

光纤光栅温度传感理论与实验^{*}

乔学光¹⁾ 贾振安¹⁾ 傅海威^{1,2)} 李明¹⁾ 周红¹⁾

¹⁾ (西安石油大学理学院, 西安 710065)

²⁾ (西安交通大学电信学院, 西安 710049)

(2003 年 4 月 9 日收到, 2003 年 5 月 17 日收到修改稿)

从光纤光栅温度传感模型出发, 理论分析研究了光纤光栅的温度传感特性, 推导了光纤光栅温度传感的一阶、二阶和有效线性灵敏度系数的解析式, 计算了各灵敏度系数的理论值, 实验得到了反射波长与温度的二次多项式, 对比分析了理论与实验结果, 讨论了石英的力学参数对光纤光栅温度传感特性的影响、反射波长与温度的线性及非线性的适用范围等问题.

关键词: 光纤光栅, 光纤传感, 温度传感

PACC: 4281P

1. 引 言

自 1989 年 Morey 报道将光纤光栅用于传感以来^[1], 光纤光栅在传感领域的理论和应用研究引起了人们的极大兴趣^[2-7]. 光纤光栅是波长编码传感器, 与传统的“光强型”和“干涉型”光纤传感器相比^[8,9], 具有自身独特的优点, 与光源强度、光源起伏、光纤弯曲损耗、光纤连接损耗、光波偏振态无关, 因此它具有很强的抗干扰能力, 并且易于采用波分复用、时分复用和空间复用技术构成光纤光栅智能传感网络, 实现分布式多点实时在线传感, 广泛用于温度、应力、应变等物理量的测量^[10,11]. 温度传感是光纤光栅传感器最主要和最直接的应用之一, 因此研究温度与光纤光栅反射波长漂移量的关系对光纤光栅传感器具有重要的意义, 近年来对此做了大量研究工作^[12-15]. 温度影响光纤光栅反射波长是由热膨胀效应和热光效应引起的, 本文根据光纤光栅温度传感模型, 从理论上研究了反射波长与温度的关系, 得出了一阶和二阶光纤光栅温度灵敏度系数的解析式, 进而在实验的基础上, 得出了光纤光栅反射波长与温度的二次多项式, 对理论与实验结果进行了对比分析, 得到了满意的结果. 此结果对光纤光栅

温度传感机理的理论分析和应用研究具有一定意义.

2. 光纤光栅温度传感的理论分析

根据光纤布拉格光栅的耦合模理论, 均匀非闪耀光纤布拉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, 峰值反射布拉格波长 λ_B 为

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

式中 n_{eff} 为导模的有效折射率, Λ 为光栅周期.

引起 λ_B 漂移的有多种因素, 若只考虑温度 T 的影响, 则 $\lambda_B, n_{\text{eff}}, \Lambda$ 只是 T 的函数. 设初始时光栅所处的温度场温度为 T_0 , 将 $\lambda_B(T)$ 作泰勒展开, 保留到二次项, 则

$$\lambda_B(T) = \lambda_B(T_0) + \frac{d\lambda_B(T)}{dT} \cdot \Delta T + \frac{1}{2} \frac{d^2\lambda_B(T)}{dT^2} \cdot \Delta T^2, \quad (2)$$

式中 $\Delta T = T - T_0$. 由 (1) 式和 (2) 式得

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} &= \frac{\lambda_B(T) - \lambda_B(T_0)}{\lambda_B(T)} \\ &= \frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d\lambda_B}{dT} \cdot \Delta T + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d^2\lambda_B}{dT^2} \cdot \Delta T^2 \end{aligned}$$

^{*} 国家高技术研究发展计划“863”计划(批准号: 2002AA313150), 国家自然科学基金(批准号: 69877025), 国家教育部科学技术重点项目(批准号: 02190), 陕西省自然科学基金(批准号: 2000C34), 陕西省教育厅科学技术项目(批准号: 02JK158)和西安市科技攻关项目(批准号: GG200126)资助的课题.

$$\begin{aligned}
 &= \eta_{T1} \cdot \Delta T + \eta_{T2} \cdot \Delta T^2 \\
 &= (\eta_{T1} + \eta_{T2} \cdot \Delta T) \cdot \Delta T \\
 &= \eta_T \cdot \Delta T, \quad (3)
 \end{aligned}$$

式中

$$\eta_{T1} = \frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d\lambda_B}{dT}, \quad (4)$$

$$\eta_{T2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d^2\lambda_B}{dT^2}, \quad (5)$$

$$\eta_T = \eta_{T1} + \eta_{T2} \cdot \Delta T, \quad (6)$$

η_{T1} , η_{T2} 分别表示光纤光栅的一阶温度灵敏度系数和二阶温度灵敏度系数, η_T 表示有效线性温度灵敏度系数, 下面求它们的表达式.

