

文章编号: 0258-7025(2003)12-1116-05

# 单个长周期光纤光栅实现横向负载和温度的同时测量

饶云江, 王义平, 冉曾令, 朱 涛, 曾祥楷

(重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

**摘要** 发现高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的长周期光纤光栅(LPFG)的谐振波长的横向负载灵敏度具有很强的方向相关性,且在两个特定的负载方向上谐振波长对横向负载不敏感,而谐振峰幅值与不同方向的横向负载都有很好的线性关系。这种 LPFG 的谐振波长随温度变化而线性漂移,使谐振峰幅值对温度变化不敏感,由此提出了用单个 LPFG 的谐振波长和谐振峰幅值两个参量分别实现对温度和横向负载进行同时独立绝对测量的传感器设计方案,可望从根本上解决 LPFG 在测量中存在的温度和横向负载之间的交叉敏感问题。

**关键词** 传感器技术; 光纤传感器; 长周期光纤光栅; 横向负载传感; 温度传感

中图分类号 TN 253 文献标识码 A

## Simultaneous Measurement of Transverse Load and Temperature Using a Single Long-period Fiber Grating Element

RAO Yun-jiang, WANG Yi-ping, RAN Zeng-ling, ZHU Tao, ZENG Xiang-kai

(Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract** In this paper, a novel long-period fiber grating (LPFG) sensor written by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses is demonstrated for simultaneous measurement of transverse load and temperature. Such a sensor could solve the cross-sensitivity problem between transverse load and temperature due to the unique features of the LPFG, i. e. the load-sensitivity of the LPFG against the resonant wavelength shift strongly depends on loaded orientation. Within the circular position 0° ~ 180°, there are one orientation which is the most load-sensitive, corresponding to the resonant wavelength “red” shift and another orientation which is the most load-insensitive, corresponding to the resonant wavelength “blue” shift, in particular, there are two special orientations, which are the most load-insensitive.

**Key words** sensor technique; fiber sensor; long-period fiber grating; transverse load sensor; temperature sensor

### 1 引 言

在智能材料和工程结构的健康状态监测中,横向负载和温度的测量都非常重要,但横向负载和温度之间存在明显的交叉敏感问题,因此基于光纤传感的横向负载和温度同时传感技术在目前是一个非常活跃的研究领域<sup>[1]</sup>。目前的方法通常是将多个传感器结合起来实现的,以致于传感头体积较大、成本

高、不利于集成,所以应用单一传感器实现横向负载和温度同时测量的技术成为一个研究热点<sup>[2]</sup>,然而常用的方法一般要求解繁杂的矩阵方程,并且测量精度受交叉敏感的影响较大。

近年来,周期为几十到几百微米的长周期光纤光栅(LPFG)得到了人们越来越广泛的重视<sup>[3]</sup>。由于 LPFG 具有易于制作、附加损耗小、无后向反射、与偏振无关等特点以及具有比光纤布拉格光栅<sup>[4]</sup>

收稿日期: 2002-07-04; 收到修改稿日期: 2002-09-29

基金项目: 国家杰出青年科学基金(60025515)资助项目。

作者简介: 饶云江(1962—),男,江西人,重庆大学首位长江学者奖励计划特聘教授,博士生导师,博士,主要从事光纤传感与通信技术研究。E-mail: yjrao@cqu.edu.cn

(FBG)更好的温度、横向负载、折射率和弯曲灵敏度<sup>[1,5,6]</sup>,因此在光纤传感领域得到了广泛重视。LPFG 的写入方法很多,不同方法写入的 LPFG 因其形成机理不同而导致其横向负载、弯曲、扭曲、应变等特性有所不同<sup>[6~8]</sup>,如 Y. Liu 等发现紫外写入的 LPFG 具有比 FBG 高几百倍的横向负载灵敏度<sup>[6]</sup>。我们发现高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的新型 LPFG 具有独特的横向负载特性和温度特性,由此提出了一种用单个 LPFG 的谐振波长和谐振峰幅值两个参量分别实现对温度和横向负载同时独立绝对测量的传感器的设计方案,可望从根本上解决 LPFG 在测量中存在的横向负载和温度之间的交叉敏感问题。

