

文章编号: 0253-2239(2010)07-1955-05

# 基于微弯效应的长周期光纤光栅的研究

陈成金<sup>1</sup> 周晓军<sup>1,2</sup> 兰 岚<sup>1</sup> 刘 东<sup>1</sup> 彭水海<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054  
<sup>2</sup> 电子科技大学宽带光纤传输与通信网络技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054)

**摘要** 用两个周期为 600  $\mu\text{m}$ , 齿宽为 200  $\mu\text{m}$  的周期性刻槽板彼此错开从上下两面单模光纤施压, 在光纤中形成了微弯式长周期光纤光栅。由于齿宽小于二分之一周期, 可产生更深的光纤微弯调制, 获得更大的交流交叉耦合系数。通过测量两个光栅长度分别为 6 cm 和 12 cm 的微弯式长周期光纤光栅在不同压力下的透射谱, 研究了峰值损耗、附加损耗、损耗谱半峰全宽与压力和光栅长度的关系。对于长 12 cm 的微弯式长周期光纤光栅, 在第一饱和压力点峰值损耗达到 19.2 dB, 损耗谱半峰全宽(FWHM)为 20 nm, 附加损耗只有 0.26 dB; 经过三次过耦合得到 34 dB 的峰值损耗。然后用理论结合实验数据分析发现当光纤所受压力小于饱和压力时, 光纤光栅交流交叉耦合系数与压力成正比。

**关键词** 光纤光学; 微弯长周期光纤光栅(MBLPFG); 微弯效应; 透射谱; 饱和压力

**中图分类号** TN235 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103007.1955

## Study on Long-Period Fiber Gratings Based on Micro-Bend Effect

Chen Chengjin<sup>1</sup> Zhou Xiaojun<sup>1,2</sup> Lan Lan<sup>1</sup> Liu Dong<sup>1</sup> Peng Shuihai<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

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

**Abstract** Micro-bend long period fiber gratings (MBLPFG) are presented by pressing a single mode fiber from double sides with two identical grooved plates whose pitch is 600  $\mu\text{m}$  and teeth width is 200  $\mu\text{m}$ . Because the teeth width is smaller than half pitch of the grooved plate, deeper micro-bend modulation in fiber can be made, and so a bigger “AC” cross-coupling coefficient can be achieved. By measuring the transmission spectra of two micro-bend long period fiber gratings with lengths of 6 cm and 12 cm, respectively, the relations between peak loss, out of band loss, full width at half maximum (FWHM) of loss ratio spectra with applied pressure for different grating length are investigated. For the micro-bend long period fiber grating of 12 cm length, near the first saturation pressure, the peak loss reaches 19.2 dB, the FWHM is 20 nm, out of band loss is only 0.26 dB. After over coupling out and back three times, a peak loss of 34 dB is achieved. Then, through analysis from theory and experimental data, it is found that the “AC” cross-coupling coefficient grows linearly with applied pressure, when the pressure on the fiber is less than saturation pressure.

**Key words** fiber optics; micro-bend long period fiber grating (MBLPFG); micro-bend effect; transmission spectra; saturation pressure

## 1 引 言

近些年来长周期光纤光栅(LPFG)由于没有后向反射的优点受到越来越多的重视, 国内外研究者

在 LPFG 理论与应用方面进行了大量的研究。Ashish M. Vengsarkar 等<sup>[1,2]</sup>在研究了光写入纤芯均匀折射率调制长周期光纤光栅的滤波特性之后,

收稿日期: 2009-05-31; 收到修改稿日期: 2009-07-23

作者简介: 陈成金(1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤光学方面的研究。E-mail: chchj125@yahoo.com.cn

导师简介: 周晓军(1955—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤光学和计算电磁学等方面的研究。

E-mail: xjzhou@uestc.edu.cn(通信联系人)

又将其用于掺铒光纤放大器(EDFA)增益平坦器; Vikram Bhatia 等<sup>[3]</sup>利用 LPFG 的对温度、张力和环境温度敏感特性进行了传感基础研究;赵洪霞等<sup>[4,5]</sup>用耦合模理论和微扰近似法研究了弯曲曲率对 LPFG 透射谱特性的影响及 LPFG 的弯曲传感特性;此外廖弦等<sup>[6]</sup>还研究了 LPFG 的法布里-珀罗温度-应变组合传感器;将掺铒光纤连接 LPFG 对还可以构成新型光开关<sup>[7]</sup>。

