

文章编号 : 0253-2239(2002)09-1092-04

# 光纤布拉格光栅电流传感的理论和实验研究<sup>\*</sup>

廖帮全 冯德军 赵启大 周 广 开桂云 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要: 对一种以磁致伸缩棒调谐光纤布拉格光栅为基础的新型电流传感器进行了理论和实验研究。将一个光纤布拉格光栅牢固地粘贴在一置于多层螺线管中心部分的磁致伸缩棒上, 构成传感头。当通过螺线管的电流改变时, 磁致伸缩材料在均匀磁场的作用下产生沿纵向的应变并传递到光纤光栅上, 从而导致光纤光栅的布拉格波长移动。外加电流和波长移动之间的关系是线性的, 线性调谐的波长范围为 0.9 nm, 电流强度范围为 900 mA, 灵敏度约为 1000 mA/nm, 电流强度可精确到 10 mA。理论和实验符合得很好。

关键词: 磁致伸缩材料; 光纤布拉格光栅; 螺线管; 电流传感器

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## 1 引 言

光纤光栅具有制作简单、造价低、稳定性好、体积小、抗电磁干扰、使用灵活并易于同光纤系统集成等许多优点, 所以近年来光纤光栅在光纤通信和光纤传感等领域的应用越来越受到人们的重视<sup>[1-4]</sup>。光纤光栅的这些应用与其优异的可调谐光波选频特性是分不开的。通过施加轴向应变或改变温度, 可在一定范围内对其布拉格波长进行调谐。

近十年来, 光纤布拉格光栅传感技术已经成为光纤传感技术中最具活力的一种技术<sup>[5,6]</sup>。和其他纤维光学传感器相比, 光纤布拉格光栅传感器有很多优点, 如价格便宜、柔韧性好和极好的波长复用能力等。所以, 光纤布拉格光栅传感器在民用、工业和军事等领域都有重要的应用价值。传统的电流传感用到了法拉第效应, 电压传感则用到了克尔效应或普克尔效应<sup>[7]</sup>。利用法拉第效应的光纤传感器存在着光纤诱导线性双折射的问题, 同时, 温度和振动因素也限制了它的应用。而光纤布拉格光栅具有免受电磁干扰、波长编码的优异特性, 所以它在电力工业测量中具有潜在的重要应用价值。本文实现了一种以磁致伸缩棒调谐光纤布拉格光栅为基础的新型电流传感器。该传感器具有测量准确、线性度好、简单

易行、可远距离操作等特点。

## 2 理论分析

光纤布拉格光栅的布拉格波长  $\lambda_B$  由下式给出

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

其中  $\Lambda$  为光纤布拉格光栅周期,  $n_{\text{eff}}$  为光栅区的纤芯有效折射率。有效折射率和栅格周期均与温度和应变有关, 所以布拉格波长也与温度和应变有关。当温度不变时, 沿轴向的应变  $\epsilon_{ax}$  和波长的关系由下式给出:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\epsilon_{ax}, \quad (2)$$

其中  $p_e = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2}[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]$  为光纤的有效弹光系数,  $p_{11}$  和  $p_{12}$  为弹光系数,  $\nu$  为纤芯材料的泊松比。对  $\text{SiO}_2$  光纤,  $n_{\text{eff}} = 1.46$ ,  $p_{11} = 0.12$ ,  $p_{12} = 0.27$ ,  $\nu = 0.16$ , 所以  $p_e \approx 0.22$ 。根据(2)式, 光栅在轴向应变作用下布拉格波长会改变。

实验中所使用的磁致伸缩材料是一种名叫  $\text{TbDy}(\text{FeM})_2$  的特殊合金, 所用磁致伸缩圆棒的尺寸为  $5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。当磁场加在磁致伸缩棒上后, 磁致伸缩棒中的磁畴倾向于沿磁场方向排列而产生纵向应变<sup>[8]</sup>。光纤布拉格光栅粘贴在位于多层螺线管中心部位的磁致伸缩棒上, 外加磁场由通电多层密绕螺线管产生, 磁致伸缩棒上产生的应变会传递到光纤布拉格光栅上。

