

文章编号: 0253-2239(2010)08-2441-05

# CO<sub>2</sub> 激光写入的无需温度补偿的拍频型 扭曲传感器研究

朱 涛<sup>1,2</sup> 史翠华<sup>1</sup> 郑建成<sup>1,2,3</sup> 饶云江<sup>1,2</sup> 史磊磊<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044

<sup>2</sup> 电子科技大学通信与信息工程学院宽带光纤传输及通信网络技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054

<sup>3</sup> 香港城市大学电子工程系, 香港

**摘要** 高频 CO<sub>2</sub> 激光在扭曲的单模光纤上制作的长周期光纤光栅(LPFG)还原后会产生谐振峰分裂现象。基于这种光栅结构,用拍频理论对谐振峰分裂现象和扭曲特性做了解释和分析,实验结果与理论分析相吻合。由于这种光栅的两分裂峰具有几乎一样的温度灵敏度,因此提出可通过测量这种光栅两分裂峰之间的距离来实现扭曲量的测量,并且当扭曲方向不一样时,两分裂峰的距离会变大或变小,因此该扭曲传感器在实现高灵敏度扭曲传感时还可辨别扭曲的方向。这种传感器在工业领域将具有良好的潜在应用价值。

**关键词** 传感器;长周期光纤光栅;拍频;CO<sub>2</sub> 激光;扭曲传感器

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103008.2441

## Beat Torsion Sensor Without Temperature Compensation Based on Long-Period Fiber Grating Written by CO<sub>2</sub> Laser

Zhu Tao<sup>1,2</sup> Shi Cuihua<sup>1</sup> Zheng Jiancheng<sup>1,2,3</sup> Rao Yunjiang<sup>1,2</sup> Shi Leilei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Chongqing University, Chongqing 400044, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks Technologies, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

<sup>3</sup> Department of Electronic Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong, China

**Abstract** The resonance peak of long period fiber grating fabricated in twisted optical fiber by using high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses could split into two peaks, after the twist applied to the fiber is removed. The splitting and the torsion characteristic of the special gratings are analyzed and explained by beat-frequency theory. As the temperature sensitivity of the two splitting peaks of the grating is almost the same, it is proposed that torsion can be measured by detecting the interval change between the two splitting peaks when torsion is applied. Besides, the torsion sensor can distinguish torsion direction as the distance of the two splitting peaks increases or decreases when different torsion is applied, therefore, this kind of torsion sensors has a great potential application in high sensibility torsion sensing.

**Key words** sensors; long-period fiber grating; beat frequency; CO<sub>2</sub> lasers; torsion sensor

## 1 引 言

近年来,光纤传感器凭借其抗电磁干扰能力强、完全兼容于光纤、附加损耗小、容易集成以及能在各种恶劣环境下工作的优点,受到越来越多的关注。

其中长周期光纤光栅(LPFG)以其体积小、重量轻以及可测量多个参数等优势在光纤通信<sup>[1]</sup>和光纤传感<sup>[2]</sup>领域得到了广泛应用。长周期光纤光栅的写入方法有很多,不同方法写入的长周期光纤光栅由于

收稿日期: 2009-06-25; 收到修改稿日期: 2009-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(60807019)、教育部新世纪人才支持计划(NCET-08-0602)及重庆大学骨干教师基金资助课题。

