

文章编号: 0258-702X(2002)04-0313-04

# 光纤光栅电磁调谐技术的研究

赵 岭, 蔡海文, 李 琳, 夏江珍, 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 提出了一种实用可行的控制光纤光栅波长的电磁调谐技术。实验表明, 此调谐方法在 300 mA 电流下可达到 1.38 nm 的调谐范围, 且具有较好的恢复性。可以应用于可动态配置全光分/插复用器(OADM)系统中, 也可用来对光纤光栅外腔激光器进行调谐和波长锁定, 并可用于波长调制型传感器。

**关键词** 光纤光栅, 电磁调谐, 应力

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

## A Tuning Scheme for Fiber Bragg Grating by Electromagnetic Force

ZHAO Ling, CAI Hai-wen, LI Lin, XIA Jiang-zhen, FANG Zu-jie

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

**Abstract** A practical and feasible tuning scheme for fiber Bragg grating by electromagnetic force is reported. In the experiment, a tuning range of 1.38 nm was obtained under 300 mA current. The restoration of tuning is quite good. The tuning scheme can be used in re-configurable optical add/drop multiplexer (ROADM), external-cavity fiber lasers, and fiber sensors based on wavelength modulation.

**Key words** fiber Bragg grating, tuning scheme by electromagnetic force, strain

## 1 引言

自从 K. O. Hill 发现了光纤的光敏性, Meltz 等发展了侧面写入光折变光纤光栅技术之后, 光纤光栅以其与光纤天然兼容的优势, 充分发挥对光波的选择特性, 加上光纤光栅插入损耗小、体积小、可靠性高, 在光纤通信、光纤传感等领域得到了广泛的应用。已经开发出多种性能优良的光纤光栅器件, 用于 WDM 光网络中的全光分/插复用器(OADM)、激光光源的波长锁定器、光纤激光器的选频器、色散补偿器等, 并为实现光纤一维光子集成提供了必要的条件。

在全光网中, 为了增加网络扩容的灵活性和路由选择的灵活性, 必须采用动态可配置分插复用器(R-OADM)和波分复用器(R-DWDM)。光纤光栅的可调谐特性, 使其成为实现 R-OADM 的最佳选择。

光纤光栅作为激光器的选频器件和波长锁定器件时, 为了获得准确的波长定位, 也需要对光纤光栅进行调谐和控制。在波长调制型传感器方面, 光纤光栅的可调谐特性也十分有用。所以光纤光栅的调谐技术是一个深受关注的研究热点之一。

对光纤光栅波长的调谐有多种方法, 如用压电陶瓷(PZT)使光纤光栅发生应变, 热调谐, 对光纤加侧应力进行调谐, 基于悬臂梁的光纤光栅线性调谐。用压电陶瓷调谐最早出现在单模掺铒光纤激光器的波长调谐中。据文献[1]报道, PZT 形变量达到  $90\mu\text{m}$  时, 波长调谐范围达到 0.72 nm。文献[2]是利用光纤光栅的布喇格波长对温度的敏感性, 通过控制外界环境的温度而对光纤光栅进行温度调谐。文献[3]报道了对光纤加侧应力进行调谐的方法, 此方法加大了调谐范围。与文献[3]中简支梁调谐技术不同, 文献[4]提出了悬臂梁调谐技术, 利用附着其

收稿日期 2001-01-10; 收到修改稿日期 2001-04-09

基金项目: 上海市科委科技发展基金项目(97JC14023)。

作者简介: 赵岭(1974—), 女, 中国科学院上海光学精密机械研究所在读博士, 研究方向为光通信器件和技术, 主要从事基于光纤光栅的光通信器件的研究。E-mail: lingzhaok@263.net

表面的光纤光栅的应变与自由端外力大小成线性关系,实现其反射谱中心波长的线性调谐,且调谐范围增大。调谐过程中全部光栅的布喇格反射波长发生了变化,从而使光纤光栅的峰值波长变化,同时不同光栅间变化程度不同,造成带宽增加,出现啁啾现象。在 OADM 系统中,光纤光栅反射谱的带宽增加会引起信道间的串扰,使传输信号失真。文献[3,4]的方法采用外加机械力,调谐速度慢,不能满足实际应用的要求。

本文提出了一种新型的电磁调谐技术,采用一种导轨实现了对光纤光栅的压应变调谐。对有关的调谐机理、特性进行了理论分析,并给出了实验结果。

## 2 理论分析

光纤光栅是用商用掺铒光纤经载氢增敏处理后,用紫外激光相位掩模法制成的。纤芯中折射率的周期性变化产生 Bragg 衍射,使光纤光栅具有良好的波长选择性。根据 Bragg 衍射条件,光纤光栅反射谱的峰值波长为

