

文章编号: 0258-7025(2003)08-0735-04

金属化光纤光栅的温度调谐

耿健新, 李琳, 赵岭, 陈刚, 沈能宇, 李爱莲, 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 报道了对光纤光栅进行金属化, 利用金属层的电热效应对光纤光栅进行温度调谐的方法。这种调谐方法具有结构简单、使用方便、体积小、调谐速度快、易于与电子线路集成等优点。当调谐电流从 0 mA 增加到 180 mA 时, 光纤光栅的布拉格波长从 1553.14 nm 增加到了 1555.48 nm, 移动了 2.34 nm。调谐上升时间约为 20 ms。对实验结果作了分析讨论。

关键词 光电子学; 光纤光栅; 金属化; 温度调谐

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Temperature Tunability of Metallized Fiber Bragg Gratings

GENG Jian-xin, LI Lin, ZHAO Ling,

CHEN Gang, SHEN Neng-yu, LI Ai-lian, FANG Zu-jie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A new method of tuning fiber Bragg gratings(FBGs) is described, in which FBGs were metallized and the electric thermal effect of the metal film was used to tune the FBGs by temperature. The method has advantages of simplicity, easy to use, small size, high tuning speed and easy to be integrated with circuits. When the applied current increased from 0 mA to 180 mA, the Bragg wavelength of the fiber grating increased from 1553.14 nm to 1555.48 nm with tuning range of 2.34 nm. The rise time of tuning was measured to be around 20 ms. Some experimental results are discussed in the paper.

Key words optoelectronics; fiber Bragg grating; metallization; temperature-tuning

1 引言

光纤光栅是应用广泛、大有发展前途的光纤无源器件之一。光纤光栅的可调谐特性更是其最具吸引力的优点,因而得到了广泛的关注和迅速的发展。光纤光栅的调谐在通信领域和传感领域有着非常重要的应用。在光纤通信方面^[1~3],随着 DWDM 技术的广泛应用,有源器件和无源器件的波长精确控制,波长信道的可转换性和可配置性,成为一个关键技术。在光纤光栅外腔半导体激光器、光纤激光器、光分插复用器、光纤色散补偿器、全光波长转换器等方面,光纤光栅的调谐都发挥了重要的作用。在传感领域,光纤光栅的调谐也有着非常广泛的应用^[4],

利用光纤光栅可制成用于检测应力、应变、温度等参量的光纤传感器和各种光纤传感网。光纤光栅调谐的方法一般有:应力调谐和温度调谐二种。应力调谐需要较为精密、复杂的机械装置^[5~7]。而温度调谐则利用了光纤光栅的布拉格波长对环境温度敏感的特点,不需要附加特别的机械装置,便可以对光纤光栅进行有效的调谐;受光纤光栅本身的限制,温度调谐也有其明显的缺点:调谐范围不可能太大(温度一般不超过 200℃);通常的调温方法,升降温的速度也不够快。

为了提高温度调谐的速度,改善对光纤光栅加热的效率,本文采用对光纤光栅进行金属化,利用金

收稿日期: 2002-04-09; **收到修改稿日期:** 2002-06-03

基金项目: 上海市科学技术发展基金(00JC14027)资助项目。

作者简介: 耿健新(1967—),男,中国科学院上海光学精密机械研究所高工,主要从事半导体光电子器件和光通信器件的研究工作。E-mail: zifang@online.sh.cn

属层的电热效应直接对光纤光栅加热的方法。实验结果表明,这一调谐方法具有体积小、热效率和调谐速度相对于其他温度调谐方法高、可以与电子控制线路集成、使用方便、重复性良好的优点。

2 器件设计和实验方法

2.1 金属化光纤光栅的温度调谐效应

由于光纤材料(石英)的热胀冷缩效应和材料折射率的热光效应,光纤光栅 Bragg 波长是温度的一个函数,可以近似认为是一个线性函数,它可以表示为

$$\Delta\lambda_T = k_T \Delta T \quad (1)$$

式中 $k_T = \partial\lambda/\partial T$ 为光纤光栅峰值波长的温度系数。实际测试结果表明,对于本文所用的普通光纤写入的光栅,为 $0.014 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