作者简介: 朱 涛(1976—),男,副教授,主要从事光纤传感及通信技术等方面的研究。E-mail: zhutao@cqu.edu.cn

其形成机理不同以致其外界响应特性可能不同<sup>[3~6]</sup>,其中 CO<sub>2</sub> 激光写入法具有很多的优点<sup>[7~9]</sup>。2004 年, S. Oh 等<sup>[10]</sup>利用 CO<sub>2</sub> 激光通过曝光不停旋转和移动的单模光纤制作出了一种螺旋形折射率调制的 LPFG。当给它施加不同方向的扭曲时,光栅的谐振峰向不同方向漂移,因此可以用来精确地测量扭曲。利用高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲在静止不动的扭曲光纤上可写成扭曲长周期光纤光栅 (R-LPFG),与螺旋型 LPFG 不同的是,当施加在 R-LPFG 的扭曲释放后,其谐振峰产生分裂<sup>[11,12]</sup>。本文在该 R-LPFG 扭曲传感器的结构基础上,采用拍频理论对这种光栅进行了解释。理论分析和实验结果表明,可以通过控制扭曲周期的大小来获得具有不同高扭曲灵敏度的扭曲传感器,加之可以利用两谐振峰抵消温度变化,所以,该扭曲传感器在实现高灵敏度扭曲传感上将具有很好的潜在应用价值。

## 2 传感器制作及实验

利用高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲制作 R-LPFG 的系统结构如图 1 所示<sup>[6~9]</sup>。实验中,将去掉涂敷层的光纤穿过分度盘后用强化磁铁固定在半圆柱的中轴线上,并保持光纤呈自然拉伸状态,然后固定左边,而将右转盘顺时针旋转  $N_T$  圈后固定,这样图中长度为  $L$  的光纤就发生了扭曲率  $\eta = 360N_T/L$  的扭曲。通过计算机控制激光脉冲就可以利用单侧写入法在该扭曲光纤上写出设计周期为  $\Lambda$ 、周期数为  $N$  的扭曲 LPFG,由高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入 LPFG 的原理可以知道,对于在扭曲光纤上写入的扭曲 LPFG,当重新将右旋盘回原位置时(即释放光栅使其处于自由状态),光栅每个周期的折变在光纤轴向就形成了旋转折变结构,其旋转方向与制作时光纤的扭曲

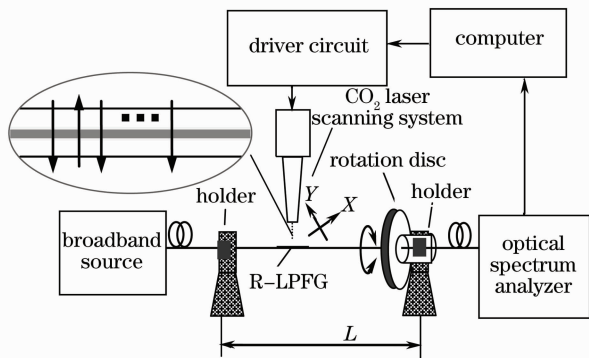


图 1 高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入 R-LPFG 装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the setup for the fabrication of an R-LPFG with high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses

方向相反,这就形成了所需的扭曲光栅。为便于区分不同状态下的长周期光纤光栅,将采用高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲单侧写入后的光纤光栅,即扭曲状态下的长周期光栅称为 T-LPFG;对于 T-LPFG,当重新将旋转盘旋回原来位置时,即释放光栅使其处于自由状态,这时的光栅称为 R-LPFG。

这里用光栅的扭曲周期  $\Delta_T = L/N_T$  来描述光栅的扭曲效应,那么光栅的扭曲率,即单位长度光纤的扭曲角度  $\eta = 360/\Delta_T$ 。实验中利用 CO<sub>2</sub> 激光在康宁 SMF-28e 普通通信单模光纤上制作光栅,写入光栅周期  $\Lambda_G = 570 \mu\text{m}$ ,周期数  $N = 50$ ,且具有不同扭曲周期的 R-LPFG。实验发现,当扭曲长度  $L$  不变时,扭曲周期  $\Delta_T$  越小(即扭曲率  $\eta$  越大)时,需要的激光扫描次数就越少,也就越容易形成光栅。