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

式中  $n_{\text{eff}}$  为光纤的有效折射率,  $\Lambda$  为光栅的周期。温度和应力的变化会使光纤的有效折射率和光栅的周期变化,从而引起光纤光栅的 Bragg 波长的变化。光纤光栅的波长变化与温度  $T$  及应变  $\epsilon$  满足以下的线性关系

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (\alpha + e)\Delta T + (1 - \gamma)\epsilon \quad (2)$$

当温度升高时,由于光纤材料的热光效应,其有效折射率  $n_{\text{eff}}$  会增大,而热胀冷缩效应使光栅区变长,从而光栅的周期  $\Lambda$  就会变大,最终的结果使  $\lambda_B$  向长波长方向移动;温度降低时的分析与此类似,最终的结果使  $\lambda_B$  向短波长方向移动。波长偏移量与温度变化量呈线性关系

$$\Delta\lambda_T = [(\alpha + e)\Delta T] \cdot \lambda_B \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为光纤材料的热胀系数,  $\Delta T$  为温度变化量,  $e = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$  为热光系数。对于石英光纤,系数  $(\alpha + e) \approx 6.67 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。在 1550 nm 波段,光纤光栅峰值波长的温度敏感性约为  $0.01 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。一般来说,温度调谐响应速度较低,适合于缓慢变化的需要。

光纤的应变是光纤光栅调谐的另一个重要机理。当在光纤光栅的轴向施加应力时,一方面由于光弹效应使光纤的有效折射率改变,另一方面光纤

的轴向伸缩会导致光栅的周期改变。光纤光栅的波长偏移量与应变之间的关系为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = \epsilon - 0.5n_{\text{eff}}^2[\mu(P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12}))] = \epsilon(1 - \gamma) \quad (4)$$

式中  $\epsilon$  为光纤光栅的应变,  $\mu$  为泊松系数(横向变形系数),  $P_{11}$  和  $P_{12}$  为光弹性张量的 Pockel 系数。 $\gamma$  是表征光纤折射率应变效应的有效弹光系数,对普通石英光纤  $\gamma$  约为 0.22。

因此,在恒温情况下,光纤光栅的波长随光纤应变变量成线性关系。应变量的大小和所加应力之间的关系,取决于光纤不同的物理性质,又同外力施加的方式有关。显然,光纤光栅具有大的弹性和强度是获得大的调谐范围的关键。光纤的材料力学数据表明,光纤的抗压应变能力,大大高于其抗拉应变能力。采用压应变不仅可以获得大的调谐范围,而且可以避免光纤长期处于拉应变情况下的退化和损伤<sup>[5,6]</sup>。使光纤产生压应变的方法,首先要解决光纤在压应力下保持直线形状,才能得到轴向的压应变。在图 1 的调谐结构中,光栅是被“限制”在导轨内,“粘结”在支架上,线圈 A、B 由电路控制使左右支架同时相向运动,由于导轨的限制作用,不会使光栅各点的应变不相等,不会产生啁啾现象。为防止光纤弯曲,设计了一种微型的光纤导轨,保证在调谐时光纤在轴向受力但不会弯曲,此技术已申请专利。

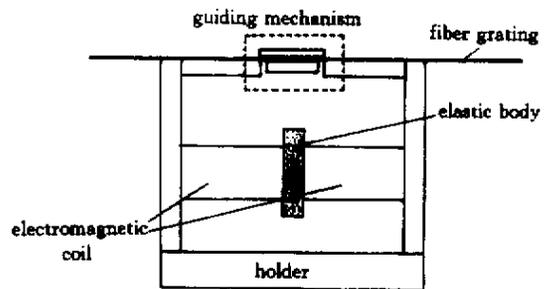


图 1 调谐机构示意图

Fig.1 Experimental setup for tuning

对光纤施加应力的方法也很多,本文采用了如图 1 所示的电磁调谐方案。通过控制电磁线圈 A、B 中电流的方向,使中间的铁芯相吸或相斥,从而使两头固定在支架上的 FBG 被压缩或拉伸,达到调谐作用。在电磁力作用下铁芯的位移,可以作如下分析。电磁感应力的大小可以写为

$$F = \frac{\mu_i^2 \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot I^2 \cdot S}{d^2} = \frac{aI^2}{d^2} \quad (5)$$