光纤光栅的温度调谐,一般采用一个独立的加热带,光纤光栅粘贴在上面。加热体的热容量往往比光纤本身的热容量大得多。光纤与加热带之间也不能完全紧贴,因此热效率很低,导热速度很慢。如果直接在光纤光栅的表面上采用一定的电热材料做金属化,直接加电流发热,热源离纤芯最近,导热很快,热效率和响应速度就可以大大提高。设所镀金属的电阻率为 ρ , 光纤外径为 r , 金属化层的厚度为 h , 长度为 l , 则这一中空圆柱性加热体的电阻为

$$R = \rho l / \pi h (2r + h) \quad (2)$$

在该电阻上施加电流产生的热量,一方面向内传导,使光纤升温;另一方面向外辐射和传导。假设光纤的单位体积比热为 C_1 , 金属化层材料的单位体积比热为 C_2 , 加热材料外表面的有效散热系数为 s , 由热平衡条件可知

$$\begin{aligned} P = I^2 R = \\ \pi [r^2 C_1 + (2r + h)hC_2] l \Delta T + 2\pi(r + h)ls \Delta T \\ \Delta T = \\ \frac{\rho I^2}{\pi^2 h (2r + h) [r^2 C_1 + h(2r + h)C_2 + 2(r + h)s]} \approx \\ \frac{\rho I^2}{2\pi^2 h r^2 [rC_1 + 2hC_2 + 2s]} \quad (3) \end{aligned}$$

(3) 式后一个等式是在 $h \ll r$ 情况下的近似。由此可见,波长变化正比于电流的平方;提高金属化层的电阻率,减小金属化层的厚度,将有利于提高调谐的热效率。

由于光纤和金属化微加热器的体积重量很小,总的热容量很小,因此温度的变化速度很快。根据热量的传导定律,传导的热量正比于温度梯度: $\vec{Q} = -$

$\kappa \nabla T$ 。式中 κ 为材料的热导率。本文将加热带直接制作在光纤表面上,离纤芯的距离只有 $60 \mu\text{m}$ 。因此可以获得很快的热传导。总热容量小也有利于温度调谐的速率。近似地,温度上升和下降的时间变化规律可以用下面的公式来描述

$$\text{上升: } T = T_0 + \frac{P}{\sigma C} [1 - \exp(-\sigma t)] \quad (4)$$

$$\text{下降: } T = T_0 + \Delta T \exp(-\sigma t) \quad (5)$$

式中 P 为所加的功率, C 为热容量, σ 为表征热量耗散的参数

$$\sigma = 2s(r + h) / [r^2 C_1 + (2r + h)hC_2] \approx 2s / (rC_1 + 2hC_2) \quad (6)$$

可见热容量直接决定了升降温的速率,小的热容量保证了快的调温速度。

在金属化光纤中,光纤的热膨胀系数和金属材料的热膨胀系数有很大的差异。石英玻璃的热膨胀系数很小,仅为 $3.5 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。而金属材料的热膨胀系数大致在 $10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。以镍为例,其热膨胀系数为 $1.26 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 要比石英高 30 多倍。因此除了光纤的温度调谐之外,还存在应力导致的应变调谐。金属层热应力既发生在光纤的横截面上,也发生在轴向。由于通常金属化层很薄,一般仅数个微米,产生的横向应力比较小。在沿着光纤的方向,金属化区域的长度比光纤的直径大得多,因此积累的应力也比较大,可能对光纤光栅的传输特性带来一定影响。

2.2 实验方法和金属化工艺

实验所用光纤光栅是用相位掩模板和 193 nm 准分子激光器辐照法制作的光纤光栅。实现光纤光栅金属化的方法与普通光纤金属化方法基本一样。基本工艺技术有镀膜法、化学淀积法、化学淀积加电镀法、镀膜加电镀法等。实验中,具体的工艺步骤大致为:

表面毛化 → 表面活化、敏化 → 蒸发或沉积 → 化学淀积或电镀 → 引线焊接 → 封装。

图 1(a) 为金属化光纤光栅示意图。采用 Ti, Pt, Au 等金属作为内表层,金属 Ni 作为外表层,既提高了光纤与金属层间的强度,在使用焊料焊接时又很方便,取得了令人满意的结果。其中金属薄膜蒸镀的均匀性问题是蒸镀时必须解决的问题,否则在通电时由于加热不均匀可能会引起光纤光栅的“啾啾”,导致其光谱曲线的线宽增大。图 1(b) 为金属化光纤横截面的显微照片。金属薄膜的厚度约为 $2 \mu\text{m}$ 。

