

# 一种新颖的光纤光栅温度调谐装置的原理与实验研究\*

韩 群<sup>1)2)</sup> 吕可诚<sup>1)</sup> 李家方<sup>1)</sup> 李乙钢<sup>1)</sup> 陈胜平<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(南开大学物理学院,天津 300071)

<sup>2)</sup>(天津大学精密仪器与光电子工程学院,天津 300072)

(2003 年 6 月 4 日收到;2004 年 4 月 1 日收到修改稿)

提出了一种新颖的光纤光栅温度调谐方案,并将按此方案制作的调谐装置命名为双肩梁,详细分析了其原理.设计制作了一套双肩梁调谐装置,并对其进行了实验研究.实验中得到了 0.436 nm/ 的温度调谐效率,把所用光纤光栅的温度灵敏度提高了 50 倍之多.调谐具有很好的线性和可重复性.该装置最大的优点在于它突破了以往热调谐方法中驱动材料热膨胀系数的限制,使得温度调谐效率可以根据实际需要进行灵活设计,从而具有很大的灵活性.该装置在激光器调谐、高灵敏度温度传感以及传感解调等领域有着很大的潜在应用价值.

关键词: 光纤光栅, 调谐, 双肩梁, 温度调谐

PACC: 4280M, 4280C, 4281, 4280

## 1. 引 言

光纤光栅的发明是继掺铒光纤放大器之后光纤通信发展史上的又一个里程碑.由于它具有制作简单、体积小、成本低、插入损耗低、使用灵活以及易于与光纤系统集成等优点,在光纤通信<sup>[1-5]</sup>、传感<sup>[6-9]</sup>等领域获得了广泛的应用,并给这些领域带来了革命性的变化.尤其是在光纤通信系统中,光纤光栅在信道选择、放大器增益平坦、色散补偿等领域扮演着十分重要的角色,成为光纤通信系统中不可或缺的重要器件.

光纤光栅调谐技术是光纤光栅应用中的一项关键技术.在激光器调谐、重构 OADM、传感/解调等领域有重要的应用.光纤光栅的布拉格波长在温度或应力的作用下会发生变化,因此对光纤光栅的调谐可以通过各种方法来改变光栅的温度或对光栅施加应力来实现.目前已经发展了多种调谐方法.如机械拉伸<sup>[10]</sup>或压缩调谐<sup>[11]</sup>、悬臂梁调谐<sup>[12]</sup>、温度调谐<sup>[13,14]</sup>、压电陶瓷调谐<sup>[15,16]</sup>、磁致伸缩调谐<sup>[17]</sup>、电流调谐<sup>[18]</sup>等等.

上述各种方法除温度调谐外,要得到调谐参量与光纤光栅布拉格波长间一一对应的关系,必须在恒温条件下使用或者必须对外界温度变化进行补偿,这限制了它们在某些场合下的应用.另外,PZT 调谐和磁致伸缩调谐等方法中为了使调谐具有较好

的可重复性,还必须对压电效应和磁滞伸缩效应进行补偿,这不仅增加了调谐系统的复杂性也大大提高了成本.温度调谐由于调谐参量本身就是温度,只需对温度进行精确控制而无需额外的温度补偿措施,具有调谐装置简单、调谐的线性和重复性好、易于实现可编程自动调谐等优点.虽然调谐速度较慢,但在激光器调谐、传感等对速度要求不是十分苛刻的场合,仍能得到令人满意的应用.

由于光纤光栅本身的温度敏感性不高,一般的温度调谐都是将光纤光栅用热膨胀系数较大的材料来驱动.光栅布拉格波长随温度的相对变化的斜率除与自身的特性有关外,只与驱动材料的热膨胀系数有关,而与材料的尺寸无关,无论材料有多长,起作用的只有与光栅长度相等的一段.因此对于确定的材料,光纤光栅布拉格波长随温度变化的斜率是一个定值.这给实际应用带来了一定的限制.本文提出了一种有效的光纤光栅温度增敏方案,它克服了驱动材料热膨胀系数的限制,使得温度调谐效率可以根据实际需要进行灵活的设计.该装置在激光器调谐、超高灵敏度温度传感以及传感解调等领域有着很大的潜在应用价值.

