

文章编号: 0258-7025(2001)11-0999-04

## 纯弯梁无啁啾光纤光栅调谐方法\*

薛林 赵华凤 孙骏 平洋

(清华大学电子工程系 北京 100084)

**摘要** 利用简支梁和悬臂梁调谐光纤光栅布喇格波长将造成光纤光栅啁啾。提出了一种新型的纯弯梁调谐方法, 并进行了理论和实验研究, 实现了光纤光栅无啁啾调谐, 用于光纤光栅外腔半导体激光器获得了 $\pm 1$  nm的激光波长稳定连续调谐。

**关键词** 光纤光栅, 无啁啾调谐, 纯弯梁

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

### Beam under Pure Bending Used for Tuning of Fiber Bragg Grating without Chirp

XUE Lin ZHAO Hua-feng SUN Jun PING Yang

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** It is suggested in this paper that the simple beam and the cantilever beam used for tuning FBG will make the FBG chirping. A novel tuning method utilizing the beam under pure bending is introduced. It is proved experimentally and theoretically that this new method will tune the Bragg wavelength without chirp. The FBG external cavity semiconductor laser using this new method has achieved the tuning wavelength of  $\pm 1$  nm continuously and steadily.

**Key words** fiber Bragg grating, tuning without chirp, the beam under pure bending

## 1 引言

光纤光栅反射(或透射)的布喇格波长随应力和温度而改变, 利用这个特性可实现对布喇格波长的调谐, 这在光通信及传感领域有广泛的应用。目前报道的光栅调谐方法有: 简支梁<sup>[1]</sup>、悬臂梁<sup>[2]</sup>的侧向应力调谐法; 沿光纤光栅轴向施加应力, 如压电陶瓷<sup>[3]</sup>、磁致伸缩<sup>[4]</sup>, 还有热调谐法<sup>[5]</sup>。其中简支梁和悬臂梁法可实现大范围调谐(5 nm 以上), 而且可使布喇格波长增大或减小, 调谐简便, 所以被广泛采用。但调谐过程中存在光纤光栅应力分布不均匀, 导致光栅啁啾。在光纤光栅较长或梁形变较大时, 啁啾相当大, 导致光栅反射率下降、带宽变宽, 对应用不利。本文对简支梁、悬臂梁调谐灵敏度和调谐引入啁啾量给出理论计算, 报道了利用纯弯梁实现光纤光栅在 $\pm 1$  nm 范围内无啁啾调谐的新方法; 并利用此法实现了对光纤光栅半导体激光器输出波长的连续稳定调谐。

## 2 理论分析

### 2.1 基本公式

应力调谐的基本原理是将光栅粘于梁上, 对光纤光栅施加应变 $\epsilon_x$ , 光栅布喇格波长随应变线性变化, 从而达到调谐目的。应变 $\epsilon_x$ 与布喇格波长调谐量 $\Delta\lambda_B$ 满足关系式<sup>[6]</sup>

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon_x \quad (1)$$

其中 $P_e$ 为有效弹光系数。设梁的轴向为 $x$ 方向, 对于均匀材料、横截面为矩形的梁, 梁上任一点处的轴向应变<sup>[7]</sup>

$$\epsilon_x = \frac{M(x)h}{EI} \quad (2)$$

其中 $E$ 为梁材料的杨氏模量,  $I$ 为惯性矩,  $M(x)$ 为该处的弯力矩。 $h$ 为考察点到梁中性面的距离。而梁上各点弯力矩 $M(x)$ 和挠度 $v(x)$ 满足挠度方程<sup>[8]</sup>

$$\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI} \quad (3)$$

利用边界条件, 获得 $M(x)$ 与外力 $P$ 作用点处位移

\* 国家“863”高技术计划(863-307)资助项目。

收稿日期: 2000-07-24; 收到修改稿日期: 2000-09-14

量  $w$  (作用处挠度) 的关系, 进而确定  $\epsilon_x$ , 也就得到了调谐量  $\Delta\lambda_B$  与  $w$  的关系。

应力调谐过程中, 若光纤光栅中各点的弯矩  $M(x)$  不同则导致各点应变不同, 将造成光栅啁啾。啁啾量定义为光栅内最大布喇格波长与最小布喇格波长之差

$$\Delta\lambda_{\text{chirp}} = \lambda_{B\text{max}} - \lambda_{B\text{min}} \quad (4)$$

