

文章编号: 0258-7025(2002)12-1085-04

# 磁致伸缩调制型光纤 Bragg 光栅的 温度补偿方法

易本顺<sup>1</sup>, 胡瑞敏<sup>1</sup>, 朱子碧<sup>2</sup>, 郑建成<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 武汉大学多媒体网络通信工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430079; <sup>2</sup> 香港城市大学光电研究中心, 香港)

**提要** 提出了两种简单的磁致伸缩调制型光纤 Bragg 光栅的温度补偿方法。利用磁场和磁致伸缩材料对光纤光栅的 Bragg 波长进行调制, 将一对光纤光栅按特定的结构固定, 使得磁致伸缩效应对两只光纤光栅的 Bragg 波长的调制效果相互叠加而温度的影响相互抵消。补偿后的磁场调制型光纤光栅温度在 22~ 80 °C 的范围内, 波长变化仅为 0.11 nm, 其温度灵敏度是温度补偿前的 1/10。

**关键词** 温度补偿, 光纤 Bragg 光栅, 磁制伸缩效应, 光纤, 磁场

中图分类号 O 551.2 文献标识码 A

## Temperature Compensation Techniques for Fibre Bragg Gratings Tuned by Magnetostrictive Transducers

YI Ben-shun<sup>1</sup>, HU Rui-min<sup>1</sup>, B. C. B. Chu<sup>2</sup>, K. S. Chiang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Multimedia Network Communication Engineering Institute, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079

<sup>2</sup> Optoelectronics Research Centre and Department of Electronic Engineering,  
City University of Hong Kong, Hong Kong, China

**Abstract** Two simple techniques for the compensation of the temperature effects in fiber Bragg gratings (FBGs) tuned by magnetostrictive transducers are demonstrated. The Bragg wavelengths were tuned by the magnetic field through the magnetostrictive transducer and two FBG's are arranged in such a way that the magnetostrictive effects on the two gratings are added together, while the temperature effects are cancelled out. Using these techniques, it has been able to reduce the temperature sensitivity of the sensor by more than 10 times, the additional wavelength shift due to the temperature was only 0.11 nm within the range of 22 °C~ 80 °C.

**Key words** temperature compensation, fibre Bragg grating, magnetostrictive effect, optic fiber, magnetic field

### 1 引 言

光纤光栅是光通信系统和光纤传感器中的重要无源器件, 最近几年来已引起世界范围内的广泛关注和深入研究。自从光纤 Bragg 光栅被发现以来, 各种不同的技术已被用来对光纤光栅 Bragg 波长进行调制或制作啁啾光纤光栅。如利用温度、应力、磁场等物理量进行调制, 使光纤光栅的 Bragg 波长产生可观的移动<sup>[1~3]</sup>。其中利用磁场和磁致伸缩效应使贴在磁致伸缩材料表面的光纤光栅受到应力而产

生 Bragg 波长移动的方法是较为可靠并且容易实现精确控制的方案。但光纤光栅的 Bragg 波长会随环境温度的变化发生漂移, 而在磁场调制方案中, 用来产生磁场的电流线圈的发热, 以及磁致伸缩材料较大的热膨胀系数则加剧了这种温度漂移。许多针对光纤光栅的温度补偿方案已被提出<sup>[4,5]</sup>, 但这些方案实施起来或是结构极为复杂, 或是需增加特殊的器件。

针对磁致伸缩调制型光纤光栅, 本文提出了两

收稿日期: 2001-09-12; 收到修改稿日期: 2002-01-18

**作者简介:** 易本顺(1965—), 男, 武汉大学多媒体网络通信工程湖北省重点实验室教授, 博士, 从事光纤传感、光纤 Bragg 光栅、信号处理及网络通信等方面的研究。E-mail: yibenshun@sina.com

种简单易行的温度补偿方法,按该方法设计的特殊结构使一对光纤光栅的磁致伸缩效应相互叠加而温度效应相互抵偿。

## 2 磁致伸缩调制型光纤光栅的温度补偿原理

某些材料在外界磁场的作用下其外形尺寸会发

生变化,此即磁致伸缩效应。将光纤光栅粘贴在磁致伸缩材料的表面,利用电流线圈产生的磁场可以控制作用在光纤光栅上的应力大小,使 Bragg 波长发生相应大小的移动,如果采用非均匀的电流磁场对 Bragg 波长进行调制,则可以实现啁啾光纤光栅。为了补偿磁场调制型光纤光栅的温度影响,设计了两种简单的光纤光栅结构,分别如图 1(a), (b) 所示。

