

# The application of Fiber Bragg Grating sensor to high precision temperature measurement

LI KUO, ZHOU Zhen-an, LIU Ai-chun

(Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake administration, Beijing 100085, China)

**Abstract** Basing on the character that Fiber Bragg Grating (FBG) is sensitive to both temperature and strain, by using Al and Fe-Ni alloy's bimetal structure, we successfully design and manufacture a high accuracy FBG temperature sensor for earthquake premonition. Furthermore, we analyze the accuracy of the FBG sensors with enhanced sensitivity for the first time, and get its accuracy is up to  $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$  with highest resolution ever in all FBG temperature sensors ( $0.0014^{\circ}\text{C}/\mu\text{m}$ ). This work experimentally proves the feasibility of using FBG in the earthquake premonition monitoring, and builds the foundation for the application of optic technology in earthquake premonition monitoring.

**Keywords** sensor; Fiber Bragg Grating; high accuracy; ground temperature

## 基于光纤光栅的高精度测温传感器研究

李阔, 周振安, 刘爱春

(中国地震局地壳应力研究所, 北京, 100085)

**摘要:** 利用光纤光栅对温度和应变同时敏感的特性, 我们设计制作了一款满足地震前兆观测中地温观测精度要求的双金属光纤光栅温度传感器, 并首次对温度增敏后的光纤光栅传感器样品进行了精度分析, 得到该传感器的精度达到 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ , 获得了现今光纤光栅温度传感器最高的分辨率  $0.0014^{\circ}\text{C}/\mu\text{m}$ 。该传感器的成功研制从实验上证明了光纤光栅用于地震前兆观测的可行性, 为地震前兆观测的光学化打下了坚实的基础。

**关键词:** 传感器; 光纤光栅; 高精度; 地温

### 0 引言

地震预报是世界公认的科学难题, 而实现地震预报的基础又依赖于观测技术系统所获取得观测数据。温度测量在地学领域应用广泛<sup>[1-6]</sup>, 是地震前兆观测的主要手段之一。目前地震前兆观测所采用的电学量测量系统, 存在零点漂移不易消除, 模拟信号易受电磁环境干扰, 硬件系统比较脆弱等问题。这使得在对观测资料分析处理时, 难以区分地震前兆异常和环境干扰。因此, 寻找新的测量方法是有重大意义的。

光纤Bragg光栅 (FBG, Fiber Bragg Grating, 简称光纤光栅) 作为新型温度、应变传感器件, 具有不受电磁干扰, 寿命长, 可靠性好, 易于组网测量和信号传输距离远等诸多优点, 已广泛应用于石化、电力、水坝、桥梁和重要建筑的安全监测<sup>[7]</sup>。在高精度温度<sup>[8-9]</sup>、应变<sup>[10]</sup>测量等领域也不断有新成果出现。

鉴于光纤光栅的诸多优点, 为了更好的为地震预报服务, 我们尝试将光纤光栅传感器引入到地震前兆观测技术领域的地温测量中, 将电学量的测量问题转换为光学量的测量问题, 从而避开了电学量测量技术系统本身存在的零点漂移和电磁干扰等固有问题, 使原有地震前兆观测技术系统所追求的目标在这里得到较好的满足。但是, FBG固有的温度分辨率很低, 约 $0.1^{\circ}\text{C}/\mu\text{m}$ 。若将其应用于地温测量, 必需对其实施增敏, 提高其分辨率。

FBG温度传感器增敏的原理是利用FBG对温度和应变同时敏感的特性, 通过合理的结构设计, 把FBG和高热膨胀系数材料封装在一起, 当被测温度变化时, 通过高热膨胀系数材料的形变向FBG施加一个应变, 使得FBG的返回波长变化量加大。基于此原则的方法大体上分为两种:

(1) J.L. Cruz<sup>[8]</sup>等提出直接将FBG粘贴

在高热膨胀系数材料上，当温度升高时，高膨胀系数材料直接拉动FBG，使FBG的应变加大，返回中心波长的变化量增加。然而，这种增敏方式有明显的缺点：增敏效果受到材料的热膨胀系数制约，分辨率有限，很难达到地震前兆观测的精度要求，而且伴有啁啾的负面效应。

(2) Jaehoon Jung<sup>[9]</sup>等提出通过采用双金属结构的方法，实现温度增敏，效果明显。温度变化时，双金属结构把两种热膨胀系数不同的金属的长度变化量的差转化成FBG长度的变化量，从而提高FBG的温度灵敏度。可是，他们没有对该类型的FBG温度传感器的结构和精度作进一步研究，限制了它的应用范围。