## 2. 双肩梁光纤光栅温度调谐装置的原理

双肩梁调谐装置的原理如图 1 所示.图 1 中 A

\* 国家高技术研究发展计划(批准号:2003AA312100)和国家自然科学基金(批准号:60377010)资助的课题.

称为底梁,  $B_1, B_2$  称为臂. 底梁和臂由热膨胀系数不同的材料制成. 每条臂的一端如图所示分别牢固地粘贴到底梁的两端, 双臂之间留有一定长度的间隙. 使用时, 光纤光栅并不像一般方法中那样直接粘到驱动材料上, 而是像图中所示的那样只是把其两端的光纤分别粘到两边的臂上, 有光栅的部分悬在间隙之中. 这样当温度变化时, 由于底梁和双臂材料

的热膨胀系数不同, 整个装置的热胀冷缩都对光纤光栅起作用(而不是只与光栅长度等的部分起作用), 并可以通过改变底梁和双臂的长度来改变装置对光纤光栅的作用强度. 这就克服了材料本身热膨胀系数的限制, 使得光纤光栅布拉格波长随温度的变化斜率可以人为地设计, 从而为应用提供了极大的灵活性.

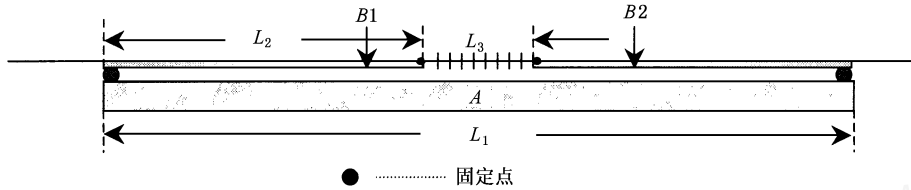


图1 双肩梁光纤光栅调谐装置原理示意图

设底梁的长度为  $L_1$ , 热膨胀系数为  $\alpha_1$ ; 双肩长度为  $L_2$ , 热膨胀系数  $\alpha_2$ ; 间隙的长度为  $L_3$ , 光纤热膨胀系数  $\alpha_s$ , 热光系数为  $\sigma_s$ . 使用时光纤光栅的两端分别牢固地粘贴到两边的臂上.

当温度升高  $T$  时, 梁材料、肩材料的热膨胀导致的光纤光栅长度的变化量

$$L_3 = \alpha_1 L_1 T - 2 \alpha_2 L_2 T, \quad (1)$$

光纤自身受热膨胀导致的长度变化量

$$L_3 = \alpha_s L_3 T. \quad (2)$$

所以, 温度升高  $T$  带来的光纤光栅轴向应变为

$$\begin{aligned} \epsilon_{ax} &= (L_3 - L_3) / L_3 \\ &= (\alpha_1 L_1 - 2 \alpha_2 L_2 - \alpha_s L_3) T / L_3. \end{aligned} \quad (3)$$

光纤光栅布拉格波长的相对变化与温度变化的关系为<sup>[19]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \lambda}{\lambda} &= (1 - P_e) \epsilon_{ax} + (\sigma_s + \alpha_s) T \\ &= \left[ (1 - P_e) \left( \frac{\alpha_1 L_1 - 2 \alpha_2 L_2}{L_3} - \alpha_s \right) + (\sigma_s + \alpha_s) \right] T. \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 式中等号右端第一项是装置热膨胀对光纤光栅施加应力所产生的效果, 第二项是光纤光栅本身热膨胀和热光效应产生的效果. 将光纤光栅用热膨胀系数为  $\alpha_d$  的材料来驱动时, 布拉格波长相对变化与温度变化的关系为

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = [(1 - P_e)(\alpha_d - \alpha_s) + (\sigma_s + \alpha_s)] T. \quad (5)$$