## 2 实验和结果

如图 1 所示,该实验装置用于测量高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲在单模光纤中写入的 LPFG 的横向负载特性(周期  $\Lambda = 450 \mu\text{m}$ ,周期数  $N = 55$ ,自由状态下谐振波长  $1530.82 \text{ nm}$ ,谐振峰幅值  $21.075 \text{ dB}$ ,3 dB 带宽为  $15 \text{ nm}$ )。该 LPFG 室温自由状态下的透射谱如图 2 所示。宽带光源作为输入,用光谱分析仪(HP 86140A)测量光栅透射光谱的变化。LPFG 两端的光纤分别粘贴于左右两个转盘的轴线上。把待测 LPFG 和同种类型的匹配光纤平行地放置于底座表面,并把宽度  $b = 20 \text{ mm}$ ,重量为  $150 \text{ g}$  的薄平

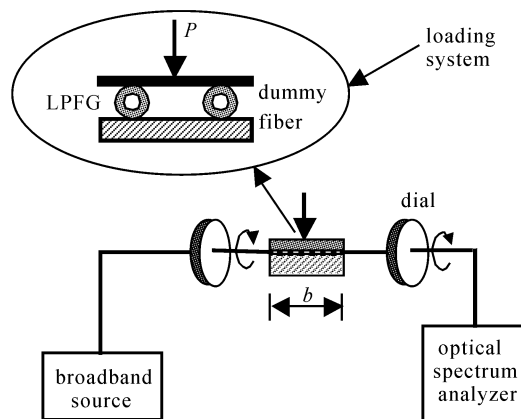


图 1 LPFG 横向负载实验装置

Fig. 1 Experimental set-up for load test of LPFG

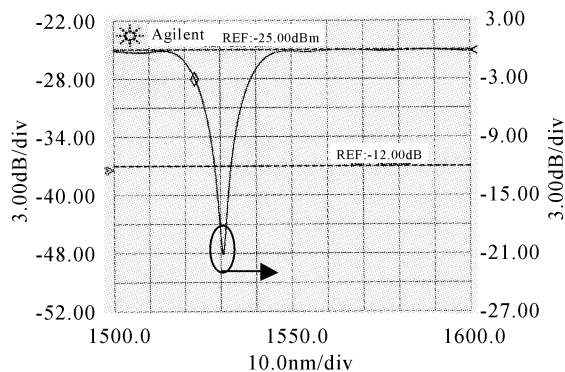


图 2 高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的 LPFG 的透射谱图

Fig. 2 Transmission spectrum of the LPFG written by high-frequency CO<sub>2</sub> pulses

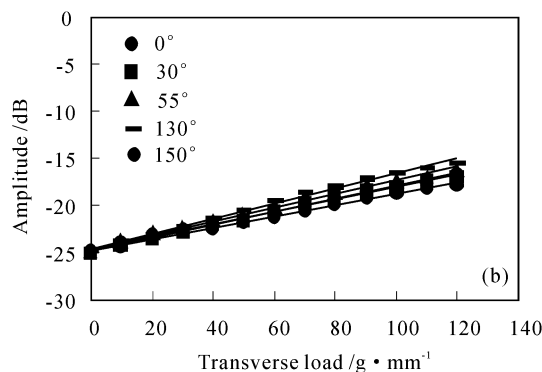
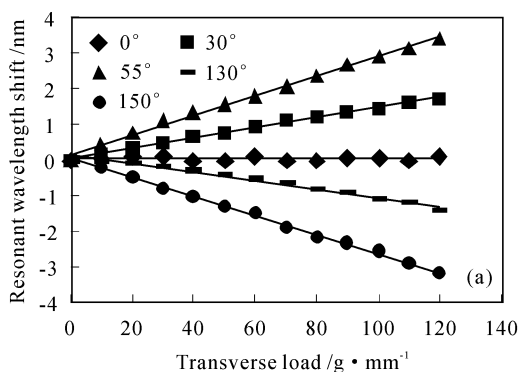