式中  $\mu_i, \mu_0$  分别为相对磁导率和真空磁导率,  $N$  为线圈匝数,  $I$  为线圈所通电流,  $d$  为两线圈初始间距,  $S$  为横截面积,  $a$  为由  $\mu_i, \mu_0, N, d, S$  决定的常数。以压缩情况为例, 当形变为  $x$  时, 根据力的平衡原理可得

$$\frac{a \cdot I^2}{(d - x)^2} = b \cdot x \quad (6)$$

式中  $b$  为支架的弹性系数, 与支架的材料有关。求解方程 (6) 可得  $x$  与  $I$  的关系曲线如图 2 所示。

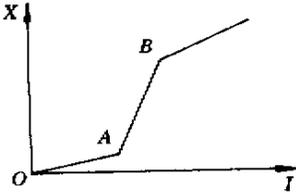


图 2  $x$  与  $I$  的关系曲线

Fig.2 Relationship between  $x$  and  $I$

图 2 曲线中斜率不连续点  $A$  和  $B$ , 可以由方程 (6) 求导得到

$$\frac{dx}{dI} = \frac{(2a/b)I}{3x^2 - 4dx + d^2} \quad (7)$$

由 (7) 式分母的零点得到  $x_A = d/3, x_B = d$ 。在  $0 \leq x \leq d/3$  范围, 可以进行连续调谐。因此要获得大的调谐范围, 就要取较大的初始间距  $d$ 。由 (7) 式还可得到, 在  $x = 0$  点附近

$$\left. \frac{dx}{dI} \right|_0 = \frac{2aI}{bd^2} \quad (8)$$

可见, 大的间距又导致较小的变化率。因此要在大调谐范围和大调谐率之间取一个折中。但是, 通过增强磁力, 即加大参数  $a$ , 减小弹性系数  $b$ , 可以获得大的变化率。

### 3 实验分析和讨论

根据磁调谐的原理, 我们设计了如图 1 所示的调谐机构, 针对压缩调谐中防止光纤光栅弯曲形变的问题, 设计了专用的导轨机构, 保证应力沿光纤光栅轴向。光纤光栅用环氧树脂粘结在与电磁线圈的磁芯相连接的支架上, 支架与底板相连。可以通过控制电磁线圈中电流的方向, 使线圈中的磁芯相吸或相斥, 从而使支架产生相对运动, 光纤光栅受到轴向压应力或拉应力, 实现“双向可调”。调谐装置中的支架采用弹性系数较大的材料, 加上支架的放大作用, 所以线圈  $A, B$  的匝数不是很多, 在 300 mA 电

流下就可以获得 1.38 nm 的调谐范围。

在压缩过程中, 为防止两磁芯猛然吸合而使光纤光栅断裂, 在两磁芯之间放置了有缓冲作用的弹性体。实验证实, 对初始中心波长为 1551.2 nm 的光纤光栅, 在电流从 0 到 500 mA 变化时, 作用在光纤光栅上的力与电流成线性关系, 当电流为 300 mA 时 (对应的磁感应强度为 16 mT), 调谐范围为 1.38 nm, 调谐光谱如图 3 (a) 所示。此调谐方法已成功地用于我们研制的四通道 DWDM 系统的 OADM 节点, 图 3 (b) 为系统测试对国际通信标准 (ITU-T) 所规定波长的调谐光谱图 ( (a) (b) 两图是不同光纤光栅的调谐光谱)。可以看到, 调谐过程中光谱线宽基本不变, 说明调谐没有产生附加的啁啾。本文还采用 PZT 进行调谐实验, 由于 PZT 的磁滞回线的效应比较严重, 所以调谐的恢复特性较差。图 4 是电磁调谐和 PZT 调谐在相同条件下的恢复性比较 (图 4 (a) 与图 3 (a) 相对应), 很明显, 电磁调谐的恢复性优于 PZT 调谐。

