排, 实验中用到一对完全一致的光纤光栅, 分别接在一个3 dB 耦合器的两端, 而其中一个光栅(FG₁)作为参考光栅, 它的布拉格波长可以通过对光纤施加一个横向的位移量来调谐, 而波长调谐的范围则由位移传感器的电压输出来确定, 另一个光纤光栅(FG₂)作为温度传感头, 这里用一电热片来变化光栅 FG₂处的温度。一宽带光源(波长范围为1520~ 1560 nm)发出的光透过光栅 FG₁, 再经过3 dB 耦合器入射到光栅 FG₂, 部分光能经光栅 FG₂反射至耦合器的端口 A 输出, 由一功率计来测定其反射光强度的大小, 在自然状态下(相同的温度, 无外加应变的情况), 光栅 FG₁和光栅 FG₂的布拉格波长重合在一起或相互匹配, 即光栅 FG₂的反射

带正好落在光栅 FG_1 透射最小的位置上，所以在端口 A 测得的反射光信号最小，但当光栅

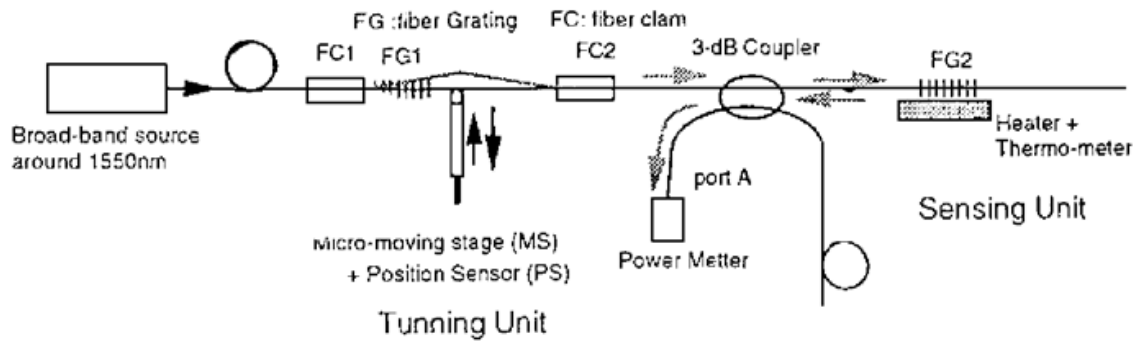


Fig. 6 Experimental scheme for fiber grating-pair referencing method for measuring Bragg wavelength shifts

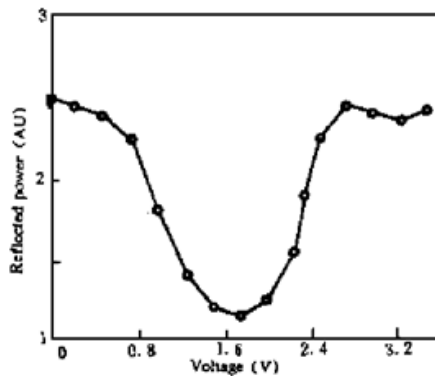


Fig. 7 The reflected power by the sensing grating (FG_2) changes as tuning the Bragg wavelength of the referencing grating (FG_1) across that of the sensing grating. The Bragg wavelength shift of the sensing grating equals to the tuning range (in voltage) at the minimum point of the curve

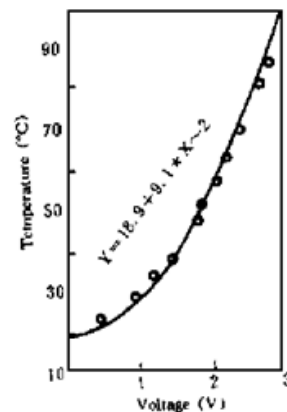


Fig. 8 Dependence between the temperature at the sensing grating and the matching tuning range (in voltage)

