

· 光电器件与材料 ·

## FBG 温度灵敏度及增敏技术研究进展

李娜, 王国东, 王允建, 王素玲

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:**研究了光纤布拉格光栅(FBG)的温度传感机理及特征参数对温度灵敏度的影响. 针对国内外光纤光栅温度增敏研究的几大方向, 分别从光纤光栅的材料选择、写入方法、封装材料和封装工艺等方面, 进一步详细分析了光纤光栅温度传感器增敏技术的发展趋势.

**关键词:**光纤布拉格光栅(FBG); 温度灵敏度; 增敏技术; 封装工艺

**中图分类号:** TN253

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2010)06-0031-03

## Progress on Temperature Sensitivity and Techniques about Sensitivity Enhancing of Fiber Bragg Gratings

LI Na, WANG Guo-dong, WANG Yun-jian, WANG Su-ling

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** The sensing principle of fiber Bragg gratings (FBGs) and the effects of the features parameter on the temperature sensitivity were studied. Aiming at the several directions of researches on enhancing temperature sensitivity in the world, from the main aspects such as fiber materials choice, writing methods, packing materials and packing techniques, the developing trend of technique for enhancing temperature sensitivity of fiber Bragg gratings has been deeply analyzed.

**Key words:** fiber Bragg gratings; temperature sensitivity; techniques of enhancing sensitivity; packing techniques

光纤光栅作为光通信和光纤传感网络中的重要器件, 是近几年发展最为迅速的光纤无源器件. 利用其温度、应力敏感性制作的温度和应力传感器, 具有抗电磁干扰、尺寸小、质量轻、强度高、耐高温、耐腐蚀、易形变等优点, 受到了各国普遍重视. 随着光纤光栅制作工艺的不断成熟, 光纤光栅传感器的理论和应用研究取得了很大进展<sup>[1-5]</sup>.

温度变化是能直接引起 Bragg 反射波长漂移的主要物理量之一, 通过检测波长漂移量就可以获得环境温度的变化. 因此, 研究温度变化对波长漂移量的影响对光纤光栅传感器具有重要的意义. 文中分别从光纤光栅的材料选择、写入方法、封装材料与工

艺等方面, 详细分析了光纤光栅温度传感器增敏技术的发展趋势.

### 1 FBG 温度传感原理

由于光纤光栅的周期和折射率的扰动只对很窄的一小段光谱产生影响. 因此, 如果宽带光波在光栅中传播时, 入射光能在相应的频率上被反射回来, 其余的透射光谱则不受影响, 光纤光栅就起到反射镜的作用(如图 1 所示).

基于耦合模理论, FBG 的中心反射波长为

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

收稿日期: 2010-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(61040016); 河南省控制工程重点学科开放实验室开放基金(KG2009-16); 河南理工大学博士基金(648393)

作者简介: 李娜(1984-), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要从事光电子器件模拟方面的研究工作; 王国东, 博士, 副教授, 主要从事光电子器件模拟方面的研究.

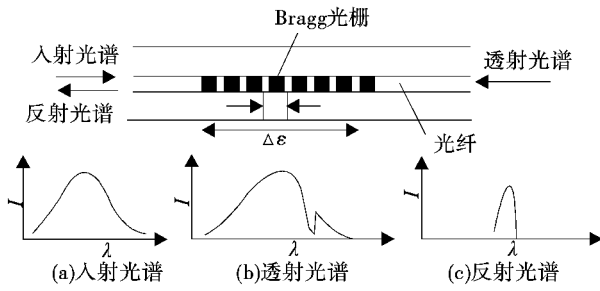


图1 光纤布拉格光栅反射光谱和透射光谱

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

由式(1)可知, 光纤光栅的反射波长是随纤芯有效折射率和光栅周期而变化的. 因此, 当外界温度发生变化时, 由于光栅的热膨胀和热光效应, 引起光纤光栅反射波长的漂移. 通过测量反射波长相对变化量  $\Delta\lambda_B$  的大小, 就可以确定外界温度或应力的变化大小. 为建立光纤光栅传感的理论模型, 可将式(1)进行泰勒展开<sup>[6]</sup>, 忽略高阶项及交叉项的影响, 有