在地震前兆的地温观测中，有高精度和高分辨率的特殊要求。而现在就我们所知的范围，尚没有人对高精度光纤光栅温度传感器进行实验研究。基于FBG温度传感器的双金属增敏方法，结合地震前兆地温传感器精度高、长期稳定等技术要求，我们设计并制作了一款能达到地温观测要求的高精度FBG温度传感器。我们采用了导热快、应变各向同性好的铝作为热敏元件，通过其和低热膨胀系数的铁镍合金组成双金属结构，把温度变化转化为FBG的应变变化，取得了很好的效果，精度达到 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ ，分辨率 $0.0014^\circ\text{C}/\mu\text{m}$ 。

### 1. FBG 高精度温度测量原理

光纤光栅反射回的窄带光的中心波长值（也叫Bragg波长）为：

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$$

上式中， $n_{\text{eff}}$ 为FBG的有效反射系数， $\Lambda$ 为FBG的相邻两个栅隔之间的几何距离。当温度变化时，引起返回波长变化量相对温度变化量的灵敏度为：

$$\Delta\lambda_B/\Delta T = [(1-P_e)\varepsilon + \zeta]\lambda_B \quad (1)$$

其中， $P_e$ 为FBG的有效弹光常数； $\varepsilon$ 为单位温度变化下FBG的应变； $\zeta$ 为FBG的热光系数。

双金属的温度增敏原理如图1所示。当温度变化时，材料A和材料B长度均变化，且A长度的变化量比B长度的变化量大得多，

A、B长度的变化量的差值直接传递给了FBG。当FBG的应变发生变化时，其返回波长会随之发生变化。FBG的应变越大，返回波长变化量也就越大。因此，可以通过调整A和B的长度和选用不同热膨胀系数的材料来控制FBG的应变，从而实现高分辨率和高精度的温度测量。在如图1所示的结构中，FBG的应变量为：

$$\varepsilon = [a_1 L_1 - a_2 (L_1 - L_3)]/L_3 \quad (2)$$

$L_1$ 为A去除焊接台后的长度； $L_3$ 为A、B组合后，缺口的长度，即FBG的长度； $a_1$ 为A的热膨胀系数； $a_2$ 为B的热膨胀系数。把(2)式代入(1)，得到光纤光栅的温度灵敏度系

$$\Delta\lambda_B/\Delta T = \{(1-P_e)[a_1 L_1 - a_2 (L_1 - L_3)]/L_3 + \zeta\}\lambda_B$$

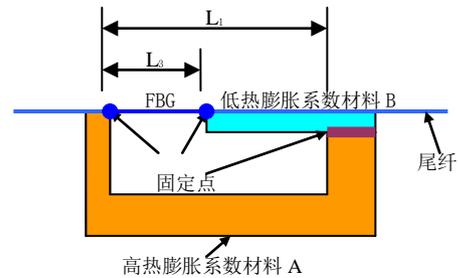


图1 高精度温度传感器的结构

Fig.1 High accuracy FBG sensor's structure

### 2. 实验与结果

实验中，制作的传感器起增敏效果的铝的长度 $L_1=49\text{cm}$ ，铁镍合金的长度 $L_2=47.5\text{cm}$ ，FBG长度 $L_3=L_1-L_2=1.5\text{cm}$ 。在 $20^\circ\text{C}-30^\circ\text{C}$ 间，铝的膨胀系数为 $22 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ <sup>[11]</sup>，铁镍合金热膨胀系数 $1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。因光栅的弹光系数受到其制作过程影响，实验所用光栅的弹光系数的实测值为0.32；实验中所用光栅波段为1550nm。代入数值得： $\Delta\lambda_B/\Delta T=734.4\text{pm}/^\circ\text{C}$ ，分辨率为： $\Delta T/\Delta\lambda_B=0.00136^\circ\text{C}/\text{pm}$ 。实际观测值为 $709.1\text{pm}/^\circ\text{C}$ ，分辨率： $0.00141^\circ\text{C}/\text{pm}$ 。FBG能承受的应变一般不超过 $4000\mu\varepsilon$ ，实验所使用光栅的应变灵敏度系数为 $1.05\text{pm}/\mu\varepsilon$ ，所以其波长对应变化量不超过 $4200\text{pm}$ 。为了保证FBG不被拉断，该地温传感器的量程为 $4200/709.1=5.92^\circ\text{C}$ 。因地温的年变量一般小于 $5^\circ\text{C}$ ，故增敏后光纤光