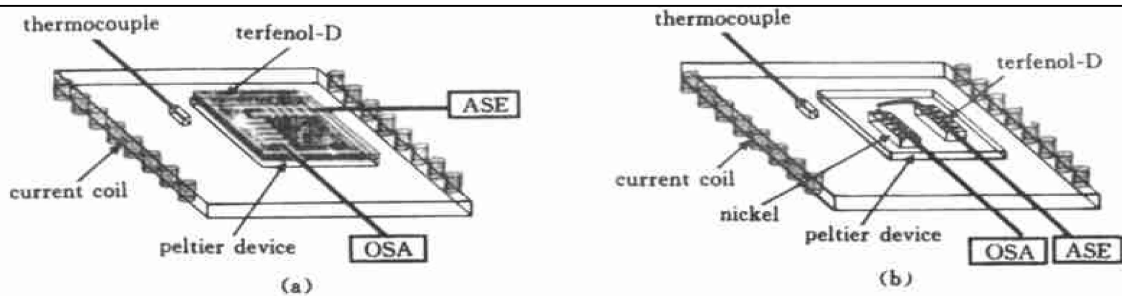


图 1 磁致伸缩调制光纤 Bragg 光栅温度补偿原理结构图

(a) 两只光纤光栅垂直粘贴在 Terfenol-D 表面; (b) 两只光纤光栅平行放置并分别粘贴在镍和 Terfenol-D 表面

Fig. 1 Schematic diagrams of the experimental setups

(a) two FBG's bonded in perpendicular to each other on a Terfenol-D plate;

(b) two FBG's bonded in parallel with each other on a Terfenol-D bar and a nickel bar, respectively

图 1(a) 中,将两只 Bragg 波长非常接近的光纤光栅相互垂直地粘在一块外形尺寸为  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  的极为灵敏的磁致伸缩材料 Terfenol-D ( $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_2$ ) 的表面上。Terfenol-D 是一种特殊的具有极强磁致伸缩效应的铽铁合金,它的磁致伸缩系数比镍大 42 倍。由直流电流线圈产生的磁场直接作用于 Terfenol-D,根据磁致伸缩理论,与磁场方向平行的 Terfenol-D 的轴向尺寸将会伸长,而与磁场方向垂直的横向尺寸将会缩短。因而粘在 Terfenol-D 表面的两只光纤光栅的 Bragg 波长将按相反的方向移动。另一方面,由于 Terfenol-D 材料的热膨胀效应是各向同性并且是均匀分布的,沿纵向和横向的热膨胀系数是相同的,即温度的任何变化,将使两只光纤光栅产生相同的波长移动,因而测出这两只光纤光栅的波长移动差值就可以使两只光纤光栅的 Bragg 波长移动相互叠加而温度影响相互抵消。设粘在 Terfenol-D 表面纵向和横向的两只光纤光栅的 Bragg 波长分别为  $\lambda_{B1}$ ,  $\lambda_{B2}$ , 则它们同时受到磁场和温度作用时的波长移动  $\Delta\lambda_{B1}$ ,  $\Delta\lambda_{B2}$  相对于  $\lambda_{B1}$ ,  $\lambda_{B2}$  的相对变化值可分别表示为<sup>[6]</sup>

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} = \rho H + (1 - p_e) \alpha \Delta T + \xi \Delta T \quad (1)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = -\rho H + (1 - p_e) \alpha \Delta T + \xi \Delta T \quad (2)$$

其中  $\rho (> 0)$  和  $\rho (< 0)$  分别为 Terfenol-D 纵向和横向的磁致伸缩系数,  $p_e$  为石英光纤的光弹性系数,  $\xi$  为光纤的热光系数,  $\alpha$  为 Terfenol-D 的热膨胀系数,  $H$  为电流线圈所产生的磁场,  $\Delta T$  为温度的变化量。Bragg 波长移动的差值可由 (1) 式减去 (2) 式得到

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = (\rho + \rho) H \quad (3)$$