扭曲周期  $\Delta_T$  从 76 mm 变化到 30 mm 的 R-LPFG 的传输谱如图 2 所示。由图中可以看出,扭曲率很小( $\Delta_T = 76 \text{ mm}$ )时,R-LPFG 较 T-LPFG 的传输谱没有产生多大变化;当扭曲率很大( $\Delta_T = 33 \text{ mm}$ 和  $30 \text{ mm}$ )时,原来的一个谐振峰完全分裂为两个独立的谐振峰;在扭曲率处在特殊值( $\Delta_T = 60 \text{ mm}$ 和  $50 \text{ mm}$ )时,谐振峰会不完全分裂。结果表明,R-LPFG 谐振峰分裂现象是否突出主要取决于光栅扭曲率或扭曲周期的大小。

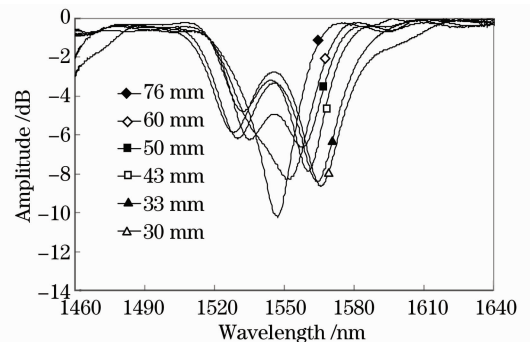


图 2 不同扭曲周期  $\Delta_T$  下形成的 R-LPFG 的传输谱  
Fig. 2 Transmission spectrum of R-LPFG with different twist period  $\Delta_T$

R-LPFG 的扭曲特性仍然可用图 1 所示的写入装置。将写好的光栅两端分别用强化磁铁固定在分度盘圆心轴线上,并保证整个光栅呈水平放置。光纤两端固定点间距仍为  $L = 300 \text{ mm}$ ,若分度盘转动角度为  $\theta$ ,则位于光纤中央位置的光栅单位扭曲度,即光栅扭曲率为  $\eta = \theta/L$ 。当  $\eta > 0$ ,即  $\theta > 0$  时,表示给光栅施加顺时针扭曲;反之则表示给光栅施加逆时针扭曲。实验中所采用 R-LPFG 的光栅周期  $\Lambda_G = 570 \mu\text{m}$ ,周期数  $N = 50$ ,顺时针方向扭曲写入,扭曲

周期  $\Lambda_T = 46$  mm。整个实验过程在基本恒定的室温条件下进行，所采用的光谱仪为自带光源 HP86140A。当施加的扭曲率  $\eta$  从  $-2.4^\circ/\text{mm} \sim 6^\circ/\text{mm}$  变化时，R-LPFG 的传输谱如图 3 所示。

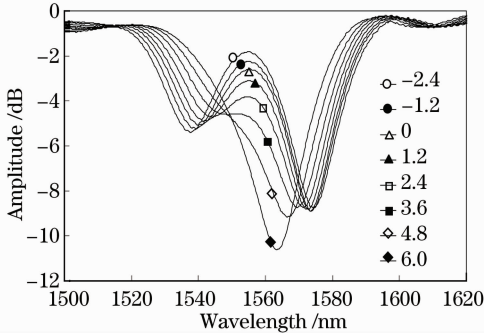


图 3 R-LPFG ( $\Lambda_T = 46$  mm) 在不同扭曲作用下的传输谱  
Fig. 3 Transmission spectrum of R-LPFG ( $\Lambda_T = 46$  mm) with different torsion

由图 3 可知，给光栅施加逆向(与原始写入方向相反)扭曲时，随着扭曲率  $\eta$  的增加，两谐振峰相互远离，波长间距随扭曲率  $\eta$  的增大而逐渐增大，这时施加的扭曲相当于增强了原来的扭曲应力作用。给光栅施加顺向(与原始写入方向相同)扭曲时，随着扭曲率  $\eta$  的增加，两分裂谐振峰相互靠拢，且当光栅扭曲到一定程度时，两分裂峰合并成一个，这时施加的扭曲相当于减弱了原来的扭曲作用。不同谐振峰的波长扭曲灵敏度不同，而在  $(40^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C})$  的温度范围内，两分裂谐振峰的温度灵敏度都约为  $0.07 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ <sup>[13]</sup>。因此，通过测量两分裂峰的距离可实现无需温度补偿的扭曲测量。