螺线管匝数  $N = 1300$ , 长度  $L = 70 \text{ mm}$ , 螺线管内径  $R_1 = 13 \text{ mm}$ , 外径  $R_2 = 26 \text{ mm}$ 。将传感头置

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(69977006、60077012)、天津市自然科学基金重点项目(013800511)、教育部光学信息技术科学开放研究实验室、天津建工集团总公司资助课题。

E-mail: liaobangquan@eyou.com

收稿日期 2001-09-07; 收到修改稿日期 2001-11-22

于螺线管的中心部分,在这中心部分磁场是均匀的,均匀磁场的强弱由螺线管中的电流决定,可表示为<sup>[9]</sup>

$$H = \frac{NI}{2(R_2 - R_1) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (L/2)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (L/2)^2}}}, \quad (3)$$

$I$ 为电流强度。对于实验中使用的由TbDy(FeM)<sub>2</sub>合金制成的磁致伸缩棒,如果令其工作在线性区,则光纤光栅纵向应变与磁场强度成正比

$$\epsilon_{ax} = kH, \quad (4)$$

其中  $k$  为跟磁棒材料有关的常数。

对于本文所用材料,在未施加预应力(零预压)情况下,根据材料提供者北京科技大学新金属材料国家重点实验室提供的数据,我们使用计算机绘图,得到的应变与磁场强度之间的关系曲线如图1所示。该图和其他科技工作者给出的应变与磁场强度之间的关系曲线是一致的<sup>[10]</sup>。图1中第1象限曲线a表示磁场强度的方向为正向由小变大时应变的变化情况(磁场强度与电流之间遵守右手定则,规定一个磁场强度方向为正向后,与之相反的即为反向。);第1象限中曲线b表示磁场强度正向由大变小时应变的变化情况。第2象限中曲线b'表示磁场强度反向由小变大时应变的变化情况;第2象限中曲线a'表示磁场强度反向由大变小时应变的变化情况。第1象限和第2象限中的曲线是对称的。在我们的实验中当电流强度由小变大在900 mA范围内时,由螺线管参数及(3)式可知,对应的磁场强度范围为  $1.41 \times 10^4$  A/m。由图1可知,当磁场强度在  $1.41 \times 10^4$  A/m以内时,曲线近似为线性的,  $k \approx 4.387 \times 10^{-8}$  m/A。

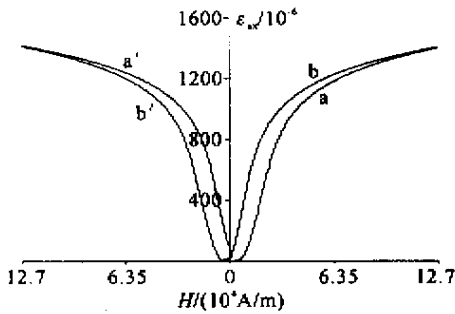


Fig.1 The relationship between strain  $\epsilon_{ax}$  and magnetic field intensity  $H$  at the condition of zero-prestress

将螺线管参数代入(3)式,并将(3)式、(4)式、 $k$ 及  $p_c$  值代入(2)式整理可得

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = 5.56 \times 10^{-4} I. \quad (5)$$

从(5)式可知,光纤光栅布拉格波长移动  $\Delta\lambda_B$  与电流强度  $I$  成简单的线性关系,从而可实现电流传感。

### 3 实验结果和讨论

图2是光纤布拉格光栅传感头的示意图。光纤布拉格光栅与磁致伸缩棒是用强力胶粘贴在一起的,所以可以认为光纤布拉格光栅与磁致伸缩棒的应变是一致的。实验中使用的光纤布拉格光栅约为11 mm长。实验测得光纤布拉格光栅在1549.020 nm处的峰值反射率为96%,带宽为0.22 nm。

