文章编号: 0253-2239(2001) 05-0586-03

光纤光栅电流传感器

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: TP12.1 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

光纤光栅格栅间光程的变化,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 Δλ_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 粘贴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 & 引起光纤光栅波 长相对漂移值为¹⁰

$$\Delta \lambda_{\rm B} / \lambda_{\rm B} = (1 - p_{\rm e}) \, \varepsilon_x, \qquad (1)$$

其中 p_e 为有效弹光系数。而 ε_x 可表示成

$$\varepsilon_x = M_Z / E I_y, \qquad (2)$$

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 $L = b(x) h^3 / 12, z = h b$ 。 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贴于梁的下表面,两端与梁的固定端相距分别为 $l_1, l_2, (l = l_2 - h)$ 。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

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

其中 Io 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 螺线管相同,则

$$B = \frac{(N_{\rm L} + N_{\rm R}) I \mu \mu_0}{\mu_0 (I_{\rm L} + I_{\rm R}) + \mu_{l_0}},\tag{4}$$

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

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

收稿日期: 1999-07-27; 收到修改稿日期: 2000-05-09 其中 C 为常数。考虑 $I_1 = L - l h , I_2 = L + l h , R h$ (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(6)

(1) 式 ~ (5) 式,则
$$\Delta \lambda_{\rm B} / \lambda_{\rm B} = KI$$
,

其中

$$K = \frac{6^{\mu\mu_0} l l_0 (1 - p_e) (N_{\rm L} + N_{\rm R})}{CE h^2 [\mu_0 (l_{\rm L} + l_{\rm R}) + \mu_0]}.$$

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





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, 其中央部位被固定在距悬臂梁固定端 4.4 cm 的 N₀ 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 nm, $b_0 = 1.30$ 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。电路中串接一个 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 $P_e=0.22$ 、 $E=2.8\times10^4$ kg km²、 $\mu=600\mu_0$ 、 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}N/A^2$, (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 mm 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 μm, 可鉴别的电流强 度为 10⁻¹ A。优化梁的结构^[1],选用杨氏模量尽量 plishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net 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 4.00×10⁻² nm /A, 与理论值 4.15×10⁻² 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

- Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. High-resolution fibergrating 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, Glemn 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 4.00×10^{-2} nm/Å which is close to the predicted value of 4.15×10^{-2} nm/Å.

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