

文章编号: 0253-2239(2001)05-0586-03

光纤光栅电流传感器

余有龙¹⁾ 叶红安¹⁾ 刘治国²⁾ 赵伟峰²⁾ 黄培忠²⁾ 耿淑伟³⁾ 谭华耀⁴⁾

- 1), 黑龙江大学物理系, 哈尔滨 150080
- 2), 南开大学物理系, 天津 300071
- 3), 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090
- 4), 香港理工大学电机工程系, 香港

摘要: 基于悬臂梁技术,分析并验证了光纤光栅用于电流传感的可能性。采用等腰三角形悬臂梁确保光栅在传感过程中不出现啁啾现象,从而减小读数误差。系统传感灵敏度为 4.00×10^{-2} nm/A,与预期值 4.15×10^{-2} nm/A 基本吻合。

关键词: 光纤光栅; 悬臂梁; 电流传感器

中图分类号: TP212.1 文献标识码: A

1 引 言

伴随着光纤光栅(FBG)的问世,人们将之用于光通信的同时也致力于将其应用于各种物理量的传感^[1-7]。因为该本征型无源器件采用波长编码,除具备一般光纤传感器的优点外,还显示出灵敏度高、抗电磁干扰能力强、损耗小、易于复用等特点。Day等^[8]根据法拉第效应,用光纤光栅对高压、强电流进行过传感探测,Henderson^[9]对其提出过改进,但压电陶瓷的磁滞效应决定了他们的方法不太实用。本文基于悬臂梁,通过被测电流产生磁场对固定于自由端一定长度通电导线的作用,使梁产生沿轴向的应变,影响光纤光栅反射谱,从而对电流进行传感探测。

2 光纤光栅电流传感器的原理

光纤光栅栅间光程的变化,将引起布拉格波长漂移。若漂移量与引起漂移的被测物理量间存在某种联系,利用光谱仪观测波长漂移值 $\Delta\lambda_B$ 后就可以判断光栅部位该物理量的变化程度了。

将光栅沿轴向刚性粘附于一悬臂梁上表面,则粘附层将所在部位梁的应变无保留地传递给光纤光栅。环境温度不变时,轴向应变 ϵ_x 引起光纤光栅波长相对漂移值为^[10]

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - p_e)\epsilon_x, \quad (1)$$

其中 p_e 为有效弹光系数。而 ϵ_x 可表示成

$$\epsilon_x = Mz/EI_y, \quad (2)$$

其中 E 为梁材料的杨氏模量, z 为光纤光栅与中性面 xoy 间距。厚度为 h 、宽度为 $b(x)$ 的矩形截面悬臂梁考察点处截面的惯性矩 $I_y = b(x)h^3/12$, $z = h/2$ 。当图 1(a)所示的带铁芯螺线圈通电时,磁极间产生的磁场基本上为匀强磁场。长度为 l 的刚性细导线,沿梁的轴向被刚性地粘附于梁的下表面,两端与梁的固定端相距分别为 l_1, l_2 , ($l = l_2 - l_1$)。通电后导线在稳恒磁场中受安培力 F 作用,不考虑梁和导线本身重量,光栅上考察点处的弯矩则为

$$M = BI_0(l_2 - l_1)(l_2 + l_1 - 2x)/2, \quad (3)$$

其中 I_0 为导线中的电流, x 为考察点与固定端间距, B 为待测电流经螺线圈在磁极间隙处形成磁场的磁感应强度。假设螺线圈是均匀缠绕着的,考虑到两端螺线圈相同,则

$$B = \frac{(N_L + N_R)I\mu\mu_0}{\mu_0(l_L + l_R) + \mu l_0}, \quad (4)$$

其中 I 为待测电流, N_L, N_R 分别为左右两侧线圈匝数, l_L, l_R 分别为左右两侧螺线圈的长度, l_0 为磁极间隙的轴向尺寸, μ 和 μ_0 分别为铁芯和真空中的磁导率。若所用悬臂梁为均匀密度材料加工成的长度为 L 、底边长为 b_0 的等腰三角形梁[如图 1(b)所示],其宽度变化规律为

$$b(x) = C(L - x), \quad (5)$$

其中 C 为常数。考虑 $l_1 = L - l/2, l_2 = L + l/2$, 联

立(1)式~(5)式,则

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = KI, \tag{6}$$

其中

$$K = \frac{6\mu\mu_0 I_0 (1 - p_c)(N_L + N_R)}{CEh^2 [\mu_0(l_L + l_R) + \mu_0]}$$