图 3 在 LPFG 不同圆周方向 0°,30°,55°,130°,150°施加横向负载时(a)谐振波长漂移曲线,(b)谐振峰幅值变化曲线

Fig. 3 (a) Resonant wavelength shift, (b) amplitude vs applied transverse load at different orientations, i. e. 0°, 30°, 55°, 130° and 150°

板放置于 LPFG 和匹配光纤上;然后在薄平板上逐渐添加砝码以便向 LPFG 施加横向负载,每次增加  $400 \text{ g}$ ,总计施加的砝码重量为  $4800 \text{ g}$ ,用光谱仪测量 LPFG 输出光谱的变化。实际施加在 LPFG 上

的横向负载为  $(P + 150)/2b$ ,  $P$  为薄平板上砝码的重量, $b$  为被压 LPFG 的长度即薄平板的宽度。取下 LPFG 上的砝码和薄平板,同步转动 LPFG 两端的转盘使 LPFG 沿轴线旋转一定角度以便在不同

的圆周方向上对 LPFG 施加压力,重复上面的实验过程。实验结果如图 3 所示,图中只画出了几个具有代表性的圆周方向(0°, 30°, 55°, 130°, 150°)的横向负载特性曲线。图 3(a)表明在不同的圆周方向上 LPFG 的谐振波长对横向负载的灵敏度不同,而且在特定的圆周方向上谐振波长对横向负载不敏感(最大变化仅为±0.1 nm),即随着负载量的增加谐振波长几乎不变。有趣的是在有的圆周方向上谐振波长发生“红”移,而在另一些圆周方向上谐振波长却发生“蓝”移。在谐振波长对横向负载比较敏感的圆周方向上,其谐振波长的漂移量与横向负载具有

很好的线性关系,最大灵敏度约为±0.03 nm·(g·mm<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup>。图 3(b)表明在圆周的各个方向上,谐振峰幅值都随着负载量的增加而线性地减小且其灵敏度相近,约为 0.07 dB·(g·mm<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup>。图 4(a), (b)和(c)分别表示在谐振波长对横向负载“蓝”移最敏感的方向、最不敏感的方向和“红”移最敏感的方向上,随着负载量的增加,LPFG 的输出光谱的变化,每个图中的三条谱线分别表示 LPFG 处于自由状态、负载为 60 g·mm<sup>-1</sup>和 120 g·mm<sup>-1</sup>时的输出光谱。实验结果表明该 LPFG 负载和卸载时透射谱变化的重复性很好。

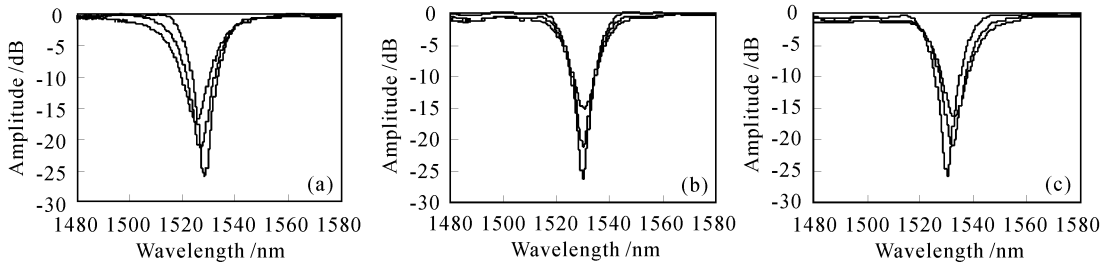


图 4 不同圆周方向负载时 LPFG 的输出光谱变化,谐振波长(a)“蓝”移,(b)不灵敏,(c)“红”移

Fig. 4 Transmission spectra change corresponding applied loading at different circular orientations, resonant wavelength is (a) “blue” shift; (b) load-insensitive; (c) “red” shift