LPFG 最为常用的制作方法有紫外光振幅掩模法<sup>[1]</sup>、CO<sub>2</sub> 激光逐点写入法<sup>[8]</sup>、电弧加热微弯法<sup>[9]</sup>和包层蚀刻法等,但是这些方法的制作过程复杂,设备昂贵。此外一种简单的基于微弯效应的长周期光纤光栅<sup>[10]</sup>受到越来越多的关注。近些年来,各种在单模光纤中形成微弯式长周期光纤光栅(MBLPFG)的方法不断出现。其中使用一个周期性刻槽板和一个平板<sup>[11]</sup>,或周期性地粘有圆柱棒的平板-平板<sup>[12]</sup>,或两个具有相同周期性结构的刻槽板<sup>[13]</sup>从两面挤压光纤形成 MBLPFG 的方法具有代表性,光栅的谐振波长、峰值损耗和带宽均可调节。上述三种方法都基于共同的原理:光纤在受到挤压时,纤芯和包层被周期性地压缩和拉伸,基于微弯效应形成 MBLPFG。后一种方法由于有两个刻槽板,并且彼此错开,使光纤更容易微弯,但是由于齿宽大于半周期,光纤形变量较小,光栅很难获得大的交流交叉耦合系数。在文献[13]报道的实验条件下,谐振波长 1550 nm 处的最大损耗只有 3.47 dB,难以达到良好的滤波效果。

为了改进基于微弯效应的长周期光纤光栅的滤波特性,提出了采用两个完全一致的周期性刻槽板,但齿宽仅为周期的三分之一,彼此错开半个周期,从上下两面同时挤压单模光纤的方法形成 MBLPFG。这种方法更容易形成微弯式长周期光纤光栅,并且有更大的交流交叉耦合系数。实验结果表明,谐振波长 1550 nm 处,第一饱和压力点损耗达到 19.2 dB;第三饱和压力点损耗达到 34 dB,进而实现了更强的、可调节的滤波功能。对这种器件透射谱的谐振波长、峰值损耗和附加损耗等工作性能及其影响因素进行了深入的研究,并得到交流交叉耦合系数与压力的关系。

## 2 工作原理

在长周期光纤光栅中,由于空间周期  $\Lambda$  为几百微米的折射率调制使纤芯导模的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  与同向传输的第  $m$  阶包层模有效折射率  $n_{\text{cl}}^m$  之间满足以下相位匹配条件<sup>[1]</sup>:

$$\lambda_m = (n_{\text{eff}} - n_{\text{cl}}^m)\Lambda, \quad (1)$$

使谐振波长  $\lambda_m$  处的入射光从纤芯导模向包层模发生强烈耦合。耦合到包层模中的光,由于吸收、散射以及辐射逐渐损耗,在透射谱中每个谐振波长附近均产生一个凹谷。长周期光纤光栅的透射率为  $T(\lambda) = I_{\text{out}}(\lambda)/I_{\text{in}}(\lambda)$ 。若只考虑纤芯导模与其中一个包层模之间的耦合,根据耦合模理论<sup>[14]</sup>在谐振波长处的透射率和损耗率分别为

$$T(\lambda_m) = \cos^2(\kappa L), \quad (2)$$

$$P(\lambda_m) = 1 - T(\lambda_m) = \sin^2(\kappa L), \quad (3)$$

式中  $\kappa$  为光栅交流交叉耦合系数, $L$  为光栅长度。由(3)式可知在  $L$  一定的情况下,当  $0 < \kappa L < \pi/2$  时为欠耦合,损耗率随  $\kappa$  增加而增大;当  $\pi/2 < \kappa L$  时发生过耦合,损耗率随  $\kappa$  增加而减小;若  $\kappa$  继续增大,损耗率出现正弦式周期起伏。