对(1)式取自然对数并对 T 求导数, 得

$$\frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d\lambda_B}{dT} = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{d\Lambda}{dT}, \quad (7)$$

式中 $1/n_{\text{eff}} \cdot dn_{\text{eff}}/dT$ 代表光纤光栅的热光系数, 用 ξ 表示; $1/\Lambda \cdot d\Lambda/dT$ 代表光纤光栅的热膨胀系数, 用 α 表示. 因此(7)式可以写成

$$\frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d\lambda_B}{dT} = \xi + \alpha. \quad (8)$$

由(8)式得

$$\frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d^2\lambda_B}{dT^2} = \left[\frac{d\xi}{dT} + \frac{d\alpha}{dT} + (\xi + \alpha)^2 \right]. \quad (9)$$

由(4)(5)(6)(8)(9)式得

$$\eta_{T1} = \xi + \alpha, \quad (10)$$

$$\eta_{T2} = \frac{1}{2} \left[\frac{d\xi}{dT} + \frac{d\alpha}{dT} + (\xi + \alpha)^2 \right], \quad (11)$$

$$\eta_T = (\xi + \alpha) + \frac{1}{2} \left[\frac{d\xi}{dT} + \frac{d\alpha}{dT} + (\xi + \alpha)^2 \right] \cdot \Delta T. \quad (12)$$

在室温下, 熔融石英的热膨胀系数和热光系数分别为 $\alpha \approx 0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ^[16], $\xi \approx 8.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ^[17,18], 所以 η_{T1} 的理论值为

$$\eta_{T1} = 8.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \quad (13)$$

由于 α 比 ξ 小得多, 假定 α 保持不变^[14], 所以 η_{T2} 和 η_T 的理论值为

$$\eta_{T2} = \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{d\xi}{dT} + 3.9 \times 10^{-11} \right) / ^\circ\text{C}, \quad (14)$$

$$\eta_T = \left[8.8 \times 10^{-6} + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{d\xi}{dT} + 3.9 \times 10^{-11} \right) \cdot \Delta T \right] / ^\circ\text{C}. \quad (15)$$

3. 光纤光栅温度传感的实验研究

在 20°C — 260°C 范围内, 我们对光纤光栅反射

波波长的温度响应进行了测量, 实验中, 阈值取 10.0dB , 温度每变化 10°C 记录一个 λ_B , 基准温度 $T_0 = 20^\circ\text{C}$, 与其对应的基准反射波长 $\lambda_B(T_0) = 1552.13\text{nm}$, $\Delta T = T - T_0$, $\Delta\lambda_B = \lambda_B(T) - \lambda_B(T_0)$. 用掺铒光纤宽带光源(中心波长 $\lambda_{\text{SC}} = 1550\text{nm}$, 阈值 7.8dB 时带宽为 40nm)作入射光波, 用光谱仪(Anri-tru9710C, 分辨率为 0.05nm)测量反射波波长, 光纤光栅是用准分子激光器的紫外光在掺铒单模光纤上采用相位掩模板技术紫外侧写入的. 图 1 是反射波长相对漂移量 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与温度改变量 ΔT 的关系曲线, 其中点线为实验值, 光滑灰线为实验点线的二次式拟合曲线, 拟合曲线方程为

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} &= 6.045 \times 10^{-6} \cdot \Delta T + 10^{-8} \cdot (\Delta T)^2 \\
 &= (6.045 \times 10^{-6} + 10^{-8} \cdot \Delta T) \cdot \Delta T. \quad (16)
 \end{aligned}$$