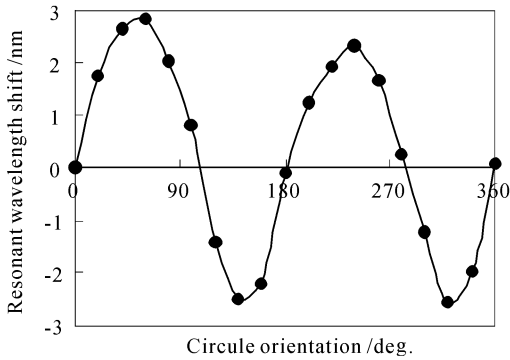


图 5 LPFG 负载 80 g·mm<sup>-1</sup>时谐振波长变化与负载方向的关系

Fig. 5 Relationship between resonant wavelength shift and circular orientation while LPFG is loaded by 80 g·mm<sup>-1</sup>

为了测试 LPFG 横向负载特性的方向相关性,做了如下实验,每次使 LPFG 沿轴线转动 20°,但都施加 3200 g 砝码的压力,LPFG 转动一周测得的谐振波长对横向负载的灵敏度与负载方向的关系如图 5 所示,横轴表示圆周的不同方向,即横向负载的方向,纵轴表示谐振波长的漂移量。由图 5 可知在不同圆周方向上,虽然对 LPFG 施以同等的负载,但其谐振波长的变化量不同,这表明 LPFG 的谐振波

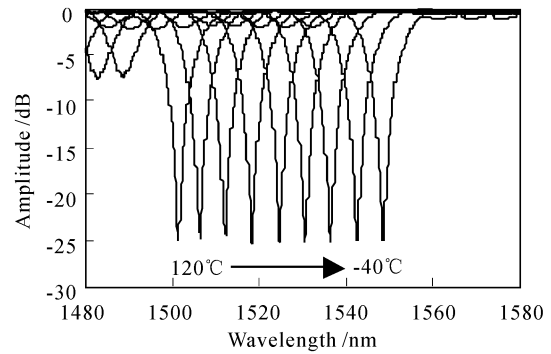


图 6 温度变化时 LPFG 输出光谱的变化

Fig. 6 Transmission spectra change while the temperature varying, from left to right every curve show transmission spectra of LPFG while temperature is 120 °C, 100 °C, ..., -40 °C, respectively

长对横向负载的灵敏度具有方向相关性。在圆周 0°~180°范围内分别存在一个谐振波长发生“红”移和“蓝”移最敏感的方向,以及两个对横向负载不敏感的方向。还发现虽然 LPFG 谐振波长对横向负载的灵敏度具有明显的方向相关性,但其谐振峰幅值对横向负载的灵敏度相近,即方向相关性较弱。每次实验前测量无透射峰处的幅值为基准,谐振峰幅值的测量值为实测值与基准之差。

温度实验表明这种 LPFG 的谐振波长随温度变化而线性漂移, 但谐振峰幅值几乎不变, 最大变化仅为  $\pm 0.1$  dB, 其输出光谱的变化过程如图 6 所示, 图中曲线从左到右依次表示温度分别为  $120^{\circ}\text{C}$ ,  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $\dots$ ,  $-40^{\circ}\text{C}$  时的输出光谱。图 7 表明该 LPFG 的谐振波长的温度灵敏度为  $-0.3$  nm

$\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ , 远大于其他方法写入的 LPFG 的温度灵敏度<sup>[5]</sup>, 而幅值对温度不敏感。这种新型 LPFG 的纵向应变特性如图 8 所示, 其谐振波长的应变灵敏度约为  $-0.45$  nm/ $\mu\text{e}$ , 比其温度灵敏度低得多。实验结果表明, 该 LPFG 应力测试的重复性很好。