栅传感器的有限的量程在这里就足够了。实验系统示意图2。

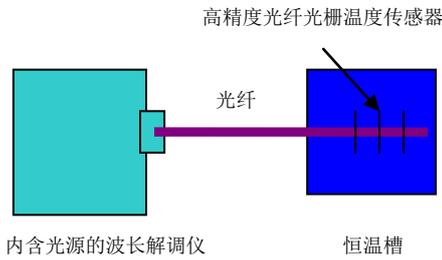


图2 高精度光纤光栅地温传感器实验系统

Fig.2 High accuracy FBG ground temperature sensor experiment system

在如图2所示的实验平台中，波长解调仪（内含ASE宽带光源）发出宽带光，经过传感器的尾纤入射到栅区。栅区反射回含有环境信息的特定波长光波到波长解调仪，波长解调仪可以解析出该波长。实验所使用的光谱波长解调仪分辨率1pm，精度优于±10pm（因为波长解调仪的最后一位读数不稳定，所以在实验中采用估值进位的方法进行读数），热电偶的精度为±0.01℃（上海华易电子），恒温槽的不均匀性小于0.01℃。实验时，先将恒温槽中加满水，然后把热电偶和高精度光纤光栅地温传感器放于恒温槽中的同一位置，故可忽略恒温槽的温度不均匀性。该传感器在室温20℃的环境下制作，在24℃左右时，增敏效果明显显现。我们在24℃-29℃的温度范围，对该传感器特性连续进行了反复升降温实验，得到如表1所示数据。

根据表中波长和温度的对应关系，可以得到图3所示的总体走势曲线和图4所示波长和温度的对应关系： $\text{波长} = 0.709064 \times \text{温度} + 1530.785344$ 。在此对应关系下，把该地温传感器的测量波长值转换为温度值，并与标准温度（热电偶温度）比较，得到相对误差的最大值为0.04℃。结合热电偶的精度，得到该传感器的精度达到±0.05℃，满足地震前兆观测的精度要求。

表1 反复升降温实验数据

Table 1 Data in repeating experiments

标准温度	波长值	波长对应温度	误差
29.0628	1551.39	29.0222	-0.0377
28.4945	1551.03	28.5145	0.0200
28.0110	1550.69	28.0350	0.0241
27.4357	1550.28	27.4568	0.0211
27.0179	1549.98	27.0337	0.0158
26.5105	1549.62	26.5260	0.0155
26.0189	1549.27	26.0324	0.0135
25.5085	1548.90	25.5107	0.0021
24.9870	1548.53	24.9889	0.0017
24.5334	1548.23	24.5658	0.0323
23.9581	1547.83	24.0017	0.0434
24.4776	1548.17	24.4812	-0.0007
24.9890	1548.55	25.0171	0.0280
25.4895	1548.91	25.5248	0.0352
26.0518	1549.27	26.0324	-0.0194
26.5314	1549.62	26.5260	-0.0054
27.0528	1550.00	27.0619	0.0091
27.5135	1550.33	27.5273	0.0139
28.0020	1550.67	28.0068	0.0048
28.5364	1551.05	28.5427	0.0064
29.0140	1551.39	29.0222	0.0083
28.0020	1550.68	28.0209	0.0190
27.0429	1549.96	27.0055	-0.0374
26.0548	1549.28	26.0465	-0.0083
25.1535	1548.62	25.1158	-0.0378
23.9910	1547.80	23.9594	-0.0318
24.0060	1547.82	23.9876	-0.0185
24.5374	1548.19	24.5094	-0.0281
25.0738	1548.57	25.0453	-0.0286
25.5573	1548.92	25.5389	-0.0185
25.9721	1549.22	25.9619	-0.0102
26.5115	1549.62	26.5260	0.0146
26.9432	1549.92	26.9491	0.0059
27.5374	1550.34	27.5414	0.0041
28.0080	1550.67	28.0068	-0.0011
28.5065	1551.01	28.4863	-0.0201
28.9731	1551.33	28.9375	-0.0354

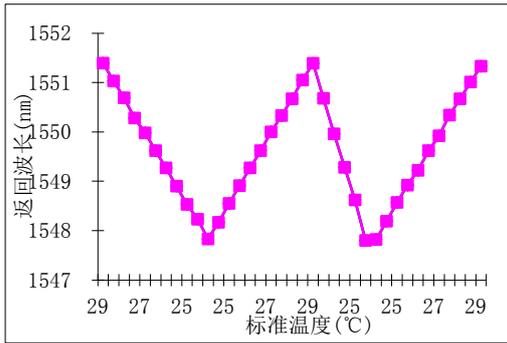


图3 地温传感器升降温波长变化曲线图

Fig.3 Reflected wavelength changing curve in 4 times of temperature increasing and decreasing