式 (3) 表明这种方法不仅可以完全消除由磁致伸缩材料和光纤光栅本身的热膨胀效应所带来的温度漂移的影响,而且增强了磁场对 Bragg 波长进行调制的灵敏度。由于一般的磁致伸缩材料都同时具有纵向和横向磁致伸缩效应,因此这种将两只光纤光栅相互垂直粘贴在磁致伸缩材料上来增强磁致伸缩效应并抑制温度影响的方法是一种普遍性的方法,也适合其他磁致伸缩材料。

图 1(b) 中,两只几乎完全相同的光纤光栅分别粘在外形尺寸为  $40\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  的 Terfenol-D 和镍的表面上, Terfenol-D 和镍沿磁场方向平行放置。由于 Terfenol-D 和镍具有非常接近的热膨胀系数,分别为  $1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$  和  $1.3 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ , 但它们的磁致伸缩系数却是反方向的,即 Terfenol-D 具有正向的磁致伸缩系数而镍却具有负磁致伸缩系数,

因而两只光纤光栅 Bragg 波长相对变化的差值为

$$\frac{\Delta \lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta \lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = (\rho + \rho_n)H + (1 - p_c) \times (\alpha - \alpha_n) \Delta T \approx (\rho + \rho_n)H \quad (4)$$

其中  $\rho_n (> 0)$  为镍的纵向磁致伸缩系数,  $\alpha_n$  ( $\alpha_n \cong \alpha$ ) 为镍的热膨胀系数。由式(4)可看出, 所得 Bragg 波长移动的差值为 Terfenol-D 和镍的磁致伸缩效应的叠加。

### 3 实验与结果

实验所采用的光纤光栅是香港城市大学光电研究中心用 QPS 光敏光纤通过相位模板复制法制作的。一台掺铒光纤放大器(EDFA)中的放大自发辐射(ASE)光谱输出被用作实验光源, 输出光信号用光谱仪(OSA)进行监视和测量。在图 1(a)所示结构的实验中所用到的两只光纤光栅在 22 °C 时的 Bragg 波长分别为 1561.7 nm 和 1562.0 nm。磁致伸缩材料 Terfenol-D 被放置于一个 12 cm 长的螺线管中, 当通以 38 A 直流电流时, 该螺线管中心将产生  $8.2 \times 10^{-2}$  T 的直流磁场, 通过调节螺线管中的电流可以方便地改变磁场的大小。按图 1(a)所示结构进行实验, 在不同的磁场条件下, 所测得的两只光纤光栅的 Bragg 波长移动的差值如图 2 所示, 在  $8.2 \times 10^{-2}$  T 的磁场范围内可获得 1.2 nm 的波长移动, 在图 2 的线性响应区域内, 由磁场所产生的波长移动的最大灵敏度为 24.4 nm/T, 高于文献[3]中报道的采用单只光纤光栅的 20 nm/T 的灵敏度, 这多出的部分是由于感受横向磁致伸缩效应的那只光纤光栅的贡献。图 2 所示曲线中的非线性部分是由于在强磁场作用下因 Terfenol-D 磁致伸缩饱和而引起的。

为了验证式(3)所显示的温度补偿效果, 将 Terfenol-D 材料放在一只电致发热的 Peltier 半导体器件的表面上, 利用该 Peltier 器件可均匀地控制温度的变化。将磁场固定在  $3.17 \times 10^{-2}$  T, 用一只热电偶进行实时温度测量, 每 5 °C 记录一次光纤光栅的 Bragg 波长, 图 3 所示曲线分别为两只光纤光栅的 Bragg 波长随温度的变化曲线以及两者的差值与温度的关系曲线。从图 3 可得出粘在 Terfenol-D 表面的两只光纤光栅的 Bragg 波长对温度的灵敏度约为  $2.6 \times 10^{-2}$  nm/°C, 两只光纤光栅 Bragg 波长变化的差值对温度的灵敏度却只有  $-2.0 \times 10^{-3}$  nm/°C, 比补偿前的温度灵敏度小一个数量级。从图 3 还可