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

$$2\left\{\left[\frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\Delta T + (\Delta n_{eff})_{ep} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial\alpha}\Delta\alpha\right]\Lambda + n_{eff}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\Delta T\right\} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left[\frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + \frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial(\Delta n_{eff})_{ep}}{\partial T} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial\alpha}\frac{\Delta\alpha}{\Delta T} + \frac{\Delta\alpha}{\Delta T} + \frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\right]\Delta T \quad (4)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left[\xi + \alpha + \frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial(\Delta n_{eff})_{ep}}{\partial T} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial\alpha}\frac{\Delta\alpha}{\Delta T}\right]\Delta T \quad (5)$$

其中,  $\xi = \frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial n_{eff}}{\partial T}$  是光纤光栅热光系数, 导致光栅折射率变化;  $\alpha = \frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}$  是光纤光栅的热膨胀系数, 导致光栅周期的变化。

令

$$K_T = \xi + \alpha + \frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial(\Delta n_{eff})_{ep}}{\partial T} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial\alpha}\frac{\Delta\alpha}{\Delta T} \quad (6)$$

$K_T$  是 FBG 的温度灵敏度系数, 反映了波长相对漂移量  $\Delta\lambda/\lambda_B$  与  $\Delta T$  之间的变化关系. 当材料确定后, 它基本上为与材料系数相关的常数.

把式(6)代入式(5), 式(5)转化为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_T\Delta T \quad (7)$$

因为弹光效应  $\frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial(\Delta n_{eff})_{ep}}{\partial T}$  和波导效应  $\frac{\partial n_{eff}}{\partial\alpha}$ .

$\frac{\Delta\alpha}{\Delta T}$  对 FBG 温度灵敏度系数的影响较热光系数和热膨胀系数小得多, 所以完全可以忽略其影响, 于是以上各式转化为

$$K_T = \xi + \alpha \quad (8)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\xi + \alpha)\Delta T \quad (9)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\right)\Delta T \quad (10)$$

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B\left(\frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\right)\Delta T \quad (11)$$

温度对 FBG 的影响主要有两方面: 一是热膨胀系数  $\alpha$  导致材料光栅周期的变化; 二是热光系数  $\xi$  导致折射率改变. 当温度变化很小时, 可以忽略温差对灵敏度的影响, 通常认为光纤热膨胀系数  $\alpha$  和热光系数  $\xi$  为常数, 但实际上, 热光系数  $\xi$  对温度存在着依赖性<sup>[6]</sup>.

## 2 FBG 温度增敏

从现有的光纤光栅温度增敏方法来看, 主要有 3 条途径: 改进光纤光栅制作材料; 探索新的光纤光栅写入方法; 采用特殊的封装技术.

### 2.1 光纤光栅制作材料

温度引起光纤折射率变化对耦合波长影响最大. 因此, 可通过选择适当的纤芯或包层掺杂材料和浓度, 或对光纤折射率进行适当设计, 来取得传感应用所需的较大波长温度系数或消除波长温度灵敏度. 当增加纤芯和包层的折射率之差时, 其谐振波长随温度变化的移动量将增大. 当改变纤芯的折射率, 也可以改变布拉格光栅峰值波长随温度变化的移动量. 所以, 光纤制作中, 在掺锗提高光敏性的同时, 会使光纤纤芯折射率提高, 增大了光纤的数值孔径, 使波导效应增加, 降低光纤光栅的灵敏度, 而在掺入硼后可降低折射率, 因此可采用硼、锗共掺, 在提高光敏性的同时, 还可以减小光纤的数值孔径, 提高光纤光栅温度灵敏度. 另外还可以通过改变光纤其他参数来提高光纤光栅的温度或应力响应灵敏度. 目前, 载氢<sup>[7]</sup>、高掺锗光纤<sup>[8]</sup>、硼锗共掺光纤和掺稀土光敏光纤及高压载氢等技术在国内外均有研究.

### 2.2 光纤光栅写入方法

光栅的写入方法很多, 包括横向干涉法、相位掩

模成栅技术、逐点写入法、相位掩模投影成栅法<sup>[9]</sup>等,但其实质都是改变了光纤的折射率的分布.由于光纤折射率变化的提高直接影响到FBG峰值反射波长的变化大小,基于逐点写入法对光纤纤芯折射率调制强的优点,可以推测这种方法在实现提高光纤光栅温度灵敏度方面有巨大的潜力,即实现增敏技术.

所谓逐点写入法就是指光束经过柱面镜聚焦成细长条后在光纤侧面上曝光,写入光栅条纹.当一个光栅条纹写入后,光纤必须以纳米级的精度移动一个光栅节距,因此是逐点写入光栅条纹.在控制光纤过程中,可以用激光脉冲一个个写入光栅条纹,实现规模化生产.这种方法的技术难度很大,对电机的精度和传动机构的精度要求很高.