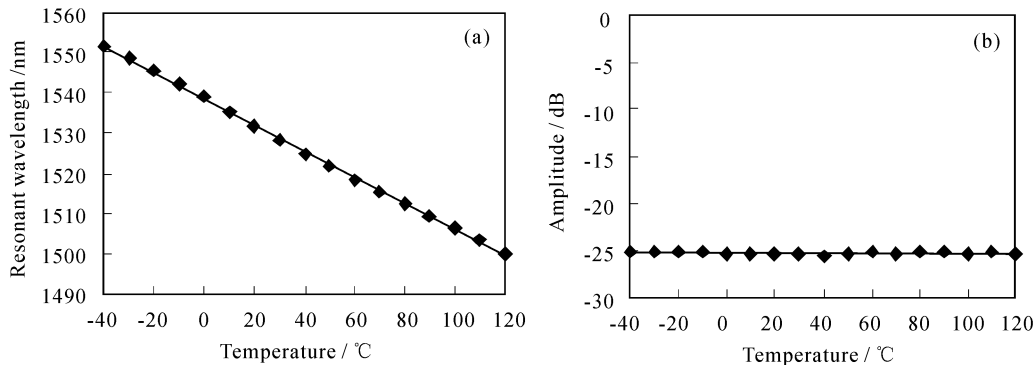


图 7 (a) LPFG 谐振波长与温度的关系; (b) LPFG 谐振峰幅值与温度的关系

Fig. 7 (a) Resonant wavelength of LPFG vs applied temperature;  
(b) Resonant peak amplitude of LPFG vs applied temperature

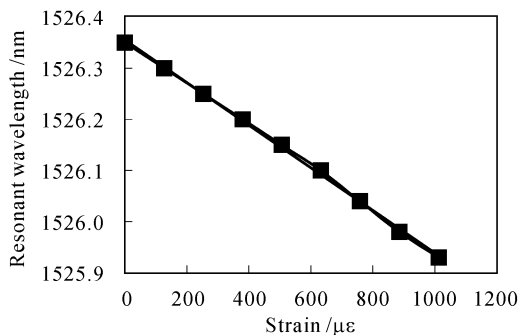


图 8 高频  $\text{CO}_2$  激光脉冲写入的 LPFG 纵向应变特性

Fig. 8 Strain response of the LPFG induced by high-frequency  $\text{CO}_2$  laser pulses

### 3 讨论

研究对象是用高频  $\text{CO}_2$  激光脉冲在单模光纤中写入的 LPFG<sup>[7]</sup>。聚焦的高频  $\text{CO}_2$  激光轴向周期性加热光纤产生的热冲击效应使光纤被加热处玻璃密度增加, 同时产生的局部高温使得被加热处纤芯中的残余应力得以释放, 导致光纤折射率沿轴向发生周期性变化从而形成 LPFG<sup>[8]</sup>。单侧入射的  $\text{CO}_2$  激光, 在光纤表面同时产生反射和透射, 由于二氧化硅对  $10.6 \mu\text{m}$  波长处的激光吸收较强, 使得透射光的能量沿激光入射方向逐渐减弱, 以致在光纤面向激光入射的一侧激光能量较强, 而在背向入

射方向的一侧激光的能量较弱, 从而导致在光纤横截面上因  $\text{CO}_2$  激光加热而引起的折射率分布不均匀<sup>[9]</sup>。在光纤面向激光入射的一侧, 激光能量较强, 温度较高, 纤芯中的残余应力释放较多, 因此折射率增加较大; 而在光纤背向激光入射方向的一侧, 激光能量较弱, 温度较低, 纤芯中的残余应力释放较少, 因此折射率增加较小。LPFG 横截面折射率分布不均匀性的外在表现就是其谐振波长对横向负载的灵敏度具有方向相关性。实验中当把负载增加到 8000g 也未发现紫外光写入的 LPFG 横向负载实验中随着负载量的增加原始损耗峰分裂为双峰的现象<sup>[6]</sup>, 这可能与所用 LPFG 的写入方法不同有关, 其机理有待进一步研究。

根据这种新型 LPFG 的谐振波长对特定圆周方向上的横向负载不敏感, 而谐振峰幅值随横向负载的增加而线性减小以及谐振波长随温度变化线性漂移而谐振峰幅值对温度变化不敏感的独特特性, 用单个这种 LPFG 可实现横向负载和温度的同时独立绝对测量。方法如下: 用谐振波长对横向负载不敏感的侧面承载, 负载的变化使得谐振峰幅值线性变化而对谐振波长无影响; 温度的变化使谐振波长线性漂移而对幅值无影响。分别测量 LPFG 的谐振波长和幅值的变化就可以得到横向负载和温度的变化, 从而用一个 LPFG 实现了对横向负载和温度的同时独立绝对测量。由于谐振峰幅值的测量值