对于确定的装置, K 为常数, 可见波长漂移量与待测电流成线性关系。当 $I > 0$ 时, F 使得光栅受拉应力

作用, 反射波长向长波长方向漂移; 反之, 光纤光栅受压应力作用, 反射波长向短波长方向漂移; 电流强度越大, 漂移量越多, 因此该装置可用于感知电流的大小。(6)式还反映了该装置布拉格波长的漂移量与光纤光栅在梁轴向的位置以及考察点在光纤光栅上的位置无关, 即无论 I 的强弱, 光栅均被均匀展宽, 不会出现啁啾现象。

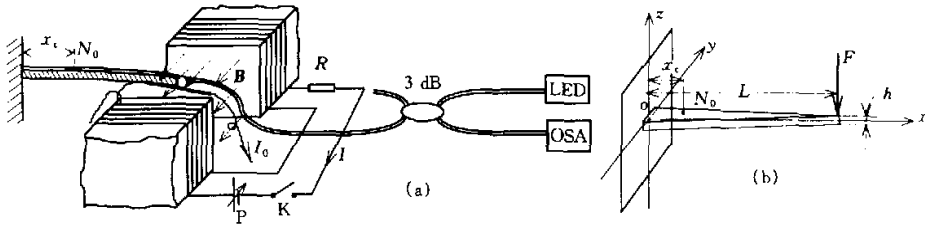


Fig. 1 Schematic diagram of FBG current sensor. (a) Experimental arrangement of the sensor; (b) The structure of the cantilever beam

3 实验结果

采用图 1(a)所示的实验装置, 带宽为 85.6 nm 的发光二极管 LED 的工作电流为 100 mA, 峰值波长为 1536 nm。所用光纤光栅的长度为 15 mm, 反射率为 75%, 自由状态下工作波长为 1561.48 nm, 带宽为 0.48 nm, 其中部被固定在距悬臂梁固定端 4.4 cm 的 N_0 处。自由端一侧粘贴的导线长度为 8.5 cm, 其中电流为 $I_0 = 0.97$ A。有机玻璃制成的等腰三角形梁, $L = 12.5$ cm, $h = 2.5$ mm, $b_0 = 1.30$ cm。电源 P 能提供最高达 30 V 的可调直流电压, 螺线圈电阻 $r = 650$ Ω , 左右侧长度均为 20 cm, 各 1500 匝, 两螺线圈间距为 3 cm。电路中串联一个 30 Ω 的电阻 R , 以保护电路。

调节电源的电压可以线性地改变闭合回路中的电流, 规定图 1(a)所示电流方向为正向, 将电源反向连接后就可以提供反向电流了。用光谱仪(OSA)观测不同电流强度对应的波长漂移量, 实验结果如图 2 所示, 两者间呈线性关系, 其斜率对应传感灵敏度为 4.00×10^{-2} nm/A。取 $P_c = 0.22$, $E = 2.8 \times 10^{11}$ kg/cm², $\mu = 600\mu_0$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N/A², (6)式确定的理论值为 4.15×10^{-2} nm/A。可见实验结果与理论预期值基本一致, 少许出入是由于光纤、粘结剂以及梁材料间杨氏模量的差别所致。影响实验曲线线性度的主要原因是未考虑导线和梁等的重量, 实际使用时它可通过将传感头沿水平线旋转 90°解决; 另外粘贴层间的蠕变以及环境温度的变化对线

性度也有影响。

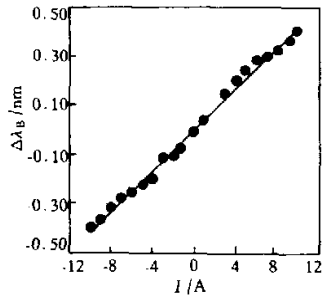


Fig. 2 Relationships between $\Delta\lambda_B$ and I

应用三角状梁, 在传感探测的过程中, 使得光纤光栅反射谱的带宽(FWHM)保持 0.48 nm 不变, 如图 3 所示。一方面它可避免展宽造成的读数误差, 另一方面减少了梁的自重, 以利于减小系统的零误差, 提高实验曲线的线性度。

