

文章编号: 1001-3806(2005)02-0159-03

## 光纤布喇格光栅应力增敏理论研究

傅海威<sup>1,2</sup>, 傅君眉<sup>1\*</sup>, 乔学光<sup>2</sup>, 贾振安<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 西安 710049; 2. 西安石油大学 理学院, 西安 710065)

**摘要:** 提出了一种光纤布喇格光栅应力增敏的模型, 推导了该模型的应力与光纤布喇格光栅中心波长相对偏移量之间的关系, 以及增敏后的光纤布喇格光栅应力响应灵敏度系数的表达式, 给出了该增敏模型的弹性模量计算公式, 指出通过适当选择弹性体的弹性模量和尺寸, 可以提高光纤布喇格光栅应力响应灵敏度。

**关键词:** 导波与光纤光学; 光纤布喇格光栅; 光纤布喇格光栅传感; 光纤布喇格光栅应力灵敏度系数; 光纤布喇格光栅应力响应增敏

中图分类号: TN253 文献标识码: A

### Study about the stress sensitivity enhancement of fiber Bragg gratings

FU Haiwei<sup>1,2</sup>, FU Junmei<sup>1</sup>, QIAO Xueguang<sup>2</sup>, JIA Zhen'an<sup>2</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Science Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract** A stress sensitivity enhancement model of optical fiber Bragg gratings is proposed. The relationships between stress and relative shift of center wavelength and the expression of stress sensitivity coefficient of the enhanced fiber Bragg gratings are derived. The elastic modulus of the model is also put forward. It is pointed out that the stress sensitivity coefficient of fiber Bragg gratings can be enhanced by properly selecting the elastic modulus and the size of the elastic part.

**Key words** guided wave and fiber optics; fiber Bragg gratings; fiber Bragg gratings sensing; stress sensitivity coefficient of fiber Bragg gratings; stress sensitivity enhancement of fiber Bragg gratings

## 引 言

自 1978 年 HILL 等人将光纤布喇格光栅用于传感以来, 光纤布喇格光栅传感理论与技术的研究受到人们广泛的关注。由于光纤布喇格光栅的抗电磁干扰、耐腐蚀等诸多优点, 已经被广泛用于应变、压力、压强、温度、流量、流速、气体成分等多种物理量的传感测量<sup>[1~5]</sup>。最近, 光纤布喇格光栅传感器被用来测量油气井下和输油管线的压力、温度等物理量<sup>[3]</sup>。

光纤布喇格光栅是对应变和温度都敏感的器件<sup>[4,6]</sup>, 可以直接用来测量应变和温度, 也可以利用应力应变关系间接测应力、压强、压力等。对于裸光纤布喇格光栅来讲, 单位轴向应力所产生的应变是确定的, 所引起的中心波长偏移是一定的, 也就是说应力灵敏度

系数是一个常量。要想直接使用光纤光栅测量小的应力, 信号解调的精度必须非常高, 若不采取增敏措施, 实现起来就非常的困难, 所以, 光纤布喇格光栅应力响应增敏理论和技术的研究就成了光纤布喇格光栅传感研究的一个核心问题<sup>[6,7]</sup>。笔者提出了一种应力增敏的模型, 讨论了该模型应力增敏的基本理论和方法, 从理论上给出了该模型的应力与布喇格波长之间的关系。

### 1 光纤布喇格光栅应力响应

根据光纤布喇格光栅的耦合模理论<sup>[8]</sup>, 均匀非闪耀光纤布喇格光栅可将其中传输的一个导模耦合到另一个沿相反方向传输的导模而形成窄带反射波, 反射波中心波长  $\lambda_B$  为<sup>[8]</sup>:

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

式中,  $n_{\text{eff}}$  为导模的有效折射率,  $\Lambda$  为光栅周期。

当光纤布喇格光栅受到外力作用时, 由于弹光效应的作用以及光栅周期的变化, 将引起光纤布喇格光栅反射波中心波长  $\lambda_B$  的偏移, 即:

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda \quad (2)$$

在轴向应力作用下, 布喇格光栅反射波中心波长相对偏移量与轴向应变之间的关系为:

