

文章编号 1004-924X(2002)01-0079-05

Bragg 光纤传感技术应用研究

唐 炜, 史仪凯

(西北工业大学 机械系, 陕西 西安 710072)

摘要: 分析了光纤光栅传感器的工作原理, 介绍了成栅技术及应用前景, 提出了在应用光纤光栅传感技术时解决温度、应力交叉敏感等新问题的新方法。研究结果对 Bragg 光纤传感器在工程技术领域具有一定的应用价值。

关键词: 光纤传感器; Bragg 光纤光栅; 交叉敏感

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引言

光纤传感器因具有抗电磁干扰、可远距离传送信号、高灵敏度等特点而被广泛关注。1978年 Ken Hill 首次发现掺锗石英光纤紫外光敏特性, 即布喇格(Bragg)光栅效应^[1]。此后, Melt 又于 1989 年发明了光纤光栅紫外写入技术, 并观察到强紫外干涉从侧面照在掺锗光纤上能引起相应位置纤芯的折射率发生变化^[2]。依据该技术可制成不同参数的光纤光栅, 此后各种成栅技术日趋成熟。

Bragg 光纤光栅除在通信领域具有广泛的应用前景外, 由于其反射波长(Bragg 波长)会随温度应力的变化而发生“波长位移”, 因而还被制成应力、温度传感器。Bragg 光纤光栅不仅具有一般传感器的优点, 而且最大优点在于信息对波长绝对编码。其不受光强影响, 能绝对测量; 易于波分、时分复用。此外, 它作为本征传感器, 光纤可靠性高, 易于埋入材料内部。本文在分析 Bragg 光纤光栅传感技术的同时, 重点分析了解决光纤光栅传感器温度、应力交叉敏感的新方法。通过与其它方案比较, 本文所提出的研究方法在 Bragg 光纤传感器的应用领域具有一定的意义。

2 FBG 成栅技术

Bragg 光纤光栅是由单模掺锗光纤经紫外光

照射成栅技术形成。其折射率呈周期性分布条纹, 如图 1 所示。当一束光进入 Bragg 光栅时, 它能对波长满足 Bragg 反射条件的入射光产生反射。这种反射是一种窄带反射, 其反射谱在 Bragg 波长处出现峰值, 近似于一个以共振波为中心的窄带滤波器, 如图 2 所示。其基本原理式为

$$\lambda = 2n\Lambda, \quad (1)$$

式中 λ 为反射波波峰处波长, 即后向反射波长; Λ 为光栅周期; n 为光纤模式的有效折射率。

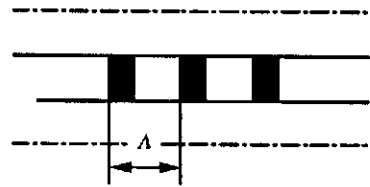


图 1 Bragg 光纤光栅结构
Fig. 1 Structure of FBG.

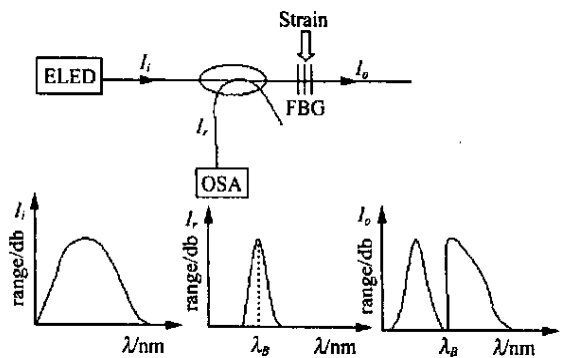


图 2 Bragg 光栅的窄带反射
Fig. 2 Narrow_band reflection of FBG.

目前, 虽然对光栅光纤形成的机理尚未有令人信服的解释, 但人们已经能够研制出数种光纤光栅成栅技术^[3-4]。主要方法分为: 双光束干涉法和非干涉法。非干涉法又主要包括: 相位掩模法、振幅掩模法、逐点写入法和在线成栅法。振幅掩模法和逐点写入法目前只能写入较长周期的光栅, 而在线成栅法尚处于试验阶段, 所以这里只介绍应用较为广泛的前两种方法。

2.1 双光束干涉写入法

如图 3 所示, 两相干紫外光束照于光纤上。相干涉出的光栅周期为

$$\Lambda = \frac{l\lambda_0}{2n_0 \sin \theta} \quad (2)$$

式中 λ_0 为紫外光波长; n_0 为空气折射率; l 为光栅级数; θ 为入射角。

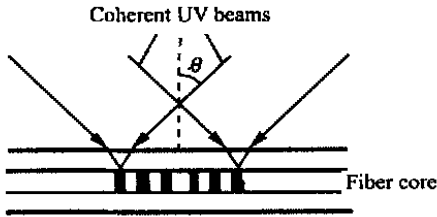


图 3 双光束干涉写入法

Fig. 3 FBG fabrication based on holographic exposure.