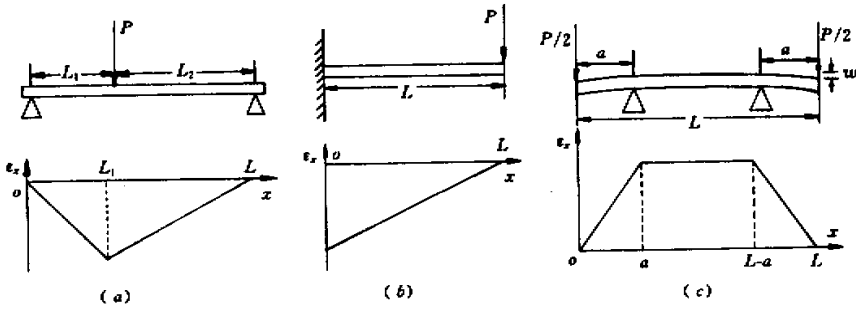


图1 三种梁结构及梁上应变分布

(a) 简支梁; (b) 悬臂梁; (c) 纯弯梁

Fig. 1 Schematic diagram of three beams followed by the curve of the strain distribution along the beams

(a) simply supported beam; (b) cantilever beam; (c) beam under pure bending

从图1看出, 简支梁和悬臂梁弯曲时应变是不均匀分布的, 设光栅长度为  $l$ , 梁长  $L$ , 光栅分别粘于简支梁的中部和悬臂梁的固定端, 计算得到调谐过程引入啁啾量  $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$  与波长调谐量  $\Delta\lambda_B$  有如下关系:

$$\text{简支梁: } \Delta\lambda_{\text{chirp}} = \frac{l}{2L} \Delta\lambda_B \quad (6a)$$

$$\text{悬臂梁: } \Delta\lambda_{\text{chirp}} = \frac{l}{L} \Delta\lambda_B \quad (6b)$$

从(6)式看出, 两种梁都存在啁啾量  $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$  随着调谐量  $\Delta\lambda_B$  增加而线性增大的问题。例如若简支梁梁长 180 mm, 光栅长  $L = 25$  mm,  $\lambda_B = 1529$  nm, 当  $\Delta\lambda_B = 1$  nm 时,  $\Delta\lambda_{\text{chirp}} = 0.07$  nm。矩形简支梁、悬臂梁无法克服调谐过程中光栅应变不均匀造成的光栅啁啾, 为此有人提出变截面悬臂梁法消除啁啾<sup>[2]</sup>。我们提出另一种解决方法——纯弯梁法。

### 2.3 纯弯梁调谐法

纯弯梁结构如图1(c)所示, 在梁的两端对称位置施加作用力  $P/2$ , 推进距离  $w$ 。梁上各点应变表达式为

$$\epsilon(x) = \begin{cases} \left(\frac{h}{2EI}\right)Px & (0 \leq x \leq a) \\ \left(\frac{h}{2EI}\right)Pa & (a \leq x \leq L-a) \\ \left(\frac{h}{2EI}\right)P(L-x) & (L-a \leq x \leq L) \end{cases} \quad (7)$$

由(1)式得

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{chirp}}}{\lambda_B} = (1 - P_r)(\epsilon_{x\text{max}} - \epsilon_{x\text{min}}) \quad (5)$$

$\epsilon_{x\text{max}}, \epsilon_{x\text{min}}$  分别为光栅中最大应变和最小应变。

### 2.2 简支梁和悬臂梁调谐存在的光栅啁啾问题

光纤光栅调谐的常用结构是简支梁与悬臂梁,

如图1(a), (b)所示。

从(7)式看出梁的中间段 ( $a \leq x \leq L-a$ ) 应变  $\epsilon_x$  为常数, 如图1(c)所示。所以将光栅粘在中间段任何位置都能获得无啁啾调谐, 而且调谐特性一样。由式(1)和(7)得到

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{ha}{2EI}(1 - P_r)P \quad (8)$$

为了进一步求出  $\Delta\lambda_B \sim w$  关系式, 还需求解挠度方程(3)。计算得到  $v(x)$  的形式解为

$$v(x) = \begin{cases} \frac{P}{12EI}x^3 + \tau x + v & (0 \leq x \leq a) \\ \frac{Pa}{4EI}x^2 + \omega x + \xi & (a \leq x \leq L-a) \\ -\frac{P}{12EI}x^3 + \frac{PL}{4EI}x^2 + \psi x + \zeta & (L-a \leq x \leq L) \end{cases} \quad (9)$$