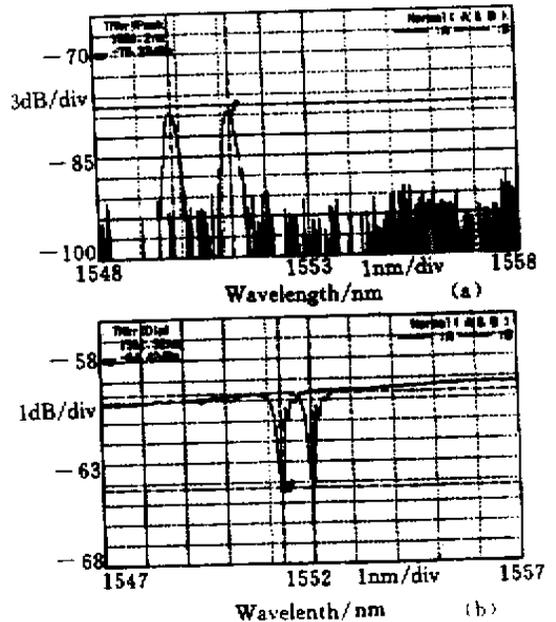


图 3 调谐光谱图

- (a) 300 mA 电流时的调谐光谱;
- (b) ITU-T 所规定波长的调谐光谱

Fig.3 Spectra of tuning

- (a) spectra of tuning when the current is 300 mA ;
- (b) spectra of tuning according to ITU-T standard

### 4 结 论

本文提出了一种简单而实用的电磁调谐方法,

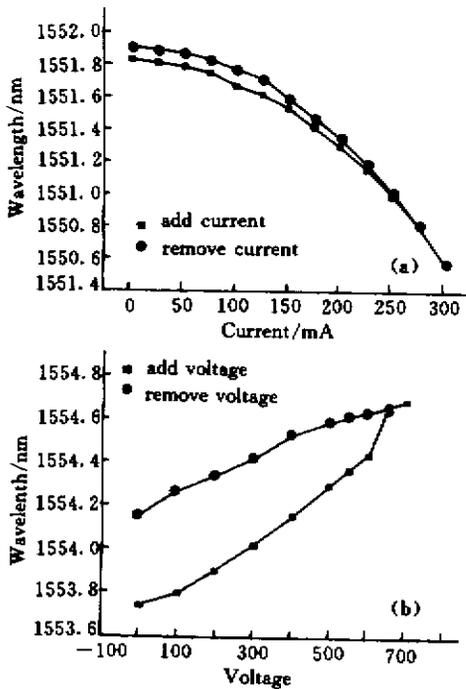


图4 调谐恢复性比较

(a)电磁调谐 (b)PZT调谐

Fig.4 Comparison of two methods for tuning

(a)tuning with magnetic coils;

(b)tuning with PZT (piezoelectric transducer)

对控制电流编程可以方便地调谐光纤光栅的 Bragg 波长。这一调谐方案可以应用于 DWDM 全光分/插复用器,实现在网络的节点上可以选择上下光路信号。它也可以用于光纤光栅外腔激光器、光纤激光器中,实现可调谐激光输出,或实现动态波长锁定。在波长调制型传感器中,可调谐技术也可以得到广泛的应用。

## 参 考 文 献

- 1 G. A. Ball, W. W. Morey. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser [ J ]. *Opt. Lett.*, 1992, **17** ( 6 ) : 420 ~ 422
- 2 M. G. Xu, H. Geiger, J. L. Archambault *et al.*. Novel interrogating system for fiber Bragg grating sensors using an acousto-optic tunable filter [ J ]. *Electron. Lett.*, 1993, **29** ( 17 ) : 1510 ~ 1511
- 3 Tetsuro Komukai, Yoshiaki Miyajima, Masataka Nakazawa. In-line fiber grating-type optical bandpass filter tuned by applying lateral stress. *J. Appl. Phys.*, 1995, **34** ( Part 2, No. 3A ) : L306 ~ L308
- 4 Yu Youlong, Liu Zhiguo, Dong Xiaoyi *et al.*. Linear tuning of fiber Bragg grating based on a cantilever [ J ]. *Acta Optica Sinica* ( 光学学报 ), 1999, **19** ( 5 ) : 621 ~ 625 ( in Chinese )
- 5 Seo Won Kwon, Hong Yoon, Sang Bae Lee. Bandwidth Controllable Filter Using the Chirped Fiber Bragg Gratings [ C ]. *Optical Fiber Communication ( OFC ) and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication ( IOOC ) '99*, ThJ4-1 : 141 ~ 143
- 6 S. Jin, H. Mavoori, R. P. Espindola. Magnetically Tunable Fiber Bragg Gratings [ C ]. *Optical Fiber Communication ( OFC ) and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication ( IOOC ) '99*, ThJ2-1 : 135 ~ 137

解决了常规介质膜带通滤波器难以实现的透射中心波长双向可调问题。尤其是根据石英材料具有大的压应变强度的特点,提出了压缩调谐的方法,达到了较好的调谐效果。调谐过程中不会引起啁啾现象,具有插入损耗小、结构简单、回复性好的特点。通过