尽管改变式(2)中 θ 角可得到不同周期的光栅, 但这种方法要求光源具有良好的相干性即单横模输出。且不能制作复杂耦合结构的光纤光栅。

2.2 相位掩模法

该方法属于非干涉法, 其最大优点是对光源的相干性要求不高。基本原理如图 4 所示, 由 +1, -1 级衍射光束之间的干涉在掩模版后形成周期为掩模光栅周期一半的近场光强度分布, 从而对紧位于其后的光纤芯区引起周期性折射率调制。该方法是写入技术中最简单的方法。

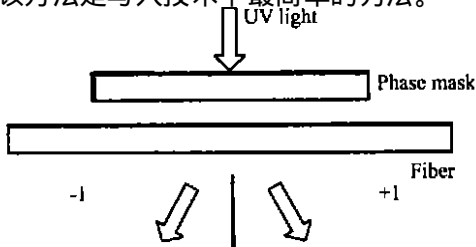


图 4 相位掩模写入法

Fig. 4 FBG fabrication based on phase mask exposure.

3 Bragg 光栅传感原理

当一束光进入 Bragg 光栅时, 它能对波长满足 Bragg 反射条件的入射光产生反射。这种反射是一种窄带反射, 其反射谱在 Bragg 波长处出现峰值, 由式(1)知 Bragg 波长随 n 和 Λ 而改变。因此 Bragg 对外界应力、温度很敏感。在受作用应力时会由于光栅周期的伸缩及弹光效应引起波长的改变。而温度的影响则是由于热膨胀效应和热光效应。经过研究我们认为, 热效应和力效应相互独立。则由式(1)有^[5]

$$\Delta\lambda = 2\Lambda\Delta n + 2n\Delta\Lambda, \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}. \quad (4)$$

假设此时 FBG 只受到拉伸应变时, 其为

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}, \quad (5)$$

则式(2)可写为

$$\Delta\lambda = 2n\Lambda\varepsilon - n^3\Lambda\Delta\left(\frac{1}{n}\right)^2, \quad (6)$$

假设光纤为各向同性材料, 根据弹性力学原理, 其折射率变化与对应 ε_i 有如下关系^[6]

$$\begin{bmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \Delta B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{12} & P_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 $B_i = \frac{1}{(n_i)^3}$, $\Delta B_i = \frac{-2\Delta n_i}{n_i^3}$; P_{11} , P_{12} , P_{44} 为光纤的光弹系数, 且 $P_{44} = \frac{P_{11} - P_{12}}{2}$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ 为光纤横向应变, ε_3 为纵向应变。

依据式(7), 则应变张量矩阵 ε 可用纵向应变 ε 表示为

$$\varepsilon = [-\nu\varepsilon \quad -\nu\varepsilon \quad \varepsilon \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

其中 ν 为纤芯材料的泊松比。

有效折射率的变化可表示为

$$\frac{\Delta n}{n} = -n^2[P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \cdot \varepsilon, \quad (8)$$

于是式(4)可表示为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - P_e) \cdot \varepsilon, \quad (9)$$

其中 P_e 为有效弹光函数, 且

$$P_e = \frac{n^2 [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]}{2}, \quad (10)$$

由式(9)知恒温时 Bragg 波长位移与纵向应变呈线性关系。再假设此时 FBG 只受到温度的影响, 温度变化为 ΔT , 由热膨胀引起的光栅周期变化 $\Delta\Lambda$ 为

$$\Delta\Lambda = \alpha \cdot \Lambda \cdot \Delta T, \quad (11)$$

其中, α 为光纤的热膨胀系数。由热光效应引起的有效折射率变化为

$$\Delta n = n \cdot \varepsilon \cdot \Delta T, \quad (12)$$

于是式(4)可写成

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (\alpha + \varepsilon) \cdot \Delta T. \quad (13)$$