将(4), (5)两式相比较可知, 双肩梁的调谐效果相当

于用热膨胀系数

$$\alpha_d = \frac{\alpha_1 L_1 - 2 \alpha_2 L_2}{L_3} \quad (6)$$

的材料来驱动的情况. 不同的是材料确定(从而  $\alpha_1, \alpha_2$  一定)以后,  $\alpha_d$  的大小可以根据需要通过改变  $L_1, L_2$  ( $L_3 = L_1 - 2L_2$ ) 来调整. 所以该装置的温度敏感系数可以根据实际情况设计成所需要的值(甚至可以使  $\alpha_d < 0$  作温度补偿器使用), 因此具有很大的灵活性.  $\alpha_d$  称为双肩梁的等效热膨胀系数.

将  $L_3 = L_1 - 2L_2$  代入(6)式, 整理后可得

$$\alpha_d = (\alpha_1 - \alpha_2) L_1 / L_3 + \alpha_2. \quad (7)$$

从(7)式可以看出, 该装置对光纤光栅的调谐效率主要取决于底梁和双肩材料的热膨胀系数之差  $(\alpha_1 - \alpha_2)$  以及底梁与间隙的长度之比  $L_1 / L_3$ , 且与两者均成正比关系. 材料选定以后, 调谐效率主要取决于  $L_1 / L_3$ . 从(7)式右端第二项看, 好像  $\alpha_2$  越大调谐效率越高, 但由于第一项中  $\alpha_2$  的作用与此相反, 结合实际情况进行综合考虑, 如要得到尽量大的调谐效率, 则双肩应选用  $\alpha_2$  较小的材料.

### 3. 实验结果及讨论

我们用一种  $\alpha_2 = 1.67 \times 10^{-5} / K$  低膨胀的合金作为双肩材料,  $\alpha_1 = 8.54 \times 10^{-5} / K$  的有机材料作为底梁, 设计加工了一套双肩梁调谐装置, 并对其进行了实验研究. 底梁长度  $L_1 = 10$  cm, 间隙长度  $L_3 = 2$  cm, 理论计算的温度调谐效率为  $0.45$  nm/. 图2是实验得到的调谐曲线.

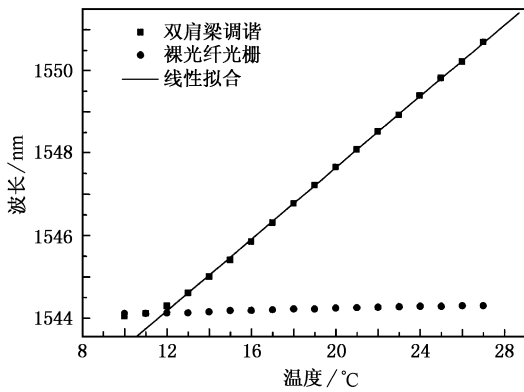


图2 双肩梁光纤光栅温度调谐装置的调谐特性曲线

光栅的布拉格波长为 1544.2 nm,在 10 °C 左右的环境下用环氧树脂将其牢固地粘贴到双肩梁上.从图 2 中可以看出,双肩梁装置大大提高了光纤光栅的温度调谐效率.双肩梁在 12 °C 左右开始驱动光纤布拉格光栅(FBG)(粘贴时手的温度的影响使得在 12 °C 左右 FBG 才被拉紧),此后光纤光栅的布拉格波长随温度升高线性地向长波方向移动.拟合直线的斜率为 0.436,是裸光纤光栅的 50 倍(实验所用裸光纤光栅的温度敏感系数的实验值为 0.0087 nm/°C),拟合度为 0.9999.在 15 °C 的温度范围内光纤光栅的布拉格波长移动了 6.4 nm.实验结果与理论符合得很好.调谐具有很好的重复性.

为了更好地理解双肩梁调谐装置的特性,结合以上实验作如下讨论.