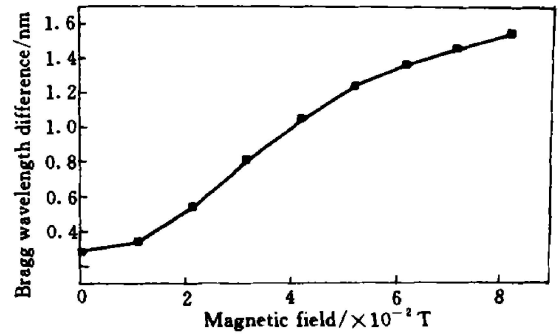


图 2 图 1(a) 中两只光纤光栅 Bragg 波长之差与磁场的关系曲线

Fig. 2 Difference between the two Bragg wavelengths as a function of the applied magnetic field for the experimental setup shown in Fig. 1(a)

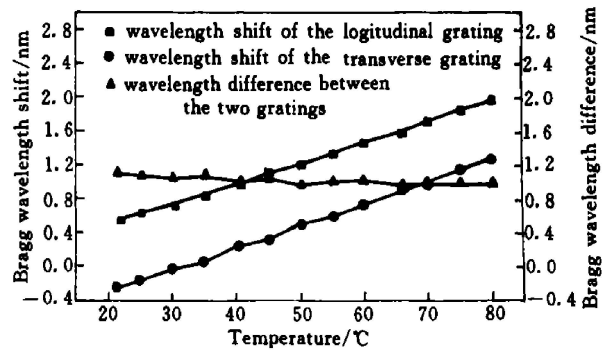


图 3 图 1(a) 中两只光纤光栅的波长移动及它们的差值与温度的关系曲线

■: 纵向光纤光栅的 Bragg 波长移动; ●: 横向光纤光栅的 Bragg 波长移动; ▲: 两只光纤光栅的 Bragg 波长之差

Fig. 3 Bragg wavelength shifts of the two gratings and their difference against the temperature for the experimental setup shown in Fig. 1(a) with the magnetic field fixed at  $3.17 \times 10^{-2}$  T

观察到 Bragg 波长的差值随温度的升高而稍稍减小, 这主要是由于 Terfenol-D 的磁致伸缩系数随温度的升高略微下降的缘故。图 4 所示为 22 °C 和 45 °C 温度下, 两光纤光栅的光传输谱图, 可以看出, 对应两只光纤光栅 Bragg 波长的两个峰谷之间的间隔在不同的温度下几乎保持不变, 实验结果符合(3)式的理论推导。

在图 1(b) 中, 实验所用到的另一对光纤光栅在 22 °C 时的 Bragg 波长分别为 1563.5 nm 和 1564.8 nm, 这两只光纤光栅通过熔接串联在一起, 分别粘在 Terfenol-D 和镍的表面上, 然后并行放入螺线管中。由于 Terfenol-D 和镍的磁致伸缩系数是反方向的, 在磁场的作用下, 两只光纤光栅的 Bragg 波长将沿相反的方向移动。在  $7.0 \times 10^{-2}$  T 时, 测得波长

移动的差值为 0.8 nm。在图 5 所示曲线的线性段获得的最大响应灵敏度为 18 nm/T, 比图 1(a) 所示结构的灵敏度稍低。虽然式(4)显示最后的磁场对 Bragg 波长的调制是 Terfenol-D 和镍的磁致伸缩效应的叠加, 但由于镍的磁致伸缩系数比 Terfenol-D 小 42 倍, 最后的输出中已看不出镍的贡献。另外, 实验所用光谱仪有限的分辨率(0.1 nm)也限制了测量的精度。

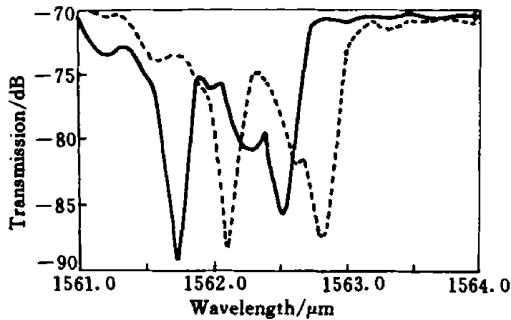


图 4 图 1(a) 中的两只光纤光栅在 22 °C 和 45 °C 时的透射光谱  
Fig. 4 Transmission spectra of the grating pair at different temperatures for the experimental setup shown in Fig. 1(a)  
—: at 22 °C; ----: at 45 °C