所以在无应变时, Bragg 波长位移与温度变化成线性关系。由此可见, Bragg 波长位移为温度、应力两方面分别引起的位移之和。

4 Bragg 光栅的测量

实际应用时, 一个参数的变化会影响对另一个参数的测量, 主要讨论处理温度和应力的交叉敏感性问题。这就需要对一个参数采用增敏或去敏的方法以减少这种影响。例如只测量温度时, 把 FBG 与其他热膨胀系数比石英大许多的材料封装在一起。曾有人把 FBG 置于铝套并与之牢固, 温度灵敏度提高数倍。又如, 英国南安普敦大学光电研究中心提出用双波长光纤光栅同时测量温度和应力的方法^[7]。他们采用的双键元件是一个重叠的光纤光栅, 它的两个 Bragg 波长分别为 $\lambda_{b1} = 1298\text{nm}$, $\lambda_{b2} = 848\text{nm}$ 。假设应力和温度感生的 Bragg 波长的 $\Delta\lambda_{bi}$ 是线性且独立的, 则有

$$\Delta\lambda(\varepsilon, T) = \alpha\varepsilon\Delta\varepsilon + \alpha_T\Delta T, \quad (14)$$

式中 $\alpha\varepsilon$ 与光纤泊松比、光弹系数和纤芯折射率有关, α_T 由热膨胀系数和热光系数决定, 故有

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{b1} \\ \Delta\lambda_{b2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{\varepsilon_1} & \alpha_{T_1} \\ \alpha_{\varepsilon_2} & \alpha_{T_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中 $[\alpha]$ 矩阵可在 $\Delta\varepsilon = 0$ 和 $\Delta T = 0$ 的情况下分别测出, 实际使用时测出 $\Delta\lambda_{bi}$ 可解出 $\Delta\varepsilon$ 和 ΔT 。

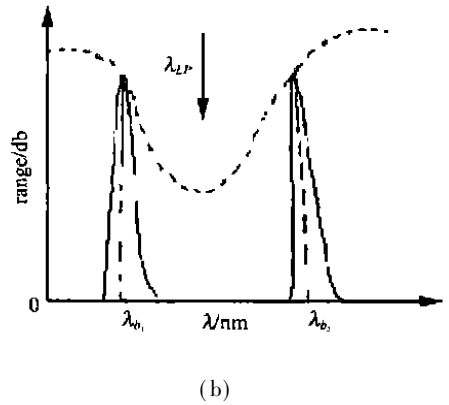
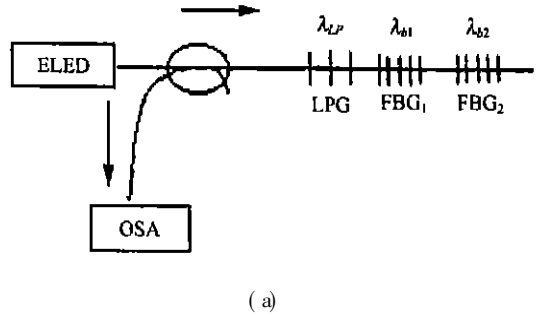
为了进一步提高测量时的精度, 从 95 年开始相继有人采用 LPG(long period gratings) 测量。

LPG 是运用膜版技术将裸露的光纤在紫外线下照射, 形成周期较长的光栅。它不同于 FBG 之处是它将光从纤芯耦合到包层, 它没有反射光谱。但它输出光谱中会产生一个特殊的波长 λ_p , 其为

$$\lambda_p = |n_{c_0} - n_{c_1}(m)| \cdot \Lambda, \quad (16)$$

式中 n_{c_0} , $n_{c_1}(m)$ 分别为光纤的纤芯和包层的折射率; m 为光纤的模数; Λ 周期。

有一种典型的传感结构如图 5 所示^[8]。其中 $\lambda_p = 1306\text{nm}$, $\lambda_{b1} = 1293\text{nm}$, $\lambda_{b2} = 1321\text{nm}$



5 LPG 结合 FBG 用于测量应力和温度的原理示意图
Fig. 5 Schematic diagram of the hybrid FBG/LPG sensor for strain and temperature measurement.

由于 LPG 对温度变化的敏感性是 FBG 的 7 倍, 即单位温度变化下波长位移是 FBG 的 7 倍。而它对应力的敏感性只有 FBG 的一半。因为 LPG 的光谱带宽很大, 并且由于 $\Delta\lambda_p$ 不与温度、应力的改变成比例关系, 所以实验者们利用 λ_{b1} , λ_{b2} 处强度 R_1, R_2 大小来衡量 $\Delta\lambda_p$, 并且设计了线性参数 $F(R_1, R_2) = \frac{\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2}}{\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2}}$ 和 $\Delta\lambda_{b2}$ 同时测量温度和应力。当应力作用时, $\Delta\lambda_p < \Delta\lambda_{bi}$, 所以 R_1 会稍微减小, R_2 会稍微增大; 当有温度升高时, $\Delta\lambda_p$ 远大于 $\Delta\lambda_{bi}$, R_1 会增大许多, R_2 会减