1) 根据(7)式,等效热膨胀系数与底梁和双臂材料的折射率差  $(n_1 - n_2)$ 、底梁长度  $L_1$  成正比,与间隙的长度  $L_3$  成反比.当  $L_3$  从  $L_1$  逐渐减小时,等效热膨胀系数  $\alpha_d$  从  $\alpha_1$  趋于无穷大.图 3 是根据(7)式和实验材料的参数作出的双肩梁装置的调谐效率与  $L_3$  的长度的关系.从图 3 可以看出,通过调节  $L_3$  的长度可以在很大的范围内调节装置的温度调谐效率.由于  $L_3$  的长度不能小于光纤光栅的长度,否则会导致啁啾,因此短的光纤光栅具有更大的可获得调谐效率,甚至可以达到每摄氏度几个纳米,这正是高灵敏度温度传感等应用所梦寐以求的.

2) 实验中使用的光纤光栅是剥除涂覆层以后写制的,机械剥除带来的缺陷使其机械强度大大降低.实验中为了保证调谐的可靠性防止光纤光栅被拉断,调谐范围一般控制在 6 nm 左右.据文献报道<sup>[10]</sup>,经过特殊方法(如在线写入、透过涂覆层写入等等)制得

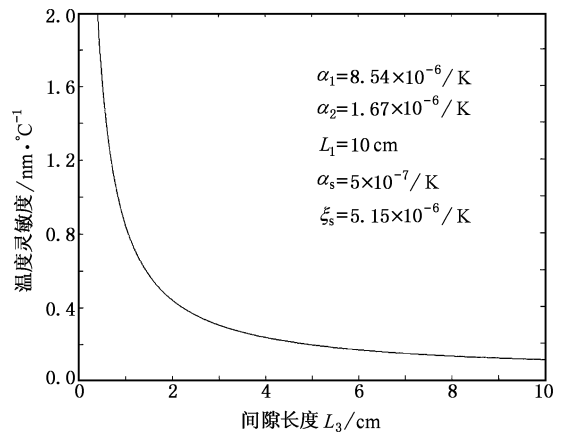


图3 双肩梁光纤光栅温度调谐装置的调谐效率与间隙长度  $L_3$  的关系

的光纤光栅的调谐范围可以达到 50 nm 以上.因此如果用机械强度好的光纤光栅,该器件可以获得更大范围的调谐.可应用于激光器调谐、高分辨率的温度传感等领域.

3) 双肩梁调谐装置的最大优点在于其灵活性,它突破了驱动材料热膨胀系数对温度调谐效率的限制.使得光纤光栅的布拉格波长随温度的变化斜率可以根据需要进行人为设计,这为调谐、温度传感等应用带来了极大的便利.

4) 胶贴强度对调谐的重复性至关重要.我们试用了 101,502,环氧树脂等多种粘胶,最终选择了在所需温度范围稳定性和强度较好的环氧树脂.为提高调谐的重复性,光纤光栅用环氧树脂粘贴好以后先经 24 h 紫外固化,然后再在合适的温度范围进行老化.

5) 目前该装置还只能实现单向拉伸调谐,即高于封装温度时光纤光栅布拉格波长才随温度向长波方向漂移.如果将光纤光栅部分放入精密的微型导轨<sup>[20]</sup>实现压缩调谐,使双肩梁可以实现拉伸和压缩双向调谐,有望获得更大的调谐范围.这方面的研究工作正在进行当中.

### 4. 总 结

本文提出了一种新颖灵活有效的光纤光栅温度调谐方法,详细分析了其原理.设计制作了一套调谐装置,并对其进行了实验研究.实验中得到了 0.436 nm/°C 的温度调谐效率,是所用裸光纤光栅的 50 倍之多,是我们所知目前报道的最大温度调谐效率.实验结果与理论相符合.调谐具有很好的线性和可重

复性. 双肩梁调谐装置的最大优点在于其灵活性, 它突破了传统热调谐方法中驱动材料热膨胀系数对调谐效率的限制, 使得光纤光栅布拉格波长对温度的

响应可以根据实际需要进行设计. 该装置在激光器调谐、超高灵敏度温度传感以及传感解调等领域有着很大的潜在应用价值.