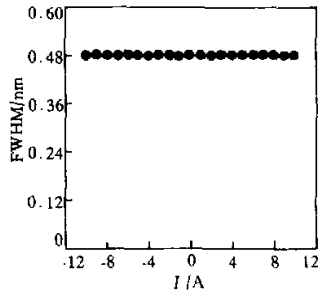


Fig. 3 Experimental plot of FBG bandwidth vs current

光谱仪的读数精度达 10^{-5} μ m, 可鉴别的电流强度为 10^{-1} A。优化梁的结构^[11], 选用杨氏模量尽

量接近光纤 E 值的粘结剂和梁材料,增加自由端通电导线的长度、电流的大小以及两侧螺线圈的密度,减小螺线圈间距,均有利于提高该装置的传感灵敏度。

结论 借助三角形悬臂梁,用光纤光栅对电流进行了传感探测。测得传感灵敏度为 $4.00 \times 10^{-2} \text{ nm/A}$, 与理论值 $4.15 \times 10^{-2} \text{ nm/A}$ 基本一致。实际操作时需要结合磁的“绝缘”技术,否则整个装置难以体现光纤光栅抗电磁干扰的优点。该技术可用来监测磁场,稍加改造,还可用于光纤光栅调谐;在光纤光栅传感网络的地址查询、可调谐光纤激光器等方面均具有潜在的应用价值;若结合无源温漂补偿技术^[12]则更具有实用性。

参 考 文 献

- [1] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection. *Electron. Lett.*, 1992, **28** (3):236~238
- [2] Kanellopoulos S E, Handerek V A, Rogers A J. Simultaneous strain and temperature sensing with photogenerated in-fiber grating. *Opt. Lett.*, 1995, **20** (3):333~335
- [3] Gupta S, Mizunami T, Yamao T *et al.*. Fiber Bragg grating cryogenic temperature sensors. *App. Opt.*, 1996, **35**(25):5202~5205
- [4] 江毅,陈伟民,杨礼成等. 光纤光栅用于应变/温度传感初探. *传感技术学报*, 1997, **28**(3):43~47
- [5] Xu M G, Reekie L, Chow Y T *et al.*. Optical In-fiber grating high pressure sensor. *Electron. Lett.*, 1993, **29** (4):398~399
- [6] Volanthen M, Geiger H, Cole M J *et al.* Measurement of arbitrary strain profiles within fibre gratings. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(11):1028~1029
- [7] 赵伟锋,盛秋琴,刘治国等. 光纤光栅磁场传感器. *南开大学学报*, 1999, **32**(1):70~73
- [8] Day G W, Deeter M N, Roose A H. Faraday effect sensors: A review of recent progress. *Proc. SPIE*, 1992, **1779**:11~26
- [9] Henderson P J, Fisher N E, Jackson D A. Current metering using fiber-grating based interrogation of a conventional current transformer. *Proc. The 12th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Williamsburg, *Opt. Soc. America Technical Digest Series*, 1997, **16**:186~189
- [10] Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic Bragg grating sensors. *Proc. SPIE*, 1989, **1169**:98~106
- [11] 余有龙,刘志国,董孝义等. 用于光纤光栅线性调谐的悬臂梁结构优化. *光子学报*, 1998, **27**(8):714~718
- [12] 余有龙,刘志国,耿淑伟等. 光纤光栅力传感器的无源温漂补偿技术. *光学学报*, 2000, **20**(3):400~404

Fiber Bragg Grating Current Sensor

Yu Youlong¹⁾ Ye Hongan¹⁾ Liu Zhiguo²⁾ Zhao Weifeng¹⁾
Huang Peizhong²⁾ Geng Shuwei³⁾ Hwa-Yaw Tam⁴⁾

(1), Department of Physics, Heilongjiang University, Harbin 150080

(2), Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071

(3), School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090

(4), Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong

(Revised 27 July 1999; revised 9 May 2000)

Abstract: The performance of fiber Bragg grating glued on a cantilever beam used for current sensing is analyzed and demonstrated. The isosceles-triangle-shaped beam makes the grating chirp-free and, hence, reduces the reading error. The measured sensing sensitivity is $4.00 \times 10^{-2} \text{ nm/A}$ which is close to the predicted value of $4.15 \times 10^{-2} \text{ nm/A}$.

Key words: fiber Bragg grating; cantilever beam; current sensor