如图 1 所示,实验中的 MBLPFG 是用两个相同的周期性刻槽板(周期 600  $\mu\text{m}$ ,齿宽 200  $\mu\text{m}$ ,槽深大于 400  $\mu\text{m}$ )彼此错开半个周期从两面相对对一根光纤垂直施压,使光纤产生周期性微弯,进而使光纤折射率受到周期性扰动而形成的,它也具有类似于传统光写入 LPFG 的基本特性。由于压齿宽度小于半周期,与单面施压方法相比此方法使光纤更容易发生微弯,且压力越大光纤微弯越大,因而此种光栅可以具有更大的交流交叉耦合系数。

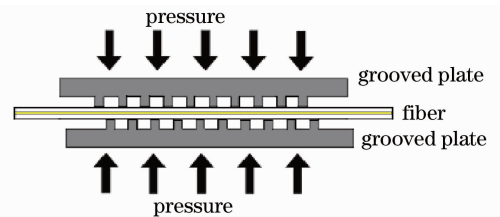


图 1 MBLPFG 侧视图

Fig. 1 Side view of a MBLPFG

对于这种 MBLPFG,在形变量很小时  $\kappa$  与光纤弯曲角度  $\theta$  成正比<sup>[15]</sup>

$$\kappa = 2\pi^2 n(1 - \chi) \frac{\theta}{\lambda} \int E_{\text{co}}(r) E_{\text{cl}}(r) r^2 dr, \quad (4)$$

式中  $n$  为光纤折射率, $\chi$  为由于微弯导致的光纤折射率改变量(取 0.22), $E_{\text{co}}$  和  $E_{\text{cl}}$  分别表示纤芯导模和包层模的电场径向分布。由于光纤的弯曲角度很小, $\theta$  与压力近似成正比,所以  $\kappa$  也随压力线性增加。

## 3 MBLPFG 特性研究

图 2 为 MBLPFG 透射谱测量系统,它由光纤、施力装置、宽谱光源和光谱分析仪组成。实验采用 Corning G. 652D 光纤。

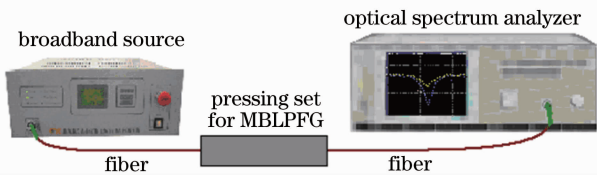


图 2 MBLPFG 透射谱测量系统示意图

Fig. 2 Measuring system of MBLPFG transmission spectra

### 3.1 MBLPFG 谐振波长与空间周期的关系

图 3 为 MBLPFG 的谐振波长与空间周期之间的关系曲线,由图可见谐振波长在 1520~1600 nm 范围内与空间周期  $\Delta$  近似呈线性关系,曲线的斜率

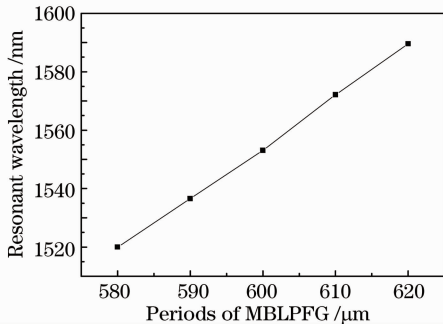


图 3 不同周期 MBLPFG 的谐振波长

Fig. 3 Resonant wavelengths of MBLPFG with different periods

为 17 nm/10  $\mu\text{m}$ 。这种现象是因为在空间周期变化很小的情况下,纤芯导模与包层模有效折射率之差基本不变,  $\lambda_m$  与  $\Delta$  近似呈(1)式所示的正比关系。