另外,采用特殊的写入方法,适当改变光纤光栅的折射率分布,也可以取得传感应用所需要的较大的耦合波长温度系数.

### 2.3 封装增敏

由于裸光纤光栅的温度和应变灵敏度较低,因此封装除保护光栅外还要实现增敏以提高温度灵敏度.在光纤光栅传感器的设计与应用中,光纤光栅的封装和增敏是相辅相成的,往往一并考虑处理.

封装增敏主要是基于封装材料和封装工艺.

#### 2.3.1 封装材料

对温度传感器而言,增敏材料一般选用对温度有增敏作用的聚合物、金属、合金等作为基底材料.(1)选用热膨胀系数较大的特种聚合物材料对光栅进行嵌入方式封装,当外界温度改变时,聚合物膨胀而带动光栅产生栅距的变化,从而有效提高光纤光栅的温度灵敏度.如2004年,孙安等人又采用特殊耐高温有机聚合物对FBG进行温度增敏封装,通过改进FBG的聚合物封装固化工艺,温度在20~130℃时,温度响应灵敏度达到0.04 nm/℃,温度在130~180℃时,达到0.2 nm/℃<sup>[10]</sup>.何伟等利用有机聚合物封装FBG,在-80~0℃的低温范围内,将温度灵敏度提高了12.3倍<sup>[11]</sup>.(2)选用热膨胀系数较大的金属、合金材料进行封装,如铝片封装、铝合金箔片封装、合金钢封装等,实验测得的温度响应灵敏度都有所增加.2008年,Yage Zhana等人利用2个金属筒结构制备石英FBG传感结构,实现0~800℃的动态温度测量,分辨率为1℃<sup>[12]</sup>;刘春桐等用铝合金箔片封装光纤光栅,使得灵敏度提高由9.6

pm/℃上升到29.0 pm/℃,比未封装前提高了3.02倍<sup>[13]</sup>.图2所示是在基底材料表面粘贴光纤光栅温度传感器的增敏方案<sup>[14]</sup>.图2中的基底材料是某热膨胀系数较大的材料,裸光纤光栅两端用环氧胶固定在基底材料上,当温度变化时,通过基底材料的热膨胀来增大光纤光栅的温度灵敏度.

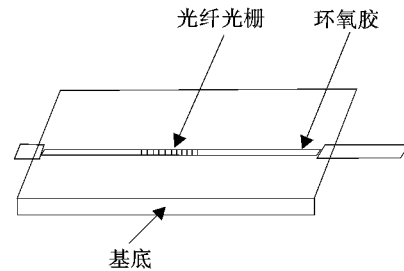


图2 基底材料增敏方法

#### 2.3.2 封装工艺

为满足实用化要求,在封装光纤光栅温度传感器的工艺上,一般会从与其他设备的连接、制作过程的难易、温度灵敏度系数以及传感性、实用性角度去考虑.封装工艺的目的是为了实现光纤光栅与传感机构的有效连接,提高测量的温度灵敏度,以及实现工程应用对FBG的现实要求,并尽可能的使封装结构简单、使用性能易于控制及易于加工生产等,以便其能迅速从实验室走向产业化.

## 3 结束语

文中从提高光纤光栅温度灵敏度入手,分析了光纤光栅的传感原理,从光栅的制作、光栅的封装等方面提出了增加灵敏度的方法.分析结果表明,通过改进光纤光栅制作材料和探索新的光纤光栅写入方法是对光纤光栅进行本征性增敏,因此能在有效增敏的同时不减小传感光栅的测量范围,但难度较大.寻求新的增敏材料和封装结构对光栅的增敏将作为今后研究的重点.