### 3 理论分析及讨论

由光纤的耦合模理论可知<sup>[14]</sup>，LPFG 的相位匹

配条件为

$$\lambda = (n_{co} - n_{cl})\Lambda, \quad (1)$$

式中  $n_{co}, n_{cl}$  分别表示光栅纤芯基模和包层模的有效折射率， $\Lambda$  为 LPFG 周期， $\lambda$  为谐振峰中心波长。在 R-LPFG 中，光波通过光栅时，受到光栅本身周期结构  $\Lambda_G$  以及扭曲结构  $\Lambda_T$  的调制(其中  $\Lambda_G \ll \Lambda_T$ )，模式之间会发生拍频现象，这样模式耦合时就会形成两个耦合波段的阻带，直观表现就是形成了两个不同的谐振峰，相应的光栅周期分别用  $\Lambda_+$  和  $\Lambda_-$  表示。于是拍频后生成的两个新的光栅空间频率分别为

$$\frac{1}{\Lambda_{\pm}} = \frac{1}{\Lambda_G} \mp \frac{1}{\Lambda_T}. \quad (2)$$

考虑到光栅的相位匹配条件(1)式，两谐振峰之间的间距可以表示为

$$\Delta\lambda_0 = (n_{co} - n_{cl})(\Lambda_+ - \Lambda_-) \approx 2 \frac{\Lambda_G}{\Lambda_T} \lambda_0. \quad (3)$$

由(3)式可知，对于光栅周期和中心波长一定的光栅，两分裂谐振峰的距离与扭曲周期近似成反比，峰距随着扭曲周期的增大而减小(即随着扭曲率的减小而减小)，这与图 2 所示的实验结果相符。这里需要指出的是，在图 2 中扭曲率较小(即  $\Lambda_T$  较大)时，如  $\Lambda_T = 76$  mm 和 60 mm，并没有产生峰分裂现象。实际上这时候 R-LPFG 也产生了分峰，只是因为扭曲率越小， $\Lambda_T$  越大时，两分裂峰的间隔距离  $\Delta\lambda_0$  就会越小，再加上 LPFG 的谐振峰带宽较宽(一般 40 nm 左右)，如果  $\Delta\lambda_0$  太小，分开的两峰重叠后，只会看到峰的漂移而不能辨别出分峰现象。如果增大光栅长度，即可减小谐振峰的带宽<sup>[14]</sup>，在相同扭曲度下，即可看到分峰。对于光栅周期为  $\Lambda_G = 0.57$  mm，扭曲周期  $\Lambda_T$  从 100 mm 变化到 30 mm 的 R-LPFG，由(3)式计算出 R-LPFG 两谐振峰分峰距离与扭曲周期的关系和实验结果的对比如图 4 所示。图

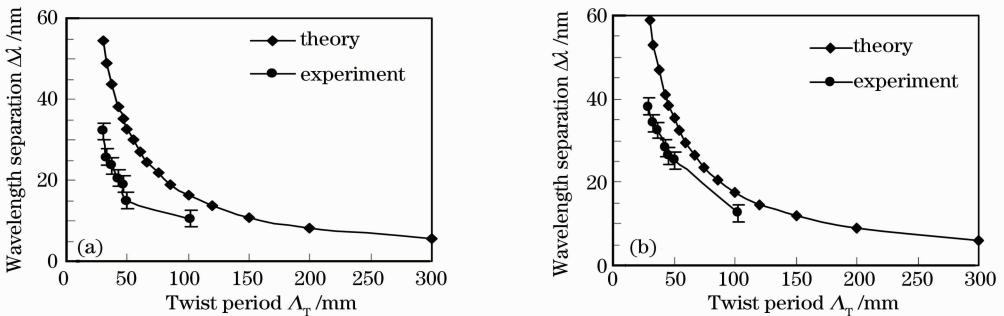


图 4 理论和实验所得 R-LPFG ( $\Lambda_G = 0.57$  mm) 两分裂谐振峰间距和扭曲周期的关系。(a) 波长较短的谐振峰 ( $\sim 1430$  nm); (b) 波长较长的谐振峰 ( $\sim 1550$  nm)