边界条件为  $v(a) = v(L-a) = 0, v'(L/2) = 0$ ,

$v(x)$  在  $x = a$  和  $x = L-a$  处导数连续, 求得

$$\tau = -\frac{Pa(L-a)}{4EI}, v = 0,$$

$$\omega = -\frac{PaL}{4EI}, \xi = \frac{Pa^3}{12EI}$$

所以

$$w = v(0) = -\frac{Pa^2}{12EI}(3L-4a) \quad (10)$$

由式(8)和(10)得到

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = -\frac{6h(1-P_s)}{a(4a-3L)}w \quad (11)$$

由于中间段粘光栅,两支点间最小距离为光栅长度  $l$ ,即  $a_{\min} = (L-l)/2$ 。此时得到最大调谐灵敏度

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1-P_s) \frac{12h}{(L-l)(L+2l)}w \quad (12)$$

当  $L \gg l$  时, (12) 式近似为  $\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1-P_s) \frac{12h}{L^2}w$ , 与简支梁调谐灵敏度一样,但消除了光栅的啁啾。

### 3 实验结果

图2(a)为光栅调谐实验装置图,我们用不锈钢材料制作的纯弯梁,  $L = 180 \text{ mm}$ ,  $h = 0.5 \text{ mm}$ , 两支点间距  $60 \text{ mm}$ , 所用光栅长  $25 \text{ mm}$ ,  $\lambda_B = 1529 \text{ nm}$ 。将光纤光栅粘于梁中部,利用微位移推进器使梁产生形变。实验中获得了线性较好的  $\pm 1 \text{ nm}$  光栅布喇格波长调谐范围(图3所示),调谐过程中光栅透射谱无畸变(光谱仪分辨率为  $0.05 \text{ nm}$ ),说明无明显啁啾。由(11)式得到的理论计算结果与实验测量结果基本符合,产生微小差别的原因可能是梁装配和力推进总存在一定的不对称。由于理论计算都是在梁的小形变下的近似,随着  $w$  的增大,理论与实际情况的差别将更大。

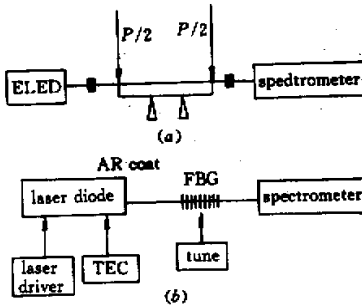


图2 实验装置图

(a) 纯弯梁光纤光栅调谐实验装置;

(b) 光纤光栅外腔半导体激光器实验装置

Fig.2 Experimental setup

(a) beam under pure bending; (b) FBG ECSSL

第二个实验是用光纤光栅调谐法进行光纤光栅外腔半导体激光器的输出波长调谐(实验装置如图2(b)所示)。实验中所用半导体激光器镀有增透

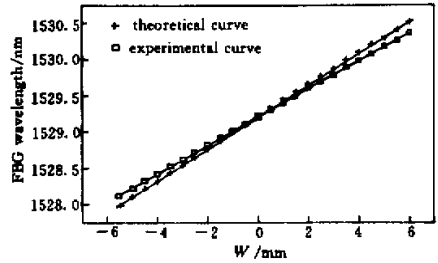


图3  $\lambda_B \sim w$  的纯弯梁调谐理论与实验曲线

Fig.3 Theoretical and experimental  $\lambda_B \sim w$  curve for the beam under pure bending

膜,光纤光栅布喇格波长为  $1529 \text{ nm}$ 。光栅外腔激光器输出波长在光栅布喇格波长处,通过改变  $\lambda_B$  可实现对激光器输出波长的调谐。实验中先用简支梁调谐激光输出波长,发现调谐过程中输出激光功率不稳定,边模抑制比随调谐量增大而下降,甚至使激光器无法单模工作(如图4(a)所示)。这是由于简支梁调谐造成光栅啁啾,光栅反射率下降和反射带宽加宽,影响了激光器的单模工作。利用纯弯梁调谐法可有效地解决这个问题,实验中用此法实现了激光输出波长的连续调谐  $\pm 1 \text{ nm}$ ,且有调谐中激光光谱无畸变和光功率稳定的特点。图4(b)为激光输出波长调谐过程中的激光光谱图。

应当指出的是,由于激光器镀膜端面存在残余反射,从图4可以看到输出激光光谱中仍有较大的内腔模存在。在调谐过程中光栅布喇格波长的改变引起注入激光管芯的反馈光相位变化,而反馈光与内腔模相位之间不同的相位关系将导致激光器输出线宽的变化。调谐过程中这种相位关系是周期变化的,实验中也观察到了激光线宽的周期变化。