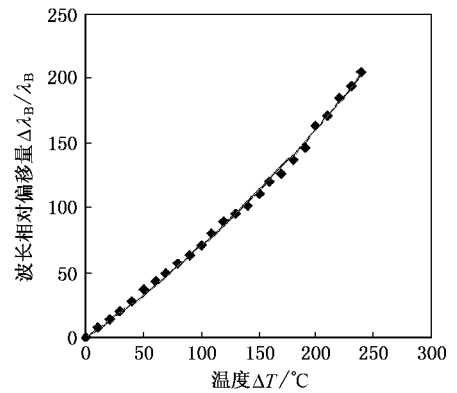


图 1 相对波长漂移与温度改变曲线

4. 理论与实验结果的对比分析

比较(3)式和(16)式, 可得 η_{T1} , η_{T2} , η_T 的实验值, 分别为

$$\eta_{T1}' = 6.045 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \quad (17)$$

$$\eta_{T2}' = 10^{-8}/^\circ\text{C} \quad (18)$$

$$\eta_T' = 6.045 \times 10^{-6} + 10^{-8} \cdot \Delta T \quad (19)$$

由(13)式和(17)式可知光纤光栅一阶温度灵敏度系数的理论值与实验值吻合得较好, 数量级相同, 但二者仍有一定的偏差, 这是因为理论值是用石英材料的力学参数计算得到的, 说明石英通过成纤、写入光栅等操作后原来的力学参数值发生了变化, 在用光纤光栅传感器精确测温中不能简单地用光纤的材料力学参数计算光纤光栅温度灵敏度系数, 而应该建立在实验的基础上.

取二阶灵敏度系数的实验值作为 η_{T2} 的真值,则由(14)式和(18)式得

$$\frac{d\xi}{dT} = 2 \times 10^{-8}. \quad (20)$$

对(20)式积分得

$$\frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} = 2 \times 10^{-8} T + A, \quad (21)$$

即

$$\frac{d(\ln n_{\text{eff}})}{dT} = 2 \times 10^{-8} T + A \quad (22)$$

积分得

$$n_{\text{eff}} = \exp(10^{-8} T^2 + AT + B), \quad (23)$$

式中 A, B 为积分常数,由初始条件确定,具体值有待进一步研究.(23)式即光纤光栅有效折射率与温度的关系式.

(15)式和(19)式表明:光纤光栅的有效线性温度灵敏度系数通常情况下并不是常数,在相对反射波长与温度改变量的二次多项式中, η_T 与 ΔT 呈线性关系,温度差 ΔT 在 100°C 以下时, ΔT 项与常数项差一到两个数量级,可把温差项对 η_T 的贡献看作是常数项的一个修正项,若温度差很小,可以忽略温差项对 η_T 的影响,这时 η_T 是一个常数,反射波长相对漂移量 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与温度差 ΔT 成正比关系,当温度差 ΔT 大于 100°C 时,温差项与常数项数量级相同,接近甚至大于常数项,这时温差项对 η_T 的影响就不能忽略,必须考虑温差项对 η_T 的影响, η_T 不是常数,

二次曲线能更好地表示 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与 ΔT 的关系.由此可见,在低温区,可以用正比关系描述 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与 ΔT 的关系,一旦到了高温区, $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与 ΔT 的关系就必须用(3)式和(16)式进行描述.

用不同光纤光栅分别作了多次实验,发现同一光栅实验结果具有良好的重复性,不同光栅的实验数据稍有不同,但 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与 ΔT 的非线性关系都存在,而且用 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与 ΔT 的二次多项式即能很好地描述二者的关系.

5. 结 论

本文对光纤光栅反射波长与温度的关系进行了理论研究,推导出了一阶、二阶和有效线性温度灵敏度系数的数学关系式,用熔融石英的力学参数计算得到了各个温度灵敏度系数的数值或表达式,进而实验得到了反射波长与温度的二次多项式,详细对比分析了理论和实验结果,对理论与实验结果产生偏差的原因进行了分析说明,讨论了反射波长与温度的线性和非线性关系的适用范围.研究结果表明:理论与实验研究结果吻合得比较好;石英的力学参数在经过成纤、写入光栅后发生了一定的变化,在光纤光栅传感器的精确测温中应通过实验定标;在低温条件下,反射波长与温度的线性关系比较好,在高温区和大范围测温中,反射波长与温度呈二次关系式.