- [1] Chen Y K, Hu C J, Lee C C *et al* 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 1394
- [2] Park H S, Yun S H, Hwang I K *et al* 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 460
- [3] Wu X P, Dong Y, Wang B *et al* 2000 *Journal of Optoelectronics Laser* **11** 248 (in Chinese) [吴小平、董毅、王波等 2001 光电子 激光 **11** 248]
- [4] Shu X W, Huang D X, Deng G H *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1731 (in Chinese) [舒学文、黄德修、邓桂华等 2000 物理学报 **49** 1731]
- [5] Pei L, Jian S S, Yan F P *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 615 (in Chinese) [裴丽、简水生、延凤平等 2003 物理学报 **52** 615]
- [6] Ho H L, Jin W, Chan C C *et al* 2002 *Sensors and Actuators A* **96** 21
- [7] Shu X W, Liu Y, Zhao D H *et al* 2002 *Opt. Lett.* **27** 701
- [8] Zhang X G 1998 *Opt. Sin.* **4** 70 (in Chinese) [张兴国 1998 光学技术 **4** 70]
- [9] Rao Y J, Wang Y P, Zhu T *et al* 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 72
- [10] Song Y W, Havstad S A, Starodubov D *et al* 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 1167
- [11] Ball G A, Mørey W W 1994 *Opt. Lett.* **19** 1979
- [12] Yu Y L, Geng S W 1999 *Acta Opt. Sin.* **19** 621 (in Chinese) [余有龙、耿淑伟 1999 光学学报 **19** 621]
- [13] Cruz J L, Dong L, Reekie L 1996 *Electron. Lett.* **32** 385
- [14] Wang J P, Dong Y, Cai W S *et al* 2001 *Opt. Commun.* **200** 153
- [15] Ball G A, Mørey W W 1992 *Opt. Lett.* **17** 420
- [16] Inui T, Komukai T, Nakazawa M 2001 *Opt. Commun.* **190** 1
- [17] Cruz J L, Diez A, Andres M V *et al* 1997 *Electron. Lett.* **33** 235
- [18] Yang S Q, Meng H Y, Dong X Y *et al* 2001 *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* **4595** 196
- [19] Liu Y Q, Guo Z Y, Liu Z G *et al* 1999 *Journal of Optoelectronics Laser* **10** 179 (in Chinese) [刘云启、郭转运、刘志国等 1999 光电子 激光 **10** 179]
- [20] Zhao L, Cai H W, Li L *et al* 2002 *Chin. J. Lasers* **29** 313 (in Chinese) [赵岭、蔡海文、李琳等 2002 中国激光 **29** 313]

## Research on a novel fiber Bragg grating thermal tuning scheme \*

Han Qun<sup>1)2)</sup> Lü Ke-Cheng<sup>1)</sup> Li Jia-Fang<sup>1)</sup> Li Yi-Gang<sup>1)</sup> Chen Sheng-Ping<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

<sup>2)</sup> (College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 4 June 2003; revised manuscript received 1 April 2004)

### Abstract

A novel fiber Bragg grating thermal tuning scheme is proposed, theoretically analyzed and experimentally studied. The device made from this scheme is named double-shoulder beam (DSB). Experimental results demonstrate that DSB is an effective thermal tuning technique. A thermal sensitivity of 0.436 nm/°C, 50 times that of the bare fiber grating, is experimentally achieved. To our knowledge, this is the largest thermal sensitivity ever demonstrated. The repeatability and linearity of the technique is very well. The most important advantage of DSB, as a breakthrough to conventional thermal tuning technique, is its great flexibility. It makes the thermal-tuning efficiency of fiber grating no longer limited by the thermal-expansion coefficient of the drive materials, but can be designed according to practical requirements. This technique is expected to have a vast application in fields such as laser tuning, high sensitivity temperature sensing, sensor demultiplexing and so forth.

**Keywords:** fiber grating, tuning, double-shoulder beam, thermal tuning

**PACC:** 4280M, 4280C, 4281, 4280

\* Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2003AA312100) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60377010).