### 3.2 MBLPFG 特性与压力的关系

由图 3 可知,周期为 600  $\mu\text{m}$  时,MBLPFG 谐振波长在 1550 nm 附近,下面重点研究该周期的 MBLPFG 特性。图 4(a)为  $L=6\text{ cm}$  的 MBLPFG(光栅 1)在不同压力下的透射谱。图中纵坐标为透射率  $T(\lambda)_{\text{dB}} = 10 \lg[T(\lambda)]$ 。可以看到谐振波长变化较小;峰值损耗[谐振波长处的损耗,即  $-T(\lambda_m)_{\text{dB}}$ ]先随压力的增加而增大;在压力超过一定值(饱和压力)后峰值损耗有所回落,这就是前节所述的过耦合现象;附加损耗(远离谐振波长处的损耗)随压力持续增加。图 4(b)为 MBLPFG 的损耗谱,纵坐标为损耗率:  $P(\lambda) = 1 - 10^{0.1 \times T(\lambda)_{\text{dB}}}$ 。若  $P(\lambda_{1,2}) = P(\lambda_m)/2$ ,则损耗谱的半峰全(FWHM)宽为  $\lambda_2 - \lambda_1$ 。由此可见该光栅的透射率、峰值损耗、附加损耗和半峰全宽等都与压力有关。

### 3.3 MBLPFG 特性与光栅长度的关系

当空间周期仍为 600  $\mu\text{m}$  时,  $L=12\text{ cm}$  的 MBLPFG(光栅 2)在不同压力下的透射谱和损耗谱如图 5(a),(b)所示。各项参数随压力的变化趋势与光栅 1 类似。

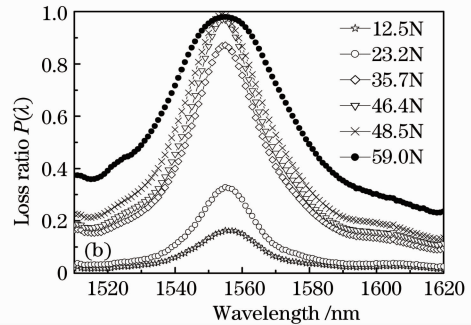
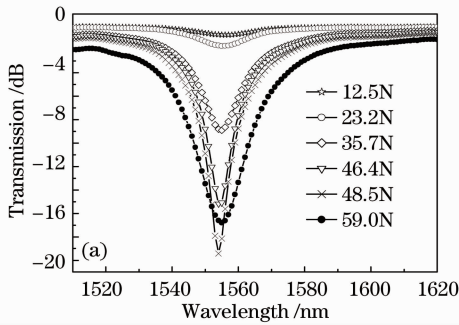


图 4 光栅 1 在不同压力下的透射谱(a)和损耗谱(b)

Fig. 4 Normalized transmission spectra (a) and loss ratio spectra (b) of grating 1 under different pressures

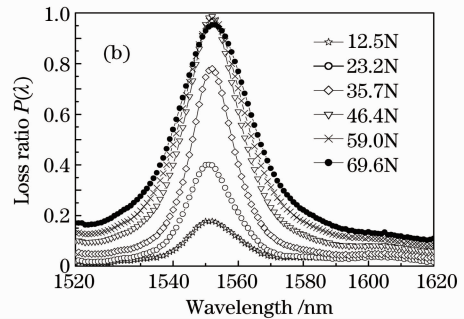
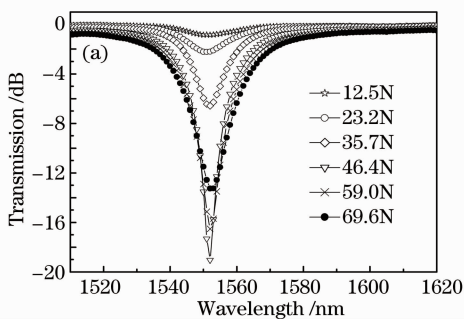


图 5 光栅 2 在不同压力下的透射谱(a)和损耗率谱(b)

Fig. 5 Normalized transmission spectra (a) and loss ratio spectra (b) of grating 2 under different pressures

为了更深入地研究光栅长度对其性能的影响,表1对光栅1和光栅2在欠耦合状态的一些性能进行了对比,有如下规律:

1)在压力增加过程中,光栅1的谐振波长向短波长漂移2 nm,而光栅2由于光纤形变较弱谐振只波动0.3 nm,这种特性优于光写入光栅<sup>[16]</sup>;峰值损耗持续增加;光纤弯曲附加损耗也逐渐增加,离谐振波长越远附加损耗越小;损耗谱的半峰全宽先因光栅调制加强而减小,之后由于出现辐射模而增加。