### 4 结论

简支梁和悬臂梁调谐法在大调谐范围和光纤光栅较长时将造成光栅啁啾,不利于光纤光栅波长调谐。利用纯弯梁调谐结构可实现较长光纤光栅的无啁啾大范围调谐。实验中利用纯弯梁获得了光纤光栅波长  $\pm 1 \text{ nm}$  的无啁啾调谐;将纯弯梁调谐用于光纤光栅外腔半导体激光器的激光输出波长调谐,获得了波长的连续调谐,而且光功率稳定,激光光谱无畸变。

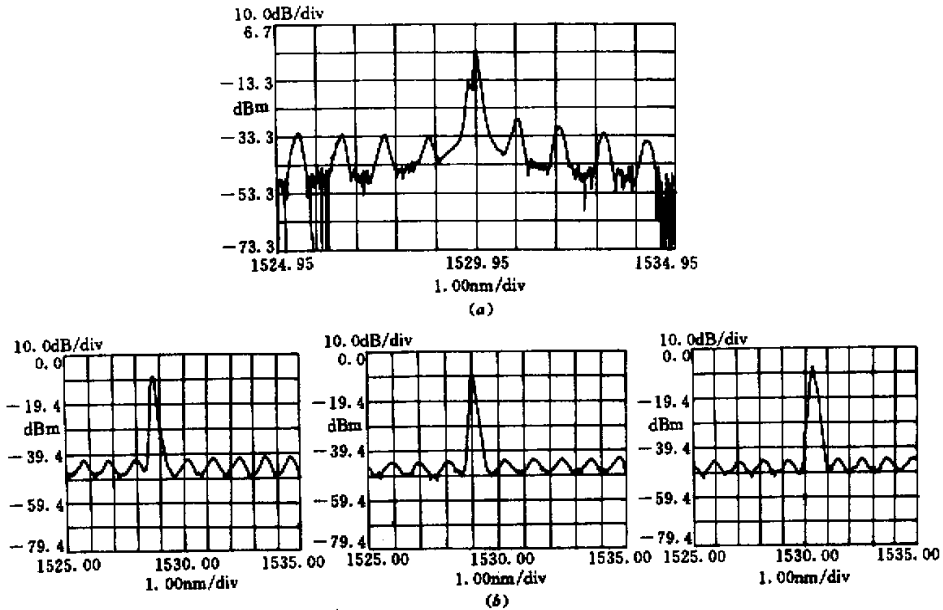


图 4

(a) 光栅啁啾造成激光模式变坏; (b) 纯弯梁调谐的激光输出谱

Fig. 4

(a) Laser spectrum degradation caused by FBG chirp; (b) Spectrum of the laser utilizing the beam under pure bending

## 参 考 文 献

- 1 Liu Zhiguo, Zhang Yibing, Kai Guiyun *et al.*. A new method for fiber-grating linear tuning. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, 18(12):1731~1734 (in Chinese)
- 2 Yu Youlong, Liu Zhiguo, Dong Xiaoyi *et al.*. Linear tuning of fiber Bragg grating based on a cantilever. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, 19(5):621~625 (in Chinese)
- 3 G. A. Ball, W. W. Morey. Compression-tuned single-frequency Bragg grating fiber laser. *Opt. Lett.*, 1994, 19(23):1979~1981
- 4 J. L. Arce-Diego, R. Lopez-Ruisanchez, J. M. Lopez-Higuera *et al.*. Fiber Bragg grating as an optical filter tuned by a magnetic field. *Opt. Lett.*, 1997, 22(9):603~605
- 5 M. G. Xu, H. Geiger, J. L. Archambault *et al.*. Novel interrogating system for fiber bragg grating sensors using an acousto-optic tunable filter. *Electron. Lett.*, 1993, 29(17):1510~1511
- 6 Yu Youlong, Geng Shuwei, Liu Zhiguo *et al.*. Optimization about the cantilever used for linearly tuning of fiber bragg grating. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1998, 27(8):714~718 (in Chinese)
- 7 S. Timoshenko, J. Gere, translated by Hu Renli. *Mechanics of Materials*. 1st Edition. Beijing: Science Press, 1978. 148~150 (in Chinese)
- 8 S. Timoshenko, J. Gere, translated by Hu Renli. *Mechanics of Materials*. 1st Edition. Beijing: Science Press, 1978. 217 (in Chinese)