小许多。可以看出该装置中主要测量温度的改变,FBG 则测量应力变化。它的误差为 $\pm 9\mu\text{E}$ 和 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 。

5 FBG 的应用

FBG 作为传感器,目前正被应用成一种新的分布式温度、应变传感器。其主要代表是 3S 结构^[3],即 smart material, smart structure and smart skin。它是将光纤光栅、光纤神经网络、光纤致动器结合在一起,利用掩埋和贴附的方法把它们复合到载体及复合材料中的技术。利用这套系统能对被测体(如飞机蒙皮)的多种参数如温度、应力、老化、裂变等进行测量、诊断和控制。它具有其他传感器不可比拟的优点:

(1) 体积小,重量轻,强度高,弯曲性能好,适于各种形状物体的测量。

(2) 光纤细而柔韧,容易掩埋在材料中形成神经网络。

(3) 可制成智能材料,进行监测和自我修复。

我们在目前研究中遇到的问题,主要有以下几个方面:

(1) 光纤需要足够细,约 20~40 μm ,太粗会

影响材料本身的机械性能。

(2) 光栅掩埋与贴附工艺的研究,一方面尽可能使材料与光纤结合在一起;另一方面又要考虑二者膨胀系数的差异。

(3) 分布式结构,常会要求同时处理上百个或更多 Bragg 波长,多变量特别是温度、应变的同时测量依旧是个难题。

此外,光纤光栅的测量参数尚停留在温度应变的测量,对其他参数仍处在研究中。例如,1993年, M. G. Xu 曾对裸露的光纤光栅的压力传感特性进行研究^[9],发现 FBG 对压力敏感性很低。1996年,他把光纤光栅固定于中空的玻璃球结构中利用玻璃球的放大作用使灵敏度提高了一个数量级^[10]。

6 结 论

光纤光栅作为一种新型传感器,目前仍处于实验研究阶段,距离实用化还有很大的距离。但随着该技术的成熟及相关技术的发展,可以预见,它将在航空、航天、建筑、材料等众多领域有着广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Hill K O. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application filter fabrication[J]. *Appl. Phys. Lett*, 1978, (32): 647_649.
- [2] Meltz G. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. *Opt. Lett*, 1989, 14(15): 823_825.
- [3] 张兴周. Bragg 光纤光栅与光纤传感技术[J]. *光学技术*, 1998, (4): 70_74.
- [4] 陈根祥, 简水生. *光波技术基础*[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.
- [5] 陈少武, 陈尧生. 光纤 Bragg 光栅热敏力敏效应应用研究及探讨[J]. *光子学报*, 1997, (8): 690_694.
- [6] 刘德明, 向清. *光纤光学*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [7] Xu M G. Discrimination between strain and temperature effects using dual_wavelength fiber grating sensors[J]. *Electron Lett*, 1994, 30(13): 1085_1087.
- [8] Patrick H J, Eillians G M, Kersy A D. Hybrid fiber Bragg grating/long period grating sensor for strain[J]. *IEEE Photonics Technol. Lett*, 1996, (8): 1223_1225.
- [9] Xu M G, Reekia L, Chow Y T. Optical fiber grating high pressure sensor[J]. *Electron Lett*, 1993, 29(4): 398_399.
- [10] Xu M G, Geiger H, Dakin J P. Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass-bubble housing[J]. *Electron Lett*, 1996, 32(2): 128.
- [11] 何万迅, 施文康, 叶爱伦. 长周期光纤光栅及其在通信传感领域的新应用[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(2): 104_108.
- [12] 张尧禹, 张明慧. 光纤陀螺的初步探讨[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(3): 266_268.
- [13] 郭玉彬, 葛璜. 光纤 Bragg 光栅的研究[J]. *光学 精密工程*, 1999, 7(1): 31_38.

Optical fiber Bragg grating sensing technology

TANG Wei, SHI Yi_kai

(Department of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The paper reviews the sensing principle, fabrication techniques of fiber Bragg gratings (FBG) and their applications in sensors. Two solutions to temperature and strain cross_sensitivity, which are intrinsic problems of FBG, are described in detail. With these solutions, more accurate information about strain and temperature can be obtained simultaneously. The FBG's application_3s system and the problems met in the project are mentioned. It is demonstrated that the FBE used in sensing technology is superior to other technologies.

Key words: fiber sensors; fiber Bragg grating; cross_sensitivity

作者简介: 唐 炜(1977-)男,湖北襄樊人,西北工业大学硕士研究生,研究方向主要是传感器,电力电子;
史仪凯(1952-)男,陕西兴平人,西北工业大学教授,主要从事机电控制及自动化研究。