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目 (2002AA313150); 国家自然科学基金资助项目 (69877025); 国家教育部科学技术重点资助项目 (02190); 陕西省自然科学基金资助项目 (2000C34); 陕西省教育厅科学技术资助项目 (02JK158); 西安市科技攻关资助项目 (GG200126)

作者简介: 傅海威 (1966-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感器件及系统理论与技术。

\* 通讯联系人。E-mail: MFu@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2004-02-09; 收到修改稿日期: 2004-04-12

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \varepsilon \quad (3)$$

式中,  $p_e$  为光纤的有效弹光系数,  $\varepsilon$  为光纤光栅的轴向应变, 对于石英光纤  $p_e = 0.216$  应变灵敏度系数为  $7.84 \times 10^{-7} / \mu\varepsilon$ ,  $\mu\varepsilon$  表示微应变。

再根据轴向应力与应变之间的关系可得布喇格中心波长相对偏移量与应力之间的关系为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1 - p_e}{E_f} \sigma \quad (4)$$

式中,  $E_f$  为光纤布喇格光栅的弹性模量,  $\sigma$  为轴向应力。对于熔石英光纤来讲,  $E_f = 7.0 \times 10^{10} \text{ Pa}$  则其应力灵敏度系数为  $1.12 \times 10^{-11} / \text{Pa}$

### 2 光纤布喇格光栅应力增敏原理与分析

对于作为传感的光纤布喇格光栅来讲, 它是实心圆柱, 是各向同性的。将光纤布喇格光栅紧紧嵌入一圆柱形弹性基体材料中, 且让其位于圆柱形弹性体的轴线上, 并设在整个柱体拉伸或压缩时光栅和弹性体无相对运动。取如图 1 所示圆柱坐标。依据弹性力学和材料力学知识, 可以利用弹性基底和光纤布喇格光栅的力学性质来估计复合圆柱体的力学性质<sup>[9]</sup>。

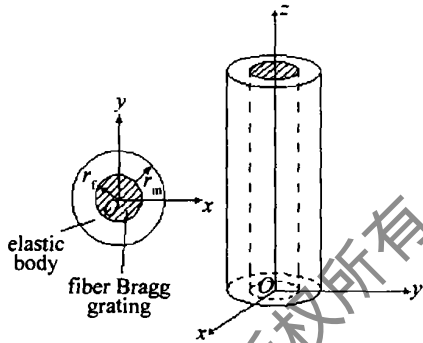


Fig 1 Schematic of fiber Bragg grating stress sensitivity enhancement model

设光纤布喇格光栅和弹性基体在对称轴方向, 也就是坐标轴  $z$  方向加载以后所产生的应变是一样的, 即加载前后垂直于轴的截面保持为平面。这样由光纤布喇格光栅和弹性体材料所组成的同心圆柱体显然属于横观各向同性体,  $O-x-y$  平面为各向同性面, 根据弹性力学知识知道其独立弹性常数共有 5 个。在柱坐标系  $(z, r, \varphi)$  中,  $z$  方向的应力在同心圆柱端面上的分布, 使得在该方向上产生应变  $\varepsilon$ 。引进 Airy 应力函数  $\varphi(r)$ , 则应力分量为:

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr}, \quad \sigma_\theta = \frac{d^2\varphi}{dr^2}, \quad \tau_{r\theta} = 0 \quad (5)$$

应力函数满足的变形协调方程为<sup>[9]</sup>:

$$\left[ \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right]^2 \varphi = 0 \quad (6)$$

其解为:

$$\varphi(r) = A \ln r + B r^2 \ln r + C r^2 + D \quad (7)$$

式中,  $A, B, C, D$  为待定常数, 则由 (5) 式可得应力应变表达式为:

$$\sigma_r = \frac{A}{r^2} + B(1 + 2 \ln r) + 2C \quad (8)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{A}{r^2} + B(3 + 2 \ln r) + 2C \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{1 + \mu}{E} \left[ \frac{A}{r^2} + 2(1 - 2\mu)B \ln r + B(1 - 4\mu) + 2C(1 - 2\mu) \right] - \mu\varepsilon \quad (10)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1 + \mu}{E} \left[ -\frac{A}{r^2} + 2(1 - 2\mu)B \ln r + B(3 - 4\mu) + 2C(1 - 2\mu) \right] - \mu\varepsilon \quad (11)$$