FG_2 处的温度发生了变化，使得光栅 FG_2 的布拉格波长发生位移，即光栅 FG_2 的反射带远离光栅 FG_1 透射最小的位置，从而端口 A 处的反射光信号增大，这时如果调谐光栅 FG_1 的布拉格波长，使它再次和光栅 FG_2 的布拉格波长重合，那么端口 A 处的反射光信号又达到最小，相应光栅 FG_1 的波长调谐范围，即等于光栅 FG_2 由温度变化引起的布拉格波长的位移。图7所示为光栅 FG_2 处温度升高 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 后，调谐光栅 FG_1 的布拉格波长时，在端口 A 处测得的反射光信号的变化曲线，相应的输出最小即为光栅 FG_1 和光栅 FG_2 的布拉格波长重新重合的位置，图8所示为光栅 FG_2 在不同温度下测得的输出最小对应的调谐光栅 FG_1 的电压输出值的实验结果，图中给出了当光栅 FG_2 处温度升高—下降—再升高过程中测得的三组数据，证实该方法具有很好的重复性，而图中的实曲线则是利用二次方程

$$T - T_0 = \eta V^2 \tag{4}$$

的拟合结果。 T_0 为自然状态下的温度，拟合所得的二次系数 $\eta = 9.1\text{ }^\circ\text{C}/\text{V}^2$ ，利用方程(2)、(3)式和上节所得的参量值 $Y = 1.32\text{ V/mm}$ ， $\Delta\lambda_B/\epsilon = 1.19\text{ nm/m}\epsilon$ 及 $2D = 120\text{ mm}$ (图6中光栅 FG_1 处两光纤夹之间的距离)，将电压输出转换成布拉格波长的位移量 $\Delta\lambda_B$ ，从而可得光纤光栅的温度灵敏度 $\Delta\lambda_B/\Delta T$ 为 $0.0088\text{ nm}/^\circ\text{C}$ ，这和上节用可调谐半导体激光器测得的温度灵敏度的数值($0.0091\text{ nm}/^\circ\text{C}$)十分接近，由此可证实这种简单的光纤光栅对参考法测定布拉格波长的位移或温度变化与应变量大小的可靠性。

结 论 本文首先给出了采用可调谐半导体激光器测得的光纤光栅(1540 nm)的布拉格反射波长对温度和应变量的灵敏度分别为 $0.0091 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, $1.19 \text{ nm}/\text{m}\epsilon$, 然后提出了一种十分简单的光纤光栅对参考法来测定布拉格波长的位移量, 这种方法的主要原理是用一个布拉格波长可调谐的光纤光栅去跟踪另一个光纤光栅布拉格波长的位移, 从而可进一步确定该光栅处的温度变化或所加应变量的大小。由该法测得布拉格反射波长对温度的灵敏度为 $0.0088 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 这和用可调谐半导体激光器测得的结果很接近, 证实了这种方法的可靠性。

参 考 文 献

- [1] P. S. J. Russell, J. L. Archambault, L. Reekie. Fiber gratings. *Physics World*, October 1993 ·41~46
- [2] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. Hight resolution fiber grating based strain sensor with interferometric wavelength shift detection. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(3) ·236~ 238
- [3] A. D. Kersey. Interrogation multiplexing techniques for fiber Bragg grating strain sensors. *Proc. SPIE*, 1993, **2071**, 30~ 35
- [4] M. A. Davis, A. D. Kersey. All-fiber Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division couple. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(1) ·75~ 77
- [5] Q. Zhang, D. A. Brown, H. Kung *et al.*. Use of highly overcoupled couplers to detect shifts in Bragg wavelength. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(6) ·480~ 482
- [6] D. A. Jackson, A. B. L. Ribeiro, L. Reekie *et al.*. Simple Multiplexing Scheme for a fiber-optic grating sensor network. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(14) ·1192~ 1193
- [7] P. M. Cavalerio, A. B. L. Riberio, J. L. Santos. Referecing technique for intensity-based sensors using fiber optical Bragg gratings. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(5) ·392~ 394

Simple Method for Determining Bragg Wavelength Shifts of Fiber Gratings

Du Weichong K. S. Chiang*

South China Normal University, Guangzhou 610631
** City University of Hong Kong Kowloon, Hong Kong*
 (Received 20 September 1995; revised 5 February 1996)

Abstract A simple fiber grating-pair referencing method for measuring fiber grating Bragg wavelength shifts is reported. The temperature sensitivity of fiber grating Bragg wavelength was determined to be $0.0088 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, which was coincident very well with the experimental result measured using a fine tunable laser diode.

Key words fiber Bragg grating, fiber grating sesors