为实测值与基准(无透射峰处的幅值)之差,消除了光源波动及外界环境引起的光路中光强的变化对测量精度的影响,于是通过测量谐振峰幅值就可以实现对横向负载的绝对测量。虽然在谐振波长对横向负载不敏感的方向横向负载也会引起谐振波长的变化,但变化量很小,由此给温度测量带来的误差小于 $0.3^{\circ}\text{C}$ ;另外温度的变化也会引起谐振峰幅值的微小变化,由此给横向负载测量带来的误差小于 $1\text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,所以可以忽略横向负载和温度的交叉敏感给测量带来的误差。在破坏性实验中把 LPFG 拉断时谐振波长仅漂移 $0.5\text{ nm}$ ,而当该 LPFG 用于测量横向负载和温度时,其主要是承受横向应力,几乎不承受纵向应力。即使由于被测物体热胀冷缩或变形使 LPFG 承受一定的纵向应力,但由于这种 LPFG 谐振波长的纵向应变灵敏度极小,因此纵向应力和温度的交叉敏感可以忽略。

#### 4 结 论

高频  $\text{CO}_2$  激光脉冲在单模光纤中写入的 LPFG 的谐振波长对横向负载的灵敏度具有很强的方向相关性,即在圆周的不同方向对 LPFG 施加横向负载其谐振波长对负载的灵敏度不同,在有的圆周方向谐振波长发生“红”移,而在有的圆周方向却发生“蓝”移,并且特定的方向上对横向负载不敏感。在谐振波长对横向负载比较敏感的圆周方向上,谐振波长随负载量的变化而线性漂移。在圆周 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 范围内有一个谐振波长对横向负载发生“红”移最敏感的方向( $+0.03\text{ nm}\cdot(\text{g}\cdot\text{mm}^{-1})^{-1}$ )和一个发生“蓝”移最敏感的方向( $-0.03\text{ nm}\cdot(\text{g}\cdot\text{mm}^{-1})^{-1}$ )以及两个对横向负载不敏感的方向(最大变化仅为 $\pm 0.1\text{ nm}$ )。在圆周的各个方向上,谐振峰幅值都随着负载量的增加而线性减小且其灵敏度相近,约为 $0.07\text{ dB}\cdot(\text{g}\cdot\text{mm}^{-1})^{-1}$ 。这种 LPFG

的谐振波长对温度非常敏感,灵敏度高达 $-0.3\text{ nm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;而谐振峰幅值对温度的变化不敏感,在 $40^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$ 范围内谐振峰幅值最大变化仅为 $\pm 0.1\text{ dB}$ ,即温度变化只是使输出光谱发生平移而形状几乎不变。根据这些独特的特性设计而成的横向负载和温度同时测量传感器具有体积小、简单易行、能埋入智能材料的优点,从而可实现对工程结构的温度和横向负载的实时监控。

#### 参 考 文 献

- 1 H. J. Patrick, G. M. Williams, A. D. Kersey *et al.*. Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(9):1223~1225
- 2 Guan Baiou, H. Y. Tam, S. L. Ho *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(6):827~830 (in Chinese)
- 3 A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1):58~65
- 4 Y. J. Rao. In-fibre Bragg grating sensors [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, **8**:355~375
- 5 V. Bhatia, A. M. Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensors [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9):692~694
- 6 Y. Liu, L. Zhang, I. Bennion. Fibre optic load sensors with high transverse strain sensitivity based on long-period gratings in B/Ge co-doped fibre [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(8):661~662
- 7 Y. J. Rao, Y. P. Wang, Z. L. Ran *et al.*. Characteristics of novel long-period fibre gratings written by focused high-frequency  $\text{CO}_2$  laser pulses [C]. *SPIE*, 2001, **4581**:327~333
- 8 D. D. Davis, T. K. Gaylord, E. N. Glytsis *et al.*. Long period fibre grating fabrication with focused  $\text{CO}_2$  laser pulses [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(3):302~304
- 9 G. D. VanWiggeren, T. K. Gaylord, D. D. Davis *et al.*. Axial rotation dependence of resonances in curved  $\text{CO}_2$ -laser-induced long-period fibre gratings [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(16):1354~1355