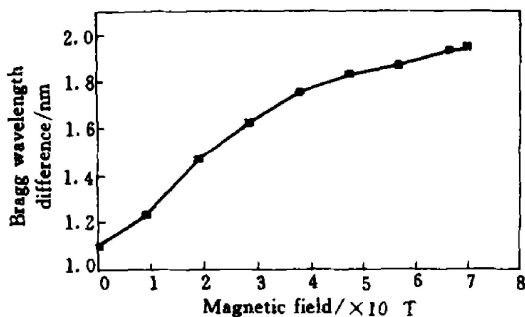


图 5 图 1(b) 中两只光纤光栅 Bragg 波长之差与磁场的关系曲线

Fig. 5 Difference between the two Bragg wavelengths as a function of the applied magnetic field for the experimental setup shown in Fig. 1(b)

图 6 所示曲线分别为两只光纤光栅的 Bragg 波长随温度的变化曲线以及两者的差值与温度的关系曲线, 实验中将磁场固定为  $2.86 \times 10^{-2}$  T, 同样每 5 °C 记录一次数据。实验得到粘在 Terfenol-D 和镍表面的两只光纤光栅对温度的灵敏度分别为  $1.8 \times 10^{-2}$  nm/°C 和  $2.0 \times 10^{-2}$  nm/°C。两只光纤光栅 Bragg 波长变化的差值对温度的灵敏度为  $-1.6 \times 10^{-3}$  nm/°C。跟前述结构类似, 温度补偿效果明显, 但温度继续升高后, 补偿效果将因 Terfenol-D 的磁致伸缩系数下降而稍减弱。

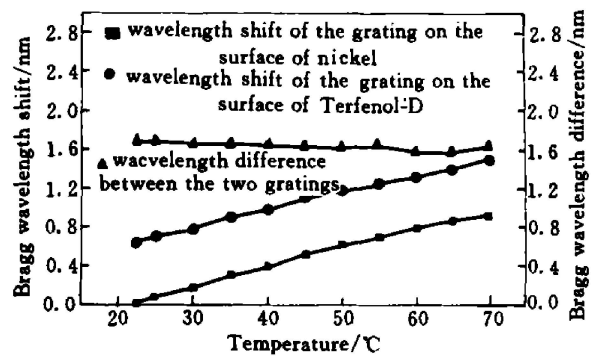


图 6 图 1(b) 所示结构中两只光纤光栅的波长移动及它们的差值与温度的关系曲线

■: 贴在镍表面的光栅的 Bragg 波长移动; ●: 贴在 Terfenol-D 表面的光栅的 Bragg 波长移动; ▲: 两只光纤光栅的 Bragg 波长之差  
Fig. 6 Bragg wavelength shifts of the two gratings and their difference against the temperature for the experimental setup shown in Fig. 1(b) with the magnetic field fixed at 286 Gauss

## 4 结 论

将两只光纤光栅相互垂直地粘贴在 Terfenol-D 表面的补偿结构, 虽可以获得较高一点的调制灵敏度, 但所需的 Terfenol-D 尺寸较大, 因而比较昂贵。另外一种结构利用两块磁致伸缩系数相反, 热膨胀系数相近的条形材料, 可减少整个器件的外形尺寸, 并且材料费用低。两种方法都能在较宽的温度范围内获得明显的温度补偿效果, 同时通过两者磁致伸缩效应的叠加还在一定程度上增强了系统整体的磁场调制灵敏度。

## 参 考 文 献

- 1 Du Weichong, H. Y. Tam, M. S. Demokan *et al.*. A simple method to enhance temperature sensitivity of fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(1): 75~ 77 (in Chinese)
- 2 F. M. Haran, J. K. Rew, P. D. Foote. A strain isolated fiber Bragg grating sensor for temperature compensation of fiber Bragg grating strain [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, **9**(8): 1163~ 1166
- 3 J. L. Guz, A. Diez, M. V. Anures *et al.*. Fiber Bragg gratings tuned and chirped using magnetic fields [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **33**(3): 235~ 236
- 4 G. W. Yoffe, P. A. Krug, F. Ouellette *et al.*. Passive temperature compensating package for optical fiber gratings [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(30): 6859~ 6861
- 5 V. Arya, D. W. Sherrer, A. Wang *et al.*. Application of thin film optical filters to the temperature compensation of optical fiber grating-based devices [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1997, **46**(5): 1173 ~ 1177
- 6 Y. L. Lo, H. S. Chuang. Measurement of thermal expansion coefficients using an in-fiber Bragg grating sensor [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, **9**(9): 1543~ 1547