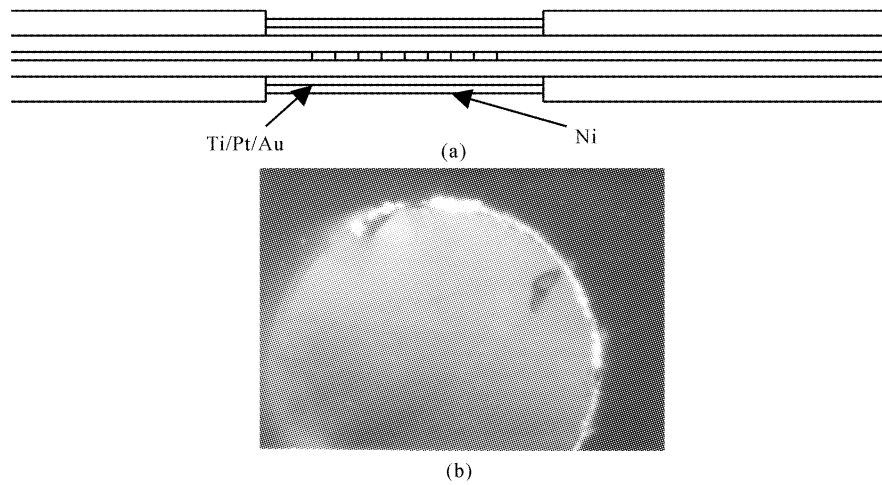


图 1 (a) 光纤光栅金属化示意图; (b) 金属化光纤的横截面照片

Fig. 1 (a) A schematic diagram of metallized fiber grating; (b) A cross section photo of a metallized fiber

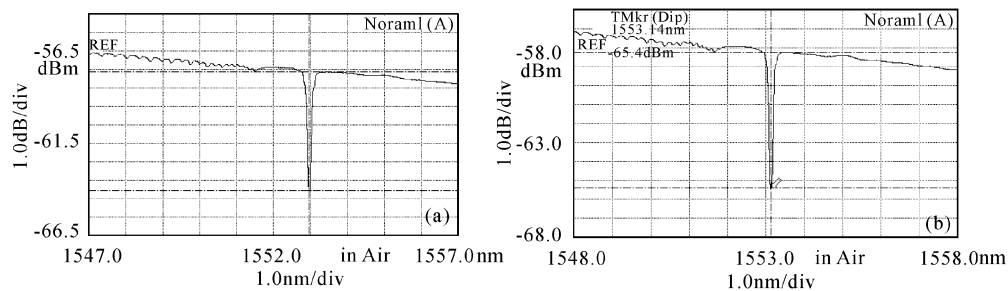


图 2 光纤光栅金属化前(a)和后(b)的透射光谱

Fig. 2 Transmission spectrum of an FBG before (a) and after (b) metallization

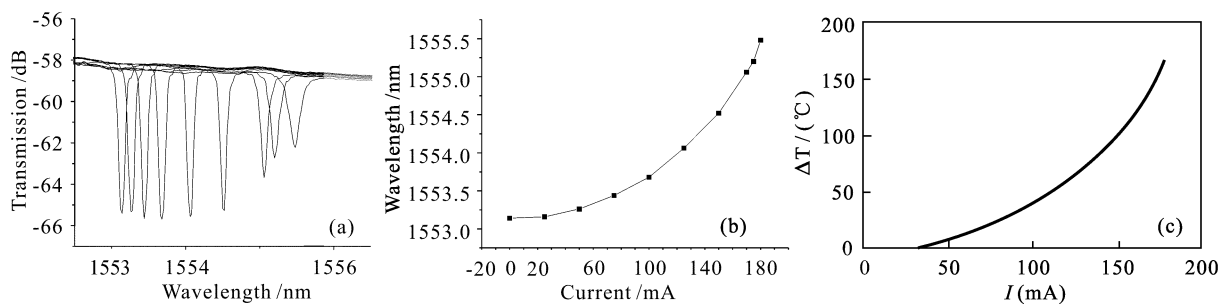


图 3 不同加热电流下光纤光栅的透射谱(a), 光纤光栅的布拉格波长(b)和温度(c)随电流变化的曲线

Fig. 3 Transmission spectra of an FBG under different heating current(a), the FBG Bragg wavelength (b) and temperature (c) changes with the current

3 温度调谐实验结果

实验所采用的光纤光栅的初始布拉格波长为 1553.14 nm, 线宽为 0.12 nm, 光栅长度为 1 cm。金属化光纤的长度为 4.5 cm, 光栅区位于金属薄膜的中央。从金属化光纤两端引电极, 阻值为 6.5 Ω 。用分辨率为 0.07 nm 的 Anritsu Ms2710-B 光谱分析仪测量了光纤光栅的透射光谱。图 2(a)和(b)为

光纤光栅金属化前后的透射光谱, 可以看出金属化前后光纤光栅的透射谱没有明显变化。

图 3(a)是金属化光纤光栅施加不同电流情况下的透射光谱。图 3(b)是峰值波长随加热电流变化的曲线。可以看到, 随着电流的不断增大, 光纤光栅的布拉格波长向长波方向移动。其变化量基本上正比于电流的平方。当电流从 0 增加到 180 mA 时, 峰值波长从 1553.14 nm 增加到 1555.48 nm, 调