式中,  $E, \mu$  分别为材料的弹性模量和泊松比。由轴对称性可知应变与位移的关系为:

$$\varepsilon = \frac{du_r}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} \quad (12)$$

式中,  $u_r$  为位移, 因为应力是轴对称的, 在应力作用下的位移也应该是轴对称的, 物体内部各点都不会产生环向位移, 于是得到  $B = 0$  设  $A_m, C_m$  和  $A_f, C_f$  分别表示弹性基体和光纤布喇格光栅区的积分常数, 由 (8) 式和 (9) 式可得:

$$\sigma_{mr} = \frac{A_m}{r^2} + 2C_m \quad (13)$$

$$\sigma_{m\theta} = -\frac{A_m}{r^2} + 2C_m \quad (14)$$

$$\sigma_f = \frac{A_f}{r^2} + 2C_f \quad (15)$$

$$\sigma_{f\theta} = -\frac{A_f}{r^2} + 2C_f \quad (16)$$

当  $r = 0$  时光纤光栅上的应力必须是有限值, 所以  $A_f = 0$  其余各积分常数由边界条件和连续条件确定。边界条件是当  $r = r_m$  时外侧面应力  $\sigma_{mr} = 0$  连续条件是在界面上光纤光栅与弹性体的应力、位移相等, 即  $r = r_f$  时,  $\sigma_f = \sigma_{mr}$  和  $u_f = u_{mr}$ 。复合材料和组分材料的应变能关系式为:

$$U_c = U_f = U_m \quad (17)$$

式中  $U_c, U_f, U_m$  分别是复合材料、光纤布喇格光栅、弹性基体部分的应变能, 其表达式为:

$$\begin{cases} U_c = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon_z \varepsilon_z dV = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon_z^2 E_{cz} dV \\ U_f = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_f \varepsilon_f + \sigma_{f\theta} \varepsilon_{f\theta}) dV \\ U_m = \frac{1}{2} \int_{V_m} (\sigma_{mr} \varepsilon_{mr} + \sigma_{m\theta} \varepsilon_{m\theta}) dV \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $V, V_f, V_m$  分别是复合材料、光纤布喇格光栅和弹性体部分的体积。将以上应力、应变结果代入应变能表达式, 得出轴向弹性模量:

$$E_c = E_f V_f + V_m E_m + \frac{4(\mu_f - \mu_m)^2 V_f V_m \eta_f + \eta_f \eta_m G_m}{(V_f \eta_f + V_m \eta_m) G_m + \eta_f \eta_m} \quad (19)$$

式中,  $\eta_f = \frac{E_f}{2(1 - \mu_f - 2\mu_f^2)}$ ,  $\eta_m = \frac{E_m}{2(1 - \mu_m - 2\mu_m^2)}$ ,  $G_m = \frac{E_m}{2(1 + \mu_m)}$ ,  $\mu_f$ ,  $\mu_m$ ,  $E_f$ ,  $E_m$  分别为光纤光栅和弹性体的泊松比和弹性模量,  $V_f$ ,  $V_m$  分别表示光纤光栅和弹形体在复合体中所占的体积份额。

对多数复合材料, (19) 式右端最后一项较小, 可忽略, 由此得:  $E_c = E_f V_f + E_m V_m$  (20)

可见, 如图 1 所示的复合材料, 其弹性模量取决于光纤布喇格光栅和弹性基体的弹性模量以及两种材料的体积份额。

该模型的轴向应力、中心波长相对偏移量之间的关系为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1 - p_e}{E_c} \sigma \quad (21)$$

表明复合圆柱体中的光纤布喇格光栅应力响应灵敏度系数为  $(1 - p_e) / E_c$ , 是裸光纤光栅的  $E_f / E_c$  倍。

对于作为传感的光纤布喇格光栅来讲, 提高应力灵敏度的方法就是设法降低复合材料的弹性模量, 其途径有二, 一是尽可能降低弹性基体的弹性模量, 二是增大基底材料的份额。