Fig. 4 Wavelength separation as a function of the twist period for R-LPFGs with  $\Lambda_G = 0.57$  mm obtained theoretically and experimentally for (a) resonance at the shorter wavelength ( $\sim 1430$  nm) and (b) resonance at the longer wavelength ( $\sim 1550$  nm)

中  $\Lambda_T = 100$  mm 的实验数据是在  $N = 100$  时得到的,其它的都是  $N = 50$  时得到的。从图中可以看出,实验结果变化趋势与理论相符,但是在相同扭曲周期下,分裂峰间隔距离的实际值要小于理论值,这是因为分开的两个具有一定带宽的分裂峰相互叠加所形成的结果。实验中使用偏振分析仪 PSGA-101 对该 R-LPFG 的偏振相关性进行了测量。结果表明,R-LPFG 的谐振峰分裂只与扭曲程度(即扭曲率或者扭曲周期)有关,而与偏振无关。

当给 R-LPFG 施加一个  $\eta$  的扭曲时,光栅的扭曲率变化约为  $\eta/360$ ,因此,两分裂谐振峰间距可以表示为

$$\Delta\lambda_0 = 2\Lambda_G\lambda_0\left(\frac{1}{\Lambda_T} - \frac{\eta}{360}\right) = 2\frac{\Lambda_G(360N - L\eta)}{360L}\lambda_0. \quad (4)$$

由(4)式可以看出, $\Delta\lambda_0$  随着施加的扭曲  $\eta$  ( $\eta > 0$ , 表示给光栅施加顺时针扭曲力; $\eta < 0$ , 表示给光栅施加逆时针扭曲力)线性变化。对于光栅周期为  $\Lambda_G = 0.57$  mm,扭曲周期为  $\Lambda_T = 46$  mm 的 R-LPFG,由(4)式,理论计算得出 R-LPFG 两谐振峰分峰距离与施加扭曲的关系,同实际得到的结果相比较,如图 5 所示。从图中可以看出,理论值和实验值两条曲线的斜率略有不同,这是由于理论计算中忽略了光栅扭曲时,T-LPFG 谐振峰中心波长  $\lambda_0$  变化对分裂峰距离的影响,由此也可以证明  $\lambda_0$  的影响较小。同时,由于分峰的能量分裂不均匀,使得给 R-LPFG 施加扭曲时,能量小的峰先消失,能量大的峰后消失,进而就造成了合拢时候的不均匀变化,这个时候误差会比较大。因此,可通过控制相应的参量(比如增加光栅的写入长度和光栅的扭曲率),使该 R-

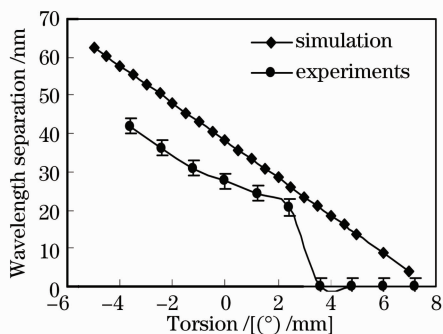


图 5 理论和实验所得 R-LPFG ( $\Lambda_G = 0.57$  mm,  $N = 50$ ,  $\Lambda_T = 46$  mm) 两分裂谐振峰间距和施加扭曲的关系

Fig. 5 Simulation and experimental results on relation of the wavelength separation and applied torsion of a 50-period R-LPFG with  $\Lambda_G = 0.57$  mm and  $\Lambda_T = 46$  mm