谐幅度为 2.34 nm。由图 3 还可以看出,在电流调谐过程中,光纤光栅的线宽也相应改变,从 0.12 nm 增大到 0.32 nm。峰高从 7.16 dB 下降到 3.36 dB。光纤光栅透射光谱线型的变化,可能是本文上一节所讨论的应变所致,也可能有光纤轴向温度不均匀

分布的因素。根据光纤光栅峰值波长随温度变化的特性,可以从图 3(b)的数据计算出光纤内部温度随电流变化的情况。图 3(c)为金属化光纤温度随电流变化的曲线,可见最高温度达到 150℃ 以上。

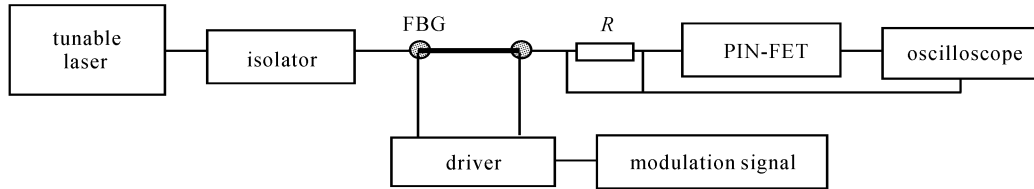


图 4 调谐速率测试装置

Fig. 4 A set-up for tuning speed measurement

光纤金属化微加热器的一个优点是具有比其他加热方式更快的调谐速率。本文采用图 4 所示的测量装置,对调谐速率进行了实验研究。所用的激光器输出波长为 1550.100 nm;输出功率为 0.5 mW;用作电流监控的取样电阻 R 为 4.7 Ω 。一个典型测试结果见图 5。其中所施加的电流波形为一个锯齿波,幅度为 95 mA,上升时间为 7 ms。可以看到升温调谐的响应时间大致在 20 ms 左右。假如这一调谐机构用于光通信系统的信道切换,这一时间响应已经具有实用的可能性。正如本文上节所分析,降温时间取决于散热的快慢,往往比较长。本文的测试表明,大致在 150~200 ms 量级。为了加快降温调谐的速度,就有必要同时采用半导体致冷技术。

精确的控制,取得了较好的调谐效果。当调谐电流从 0 mA 增加到 180 mA 时,光纤光栅的布拉格波长从 1553.14 nm 增加到了 1555.48 nm,移动了 2.34 nm。当环境温度保持不变时,具有较好的重复性。调谐的上升时间的典型数值为 20 ms。这一调谐方法在通信领域和传感领域将有应用前景。

致谢 感谢于阿滨、封伟中等同事所提供的工艺技术支持;感谢陈高庭、瞿荣辉和蔡海文等先生,他们对本文工作提出了有益的建议。

参 考 文 献

- 1 Benjamin J. Eggleton, John A. Rogers, Paul S. Westbrook *et al.*. Electrically tunable power efficient dispersion compensating fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(7):854~856
- 2 G. A. Ball, W. W. Morey. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(6):420~422
- 3 F. Bilodeau, D. C. Johnson, S. Theriault *et al.*. An all-fiber dense-wavelength-division multiplexer/demultiplexer using photoimprinted Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **7**(4):388~390
- 4 Alan D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Partrick *et al.*. Fiber grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1442~1463
- 5 Tetsuro Komukai, Yoshiaki Miyajima, Masataka Nakazawa. In-line fiber grating-type optical bandpass filter tuned by applying lateral stress [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1995, **34**(Part 2, No. 3A):L306~L308
- 6 Yu Youlong, Liu Zhiguo, Dong Xiaoyi *et al.*. Linear tuning of fiber grating based on a cantilever [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(5):621~625 (in Chinese)
- 7 Liu Zhiguo, Zhang Yibing, Kai Guiyun *et al.*. A new method for fiber-grating linear tuning [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(12):1731~1734 (in Chinese)

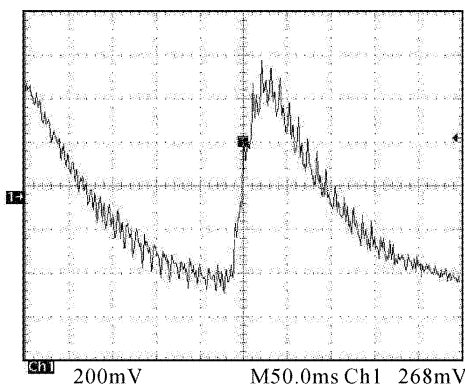


图 5 示波器测得的调谐响应时间波形

Fig. 5 Waveform of tuning response on the oscilloscope

4 结 论

本文报道了对光纤光栅进行金属化,利用金属层的电热效应对光纤光栅进行温度调谐的方法。利用这种方法可以对光纤光栅的布拉格波长进行较为