### 3 结 论

对于光纤布喇格光栅来讲, 其外径为 0.125mm, 将它嵌入到弹性模量较小的弹性体中, 当弹性体的外径为 10mm 时, 则光纤布喇格光栅和光纤的体积与弹性基体的体积之比为 0.156%, 复合体的弹性模量主要取决于弹性体的弹性模量, 从理论上讲, 选择弹性模量小的弹性体, 可以使该复合柱体的弹性模量  $E_c$  比光纤的弹性模量小 3 到 4 个数量级; 当弹性体外径为 1mm 时, 复合材料的弹性模量  $E_c$  是光纤弹性模量的 1.59%, 可使复合材料的弹性模量降低一到两个数量级。弹性模量降低一个量级, 则同样大小应力作用下

所产生的应变将增大一个量级, 应变的增大将引起中心波长相对偏移量增加一倍, 这样就可实现光纤布喇格光栅应力响应的增敏。

若将光纤布喇格光栅封装在弹性模量较小的弹性体材料中, 就可以实现应力增敏的光纤布喇格光栅传感器。若封装直径为 5mm, 当以弹性模量为 3.2GPa 的环氧树脂作基底时, 封装后柱体的弹性模量变为 3.24GPa, 应力灵敏度系数变为  $2.42 \times 10^{-10} / \text{Pa}$ , 比裸光纤光栅的提高了 21 倍; 当选用模量为 1.2GPa 的聚四氟乙烯作为基底时, 封装后其弹性模量变为 1.243GPa, 应力灵敏度系数变为  $6.3 \times 10^{-10} / \text{Pa}$ , 比裸光纤光栅的提高了 56 倍。若能找到性能更为优异的弹性材料, 应力灵敏度就会得到更大的提高, 从而实现性能优异的应力传感器, 进而实现性能优异的压强和压力传感器。

本文中的结果对于设计光纤布喇格光栅应力传感器以及压强、压力传感器都具有较大的理论指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] MAASKANT R, ALAVIE T, MEASURES R M *et al* Fiber optic Bragg grating sensors for bridge monitoring [J]. *Cement and Concrete Composites* 1997, 19(1): 21~33.
- [2] ECKE W, LATKA L, WILLSCH R *et al* Optical fiber Bragg grating strain sensor network for X-38 spacecraft health monitoring [J]. *Proc SPIE*, 2000, 4185: 888~891.
- [3] SPRIN V V, SHLYAGIN M G, MRIDONOV S V *et al* Fiber Bragg grating for petroleum hydrocarbon leak detection [J]. *Optics and Lasers in Engineering* 2000, 32: 497~503.
- [4] XU M G, REEKIE L, CHOW Y T *et al* Optical in-fiber grating high pressure sensor [J]. *Electron Lett* 1993, 29(4): 398~399.
- [5] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J *et al* Fiber grating sensors [J]. *IEEE J Lightwave Technol* 1997, 15(8): 1442~1463.
- [6] LU Y Q, GUO Zh Y, ZHANG Y *et al* Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer coated fiber Bragg grating [J]. *Electron Lett* 2000, 36(6): 564~566.
- [7] XU M G, CEIGER H, DAKIN J P *et al* Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass bubble housing [J]. *Electron Lett* 1996, 32(4): 128~129.
- [8] 廖延彪. 光纤光学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 197~201.
- [9] 吴家龙. 弹性力学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1993. 175~184.
- [10] International Conf on Comm [C]. New Orleans Conference Record IEEE, 2000, 2: 974~979.
- [6] HARA IH, WADA N, KUBOTA F *et al* Contention resolution using multistage fiber delay line buffer in a photonic packet switch [A]. IEEE International Conf on Comm [C]. New York Conference Record IEEE, 2002, 5: 2843~2847.
- [7] YOO M, JEONG M, QIAO C. A high speed protocol for bursty traffic in optical networks [J]. *SPIE*, 1997, 3230: 79~90.

(上接第 155 页)

- [3] CALLEGATIE. Optical buffers for variable length packets [J]. *IEEE Commun Lett* 2000, 4(9): 292~294.
- [4] ZHANG JS, CAO M C, LUO F G *et al* Variable time-period optical switching: a novel OBS implementation [J]. *Chinese Opt Lett* 2003, 1(9): 513~516.
- [5] YOO M, QIAO C, DAKIN J S. The effect of limited fiber delay lines on QoS performance of optical burst switched WDM networks [A]. *IEEE*