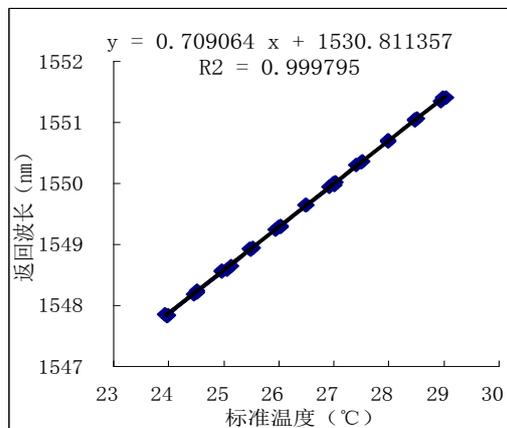


图4. 光纤光栅地温传感器返回波长和标准温度的关系

Fig.4 The relationship between FBG ground temperature sensor reflected wavelength and Standard temperature

### 3. 结论

我们通过研制一款能满足地温观测要求的精度和分辨率的光纤光栅地热传感器,首次将光纤光栅引入地震前兆观测领域。若在更高精度的标准温度和光谱解调仪的环境下进行标定,该传感器渴望能标出更高的精度。由于FBG的应变范围有限,当环境温度超过29°C时,该传感器在可能会因FBG被拉断而失效。这就对传感器的保存和运输提出了很高的要求。后期,我们将对传感器的结构、长期稳定性和现场安装作进一步研究,使其更适合地温观测。

### 参考文献 (References):

[1] 曲维政, 白燕, 黄菲, 赵进平, 王荣纯, 邓

声贵. 火山活动对热带高空温度变化的影响. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1308~1315 QU Wei-Zhen, BAI Yan, HUANG Fei, ZHAO Jin-Ping, WANG Rong-Chun, DENG Sheng-Gui. Effect of volcanic activity on the temperature in the tropical upper atmosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(5): 1308~1315

[2] 左建平, 谢和平, 周宏伟, 彭苏萍. 不同温度作用下砂岩热开裂的实验研究. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1150~1155. ZUO Jian-Ping, XIE He-Ping, ZHOU Hong-Wei, PENG Su-Ping. Experimental research on thermal cracking of sandstone under different temperature. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(4): 1150~1155.

[3] 魏荣强, 臧绍先. 岩石破裂强度的温度和应变率效应及其对岩石圈流变结构的影响. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1730~1737 WEI Rong-Qiang, ZANG Shao-Xian. Effects of temperature and strain rate on the fracture strength of rock and their influences on the rheological structure of the lithosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(6): 1730~1737

[4] 江灏, 程国栋, 王可丽. 青藏高原地表温度的比较分析. 地球物理学报, 2006, 49(2): 391~397 JIANG Hao, CHENG Guo-Dong, WANG Ke-Li. Analyzing and measuring the surface temperature of Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(2): 391~397

[5] 陈晓冬, 金旭, 管彦武等. 长春地区地表温度日变、年变对地温测量的影响[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(3): 1008~1011. CHEN Xiao-dong, JIN Xu, GUAN Yan-wu, etc. The influence of daily and annual variation of the surface temperature on near-surface temperature survey[J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2006, 21(3): 1008~1011.

[6] 杨冬红, 杨学祥, 刘财. 2004年12月26日印尼地震海啸与全球低温[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(3): 1023~1027. YANG Dong-hong, YANG Xue-xiang, LIU Cai. Global low temperature, earthquake and tsunami (Dec. 26,

- 2004) in Indonesia[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21 (3): 1023~1027.
- [7] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. Opt. Lett. 1989, 14: 823~825.
- [8] J.L. Cruz, L. Dong, and L. Reekie, Improved thermal sensitivity of fibre Bragg gratings using a polymer overlayer [J]. Electronics Letters, 1996, 32: 385~387.
- [9] Jaehoon Jung, Hui Nam, Byoung-ho Lee, Jae Oh Byun, and Nam Seong Kim, Fiber Bragg grating temperature sensor with controllable sensitivity [J]. Applied optics, 1999, 38: 2752~2755.
- [10] 周振安, 刘爱英. 光纤光栅传感器用于高精度应变测量研究[J]. 地球物理学进展, 2005, 20 (3) : 864~866.  
ZHOU Zhen-an, LIU Ai-ying. The application of Fiber Bragg Grating sensor to high precision strain measure[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005, 20 (3) : 864~866.
- [11] 《机械手册》, 成大先主编, 化学工业出版社, 卷1, 第1~11页  
《mechanism handbooks》, Daxian Chen editor in chief, Chemistry & Chemical-Industry Print, vol.1, pp.1~11.