- [1] Morey W W, Meltz G and Glenn W H 1989 *Proc. SPIE* **1169** 98
- [2] Shu X W, Huang D X, Deng G H, Shi W, Jiang S 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1731 (in Chinese) [舒学文、黄德修、邓桂华、施伟、江山 2000 物理学报 **49** 1731]
- [3] Kong M and Shi B R 2001 *Acta Photonica Sinica* **30** 188 (in Chinese) [孔梅、石邦任 2001 光子学报 **30** 188]
- [4] Liu Y Q, Liu Z G, Guo Z Y, Ge C F, Dong X Y, Zheng J C and Li J A 1998 *Acta Photonica Sinica* **27** 1111 (in Chinese) [刘云启、刘志国、郭转运、葛春风、董孝义、郑建成、李家安 1998 光子学报 **27** 1111]
- [5] Rao Y J 1999 *Opt. Las.* **31** 297
- [6] Spirin V V, Shlyagin M G and Miridonov S B 2000 *Opt. Lasers Eng.* **32** 497
- [7] Jiang D S and He W 2002 *J. of Optoelectronics · Laser* **13** 420 (in Chinese) [姜德生、何伟 2002 光电子·激光 **13** 420]
- [8] Sun J L 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2382 (in Chinese) [孙家林 2001 物理学报 **50** 2382]
- [9] Sun J L, Xu J H, Tian G Y, Guo J H, Zhao J and Xie A F 2001 *Chin Phys.* **10** 631
- [10] Bai-Ou G, Hwa-Yaw T and Xiao-Ming T 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 675
- [11] Aferreira L, Santos J L and Farahi F 2000 *Optic Engineering* **39** 2226
- [12] Guan O P, Guo Z Y, Liu Z G and Dong X Y 1999 *Acta Photonica Sinica* **28** 65 (in Chinese) [关柏鸥、郭转运、刘志国、董孝义 1999 光子学报 **28** 65]
- [13] Zhang Y, Liu Y Q, Liu Z G, Wang J, Zhao D H, Kai G Y and Dong X Y 1999 *Acta Photonica Sinica* **28** 979 (in Chinese) [张颖、刘云启、刘志国、王江、赵东晖、开桂云、董孝义 1999 光子学报 **28** 979]
- [14] Max B Reid and Meric Özcan 1998 *Opt. Eng.* **37** 237
- [15] Du Weichong, Tam H Y and Demokan M S 1997 *Chinese J. Lasers* **24** 75
- [16] Malitson I H 1965 *J. Opt. Soc. Amer.* **55** 1205

[17] Wemple S H 1973 *Phys. Rev. B* 7 3767[18] Takahashi S 1979 *J. Non-Crys. Solids* 30 359

Theory and experiment about in-fiber Bragg grating temperature sensing^{*}

Qiao Xue-Guang¹⁾ Jia Zhen-An¹⁾ Fu Hai-Wei^{1 2)} Li Ming¹⁾ Zhou Hong¹⁾¹ *School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China*² *School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*

(Received 9 April 2003 ; revised manuscript received 17 May 2003)

Abstract

A theoretical method of in-fiber Bragg grating temperature sensing has been proposed. Based on a temperature sensing model of in-fiber Bragg gratings, it was deduced that the analytical formulae of first-order and second-order and effective linear sensitivity coefficients of in-fiber Bragg grating temperature sensing. The theoretical values of each sensitivity coefficient was calculated. Conic multinomial has been obtained by experiment. The results of theory and experiment were compared and analyzed. Furthermore, the influence of quartzose mechanical parameters on temperature sensing characters of in-fiber Bragg gratings and the application range of linear and nonlinear relations of reflected wavelength versus temperature were also discussed.

Keywords : in-fiber Bragg gratings (FBG), optic fiber sensing, temperature sensing

PACC : 4281P

^{*} Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2002AA313150), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69877025), the Major Science and Technology Project of Ministry of State Education (Grant No. 02190), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province (Grant No. 2000C34), the Science and Technology Project of the Education Department of Shaanxi Province (Grant No. 02JK158) and the Science and Technology Project of Xi'an (Grant No. GG200126).