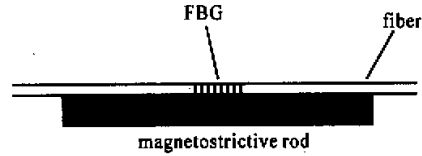


Fig.2 FBG sensing head

图3是这种电流传感器的实验装置图,从宽频光源(BBS)输出的光射入传感头,对透射光用光谱仪(Advantest Q8383)监测。

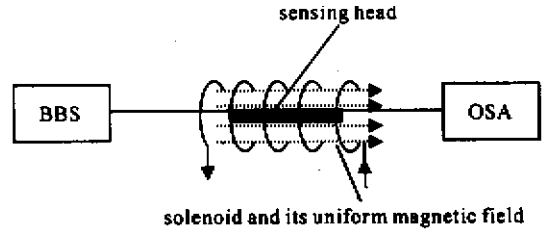


Fig.3 Schematic diagram of experimental setup for the measurement of current effect. OSA: optical spectrum analyzer

外加电流和波长移动之间的关系示于图4(黑点为实验结果,实线是拟合曲线。光纤布拉格光栅粘贴在磁致伸缩棒上后,因为胶的影响  $I = 0$  时波长比未粘贴时略微变小)。

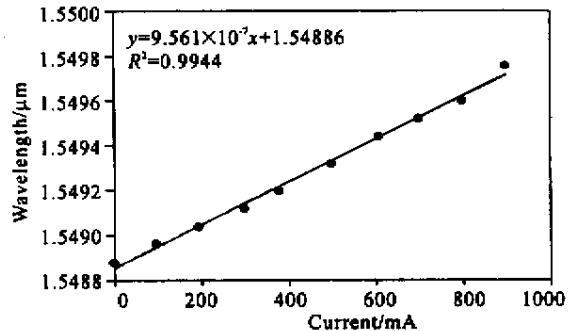


Fig.4 The relationship between the Bragg wavelength of FBG  $\lambda_B$  and electric current  $I$

图 5 是在调谐过程中电流不同时测得的光谱图,调谐过程中光纤布拉格光栅无啁啾现象。

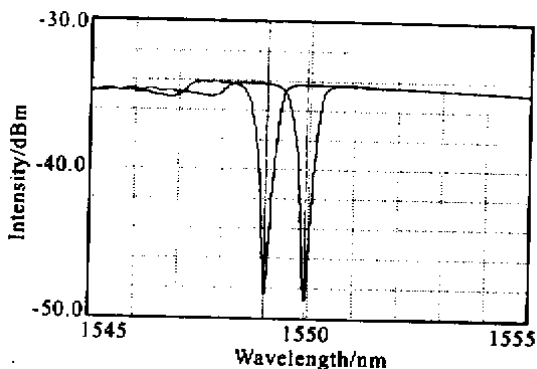


Fig.5 The transmission spectra of FBG at two different electric currents.  $\lambda_1 = 1.549020 \mu\text{m}$

容易看出在测量范围内电流和光纤布拉格光栅的布拉格波长移动之间有很好的线性关系(线性拟合度  $R^2 = 0.9944$ ),布拉格波长的线性调谐范围是  $0.9 \text{ nm}$ ,电流强度范围为  $900 \text{ mA}$ 。灵敏度约为  $1000 \text{ mA/nm}$ 。电流强度可精确到  $10 \text{ mA}$ 。实验中如果继续增加电流(超过  $1000 \text{ mA}$ )我们观察到磁滞效应会影响测量结果,所以此电流传感器的测量范围不大于  $900 \text{ mA}$ 。当电流超过磁致伸缩材料的线性范围时,非线性行为会表现出来。

现在对理论和实验做一简单比较。实验中的螺线管当外加电流为  $600 \text{ mA}$  时,由(5)式可知,对应的光纤光栅布拉格波长移动应为  $0.53 \text{ nm}$ 。而实验结果(示于图 4 中)为:当外加电流为  $600 \text{ mA}$  时,光纤光栅布拉格波长移动为  $0.60 \text{ nm}$ 。理论和实验符合得很好。

图 1 当磁场强度达到  $1.27 \times 10^5 \text{ A/m}$  时应变达到饱和,是饱和曲线。在我们的实验中,当电流为  $900 \text{ mA}$  时,磁场强度为  $1.41 \times 10^4 \text{ A/m}$ ,约为饱和值  $1.27 \times 10^5 \text{ A/m}$  的  $1/9$ ,电流升高和电流下降时的曲线靠得非常近,几乎重合。实验中,增大电流和减小电流时测得的波长移动的数据几乎是一样的。实验结果重复性较好。