### 参考文献

- [1] Silva A F, Goncalves F, Ferreira L A, et al. Fiber bragg grating sensors integrated in polymeric foils[C]//Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2010 (636 - 637): 1548 - 1554.
- [2] Etezad M, Kahrizi M, Khorasani K. Analysis of temperature and strain changes profiles by using fiber Bragg grat-

(下转第45页)

当厚度为400、800和900 nm时,带隙的左、右边界有不同程度提升;当厚度为500、600和700 nm时,带隙左右边界基本不变,但带隙宽度有所展宽。

## 4 结 论

文中利用FDTD法设计了一个 $(AB)^MA$ 结构的一维ZnO光子晶体(A为TiO<sub>2</sub>,B为SiO<sub>2</sub>,M=8),并研究了光子晶体的结构参数对其缺陷态的影响。通过模拟计算和分析可得:通过改变光子晶体的结构参数,可在光子带隙中引入缺陷态。当第9层TiO<sub>2</sub>薄膜厚度变为原来的2倍时,在2980 nm处出现了一个很窄的缺陷峰。当第8、10层SiO<sub>2</sub>薄膜的厚度增加一倍时,光子带隙中出现了2个很窄的缺陷峰,且随着厚度变化的薄膜层由中间逐渐向外,两缺陷峰逐渐靠近,并在第4、14层SiO<sub>2</sub>薄膜的厚度增加一倍时合为一个较宽的缺陷峰。随着中心第9层TiO<sub>2</sub>薄膜厚度的不断增加,光子带隙中的缺陷峰逐渐向长波方向移动,光子带隙左侧震荡加剧,右侧边界更加平缓。

## 参考文献

- [1] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys. Rev. Lett, 1987, 58 (23): 2486 - 2489.
  - [2] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission solid - state physics and electronics [J]. Phys. Rev. Lett, 1987, 58 (20): 2059 - 2061.
  - [3] T F Krauss. Photonic crystals for integrated optics [C]// European Conference on Integrated Optics, EC102001. Paderborn, 2001.
  - [4] C N Francis, J Toulouse, T Hodson, et al. Optically tunable silicon photonic crystal microcavities [J]. opt. Express, 2006, 14(11): 4835 - 4841.
  - [5] 张友俊, 杨庆祥, 李英. 光子晶体的发展和应[用]. 上海大学学报, 2004, (10): 283 - 288.
  - [6] 邓开发, 是度芳, 蒋美萍, 等. 光子晶体的研究进展 [J]. 量子电子学报, 2004, 21: 555 - 564.
  - [7] 王长清, 祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分法 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1994.
  - [8] A Taflov, S C Hagness. Computational Electrodynamics: The Finite - Difference Time-Domain Method [M]. Boston: Artech House, 2000.
- 
- (上接第33页)
- ing sensors [C]// Fiber Optic Sensors and Applications II, 2010, 76770 (7677).
  - [3] Lin Yu-chi, Wang Wei. A novel fiber Bragg Grating sensor with temperature compensation [C]// 2009 Symposium on Photonics and Optoelectronics, 2009, 11 (34): 1726 - 1728.
  - [4] Li Bao-shu, Zhong Xiao-jiang, Tong Weiguo. Fiber bragg grating current sensor based on magnetostrictive effect [J]. Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 1(24): 95 - 100.
  - [5] Tosi Daniele, Olivero Massimo, Perrone Guido, et al. Simple fiber bragg grating sensing systems for structural health monitoring [C]// IEEE Computer Society, 2009: 80 - 86.
  - [6] 乔学光, 贾振安, 傅海威, 等. 光纤光栅温度传感器理论与实验 [J]. 物理学报, 2004, 53(2): 494 - 497.
  - [7] 孙明武, 陈国能, 戴康勤. 掺铒紫外光敏光纤制备及特性研究 [J]. 中国建材科技, 2000(1): 32 - 34.
  - [8] 江俊峰, 张以谟, 刘铁根, 等. 掺铒光纤的光敏机理及增敏方法的研究现状与发展 [J]. 光学技术, 2003, 29(3): 131 - 135.
  - [9] 赵勇. 光纤传感原理与应用技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 6 - 11.
  - [10] 孙安, 乔学光, 贾振安, 等. 大范围光纤布拉格光栅温度传感器增敏实验研究 [J]. 光学学报, 2004, 24(11): 1491 - 1493.
  - [11] 何伟, 徐先东, 姜德生. 聚合物封装的高灵敏度光纤光栅温度传感器及其低温特性 [J]. 光学学报, 2004, 10(24): 1316 - 1319.
  - [12] Yage Zhana, Hua Wua, et al. Fiber grating sensors for high - temperature measurement [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46: 349 - 354.
  - [13] 刘春桐, 李洪才. 铝合金箔片封装光纤光栅传感特性研究 [J]. 光电子·激光, 2008, 19(7): 905 - 908.
  - [14] 衣红钢, 巩宪锋, 王长松. 高灵敏度光纤光栅温度传感器的研究 [J]. 传感器与微系统, 2006, 25(8): 10 - 14.