LPFG 很好地实现可辨方向的扭曲量测量。

## 4 结 论

在扭曲的单模光纤上利用高频  $\text{CO}_2$  激光制作的 LPFG,还原后会因为拍频现象而产生谐振峰分裂。本文研究了基于 R-LPFG 的传输谱和扭曲特性,并用拍频理论对此进行了解释和分析,实验结果和理论分析相吻合。R-LPFG 两谐振峰间距随着所加扭曲线性变化,因此可通过探测两分离谐振峰间距的增大或减小,来判别扭曲的方向和所受的扭曲量大小,更重要的是两分裂谐振峰之间的距离对温度不敏感,因此该传感器用作扭曲传感器时还可以克服温度对它的交叉影响。可以预见,这种全光纤扭曲传感器在实现高灵敏度扭曲传感上将具有较好的潜在应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 K. S. Chiang, Q. Liu. Long-period gratings for application in optical communications[C]. Proceedings of the 5th International Conference on Optical Communications and Networks and the 2nd International Symposium on Advances and Trends in Fiber Optics and Applications (ICOON/ATFO 2006) Chengdu, 2006, 128~133
- 2 S. W. James, R. P. Tatam. Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2003, **14**(5): R49~R61
- 3 C. Y. Lin, L. A. Wang, G. W. Chern. Corrugated long-period fiber gratings as strain, torsion and bending sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(8): 1159~1168
- 4 Y. Kondo, K. Nouchi, T. Mitsuyu *et al.*. Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(10): 646~648
- 5 G. Rego, O. Okhotnikov, E. Dianov *et al.*. High-temperature stability of long-period fiber gratings using an electric arc [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(10): 1574~1579
- 6 Y. J. Rao, Y. P. Wang, Z. L. Ran *et al.*. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency  $\text{CO}_2$  laser pulses [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(5): 1320~1327
- 7 Hu Aizi, Rao Yunjiang, Niu Yongchang. A novel tunable LPFG gain equalizer based on a bend insensitive fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 30~34  
胡爱姿, 饶云江, 牛永昌. 基于弯曲不敏感光纤的长周期光纤光栅可调谐增益均衡器 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 30~34
- 8 Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Bending sensing rules for long period fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1681~1685  
赵洪霞, 鲍吉龙, 陈莹. 长周期光纤光栅弯曲传感特性 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1681~1685
- 9 Wang Jiuling, Rao Yunjiang, Zhu Tao. High-temperature and strain characteristics of long period grating with asymmetric refractive index profile in the cross section of fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 389~392  
王久玲, 饶云江, 朱涛. 截面折变非对称型长周期光纤光栅高温应变特性 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 389~392
- 10 S. Oh, K. R. Lee, U. C. Paek *et al.*. Fabrication of helical

- long-period fiber gratings by use of a CO<sub>2</sub> laser[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(13): 1464~1466
- 11 Wang Yiping, Rao Yunjiang, Hu Aizi. A novel long-period fiber grating torsion sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1096~1099  
王义平, 饶云江, 胡爱姿. 长周期光纤光栅扭曲传感器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1096~1099
- 12 T. Zhu, Y. J. Rao, J. L. Wang *et al.*. Strain sensor without temperature compensation based on a LPFG with strongly rotary refractive index modulation [J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(21): 1132~1134
- 13 Song Yun, Zhu Tao, Rao Yunjiang. Simultaneous measurement of strain and temperature using a long-period fiber grating with rotary refractive index modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1129~1133  
宋 韵, 朱 涛, 饶云江等. 旋转折变型长周期光纤光栅实现应变和温度的同时测量[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1129~1133
- 14 Rao Yunjiang, Wang Yiping, Zhu Tao. Principles and Application of Fiber Gratings[M]. Beijing: Science Press, 2006. 253~259  
饶云江, 王义平, 朱 涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 253~259