测量时,通过螺线管漆包线的电流不应超过其额定电流,否则螺线管的发热变得严重起来。螺线管发热会使光栅周围环境温度升高,温度也将影响光栅的布拉格波长,引起测量误差。另外,如果测量时间较长,温度效应也要加以考虑。在实验中,我们把传感头用绝热管封装以消除温度的影响。但是,绝热管与磁致伸缩棒和光纤布拉格光栅不接触,所以绝热管能减小通电螺线管发热对传感头的影响,

而不影响其应变。

怎样消除(减少)磁滞效应和温度效应的影响将是我们进一步的研究所要解决的问题。

结束语 本文对一种以磁致伸缩棒调谐光纤布拉格光栅为基础的电流传感器进行了理论和实验研究。在一定范围内,外加电流和波长移动之间的关系是线性的,线性调谐的波长范围为  $0.9 \text{ nm}$ ,电流强度范围为  $900 \text{ mA}$ 。灵敏度约为  $1000 \text{ mA/nm}$ ,电流强度可精确到  $10 \text{ mA}$ 。理论和实验符合得很好。这个装置具有结构简单、线性度高、可远距离操作等优点。

本文使用的磁致伸缩材料是由北京科技大学金属材料国家重点实验室的高学绪教授提供,在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] Giles C R. Lightwave application of fiber Bragg gratings. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1391 ~ 1404
- [2] Kawase L R, Carvalho M C R, Margulis W *et al.*. Transmission of chirped optical pulses in fibre-grating dispersion compensated system. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(2):152 ~ 154
- [3] Jung J, Nam H, Lee B *et al.*. Fiber Bragg grating temperature sensor with controllable sensitivity. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(13):2752 ~ 2754
- [4] Liu Yunqi, Guo Zhuanyun, Liu Zhiguo *et al.*. Fiber grating sensor with enhanced pressure and temperature sensitivity. *Chin. Phys. Lett.*, 2000, **17**(2):115 ~ 116
- [5] Kersey A D, Davis M A, Heather J *et al.*. Fiber grating sensors. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1442 ~ 1463
- [6] Rao Yunjiang. Recent progress in in-fiber Bragg grating sensors: Applications. *Proc. SPIE*, 1998, **3555**:429 ~ 441
- [7] Yang Zhi, Li Changsheng, Zhang Weidong *et al.*. A novel multi-function optical fiber sensing system for simultaneous measurement of current and voltage. *Proc. SPIE*, 1998, **3555**:57 ~ 62
- [8] Cruz J L, Diez A, Andres M V *et al.*. Fiber Bragg gratings tuned and chirped using magnetic fields. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(3):235 ~ 236
- [9] Zhao Kaihua, Chen Ximou. *Electromagnetics*(电磁学), Beijing: Higher Education Press, 1985. 361 ~ 367(in Chinese)
- [10] Xia Chunlin, Ding Fan, Lu Yongxiang. The measurement of features of magnetostrictive material and its application. *Chinese J. Sci. Instrum.*(仪器仪表学报), 1999, **20**(4):368 ~ 370(in Chinese)

## Theoretical and Experimental Research on Fiber Bragg Grating Electric Current Sensor

Liao Bangquan Feng Dejun Zhao Qida Zhou Guang Kai Guiyun Dong Xiaoyi

( *Institute of modern optics , Nankai University , Tianjin 300071* )

( Received 7 September 2001 ; revised 22 November 2001 )

**Abstract :** A new electric current sensor based on fiber Bragg grating tuned by magnetostrictive material rod is demonstrated. A fiber Bragg grating is firmly clung on a magnetostrictive rod that is put into the central part of a solenoid. The Bragg wavelength of the fiber grating will shift when the uniform magnetic field in the solenoid changes. The rod will have elastic lengthening along the direction of the magnetic field. The grating resonant wavelength of fiber grating will shift as consequence of the rod lengthening. The relationship between the electric current and the wavelength shift is basically linear. The wavelength range of linear tuning is about 0.9 nm. The electric current range of sensing is about 900 mA. The sensitivity is about 1000 mA/nm. The electric current can be accurate to 10 mA. The experimental result coincides with the theory.

**Key words :** magnetostrictive material ; fiber Bragg grating ; solenoid ; electric current sensor