表1 光栅1和光栅2性能对比

Table 1 Comparison of Grating 1 and Grating 2

|                        | Pressure /N | Resonant wavelength /nm | Peak loss /dB | FWHM /nm | Loss at 1620 nm /dB | Saturation pressure /N |
|------------------------|-------------|-------------------------|---------------|----------|---------------------|------------------------|
| Grating 1<br>(L=6 cm)  | 12.5        | 1556.5                  | 0.783         | 24.1     | 0.063               | 48.5                   |
|                        | 23.2        | 1555.1                  | 1.731         | 20.6     | 0.11                |                        |
|                        | 35.7        | 1554.8                  | 8.913         | 27.55    | 0.43                |                        |
|                        | 46.4        | 1554.4                  | 15.33         | 28.05    | 0.527               |                        |
| Grating 2<br>(L=12 cm) | 12.5        | 1551.6                  | 0.863         | 19.15    | 0.07                | 49.0                   |
|                        | 23.2        | 1551.5                  | 2.236         | 17.5     | 0.071               |                        |
|                        | 35.7        | 1551.8                  | 6.59          | 16.05    | 0.151               |                        |
|                        | 46.4        | 1551.8                  | 19.20         | 20.25    | 0.264               |                        |

从表1可知,对于光栅2当施加46.4N的压力时,峰值损耗达19.2 dB,带宽为20 nm,附加损耗只有0.26 dB,可以用作带阻滤波器。另外从前面的分析可知由于这种MBLPFG具有良好的可调性。选择适当的周期、周期数和压力可以获得恰当的谐振波长(如1530 nm),带宽(如10 nm)和峰值损耗(如10 dB),这种特性使其能够将EDFA增益谱中凸起的部分滤去,使增益谱变得平坦,减小放大信号的失真,因此可以用作EDFA的增益平坦器<sup>[17]</sup>。

### 3.4 MBLPFG的过耦合特性

对上述光栅2通过加大压力增加调制深度得到的峰值损耗和对应的损耗率与压力之间的关系如图6所示。在压力小于49N时,峰值损耗随所受压力逐渐增加;当压力大于49N时峰值损耗出现第一次下降,压力等于49N的点称为第一饱和压力点,即部分包层中的光又被耦合回纤芯中。在压力继续增加时,峰值损耗呈波浪式起伏。这是由于这种双面交叉施压的方法可以使光纤发生更大的形变,随着压力增大使交流交叉耦合系数 $\kappa$ 持续增加,由(3)式可知损耗率是 $\kappa L$ 的周期函数,因而峰值损耗出现起伏。但是由于光在包层模中存在吸收、散射等损耗,加上光纤弯曲导致纤芯导模向辐射模耦合的加强,压力增大使得峰值损耗不能回到零点,而是波浪式上升。在第三饱和压力点峰值损耗达到34 dB,即谐振波长处残

留在纤芯中的光不足0.1%。从峰值损耗率的变化趋势来看,在饱和压力之前,峰值损耗率近似随压力近似线性增加,所以可用作压力传感器;当压力大于饱和压力后,损耗率在0.9以上波动,逐渐趋近1,即光纤中绝大部分光在达到饱和压力之前就已经损失了,作滤波器可达到好的效果。

2)在压力相同时,由于光栅2每个周期平均压力较小,光纤弯曲程度较弱,所以附加损耗也较小;由于周期数多于光栅1,半峰全宽减小了几纳米;峰值损耗和饱和压力变化不大,因为虽然 $\kappa$ 减小了,但是 $\kappa$ 和 $L$ 的乘积几乎不变。

3)在每个周期的平均压力相同时,光栅2的峰值损耗大大增加,因为 $\kappa$ 相同,但由于 $L$ 增大1倍,即 $\kappa L$ 增加1倍,由(3)式可知损耗率增加;同时光纤弯曲个数增加使得因辐射引起的附加损耗也明显增加。

留在纤芯中的光不足0.1%。从峰值损耗率的变化趋势来看,在饱和压力之前,峰值损耗率近似随压力近似线性增加,所以可用作压力传感器;当压力大于饱和压力后,损耗率在0.9以上波动,逐渐趋近1,即光纤中绝大部分光在达到饱和压力之前就已经损失了,作滤波器可达到好的效果。

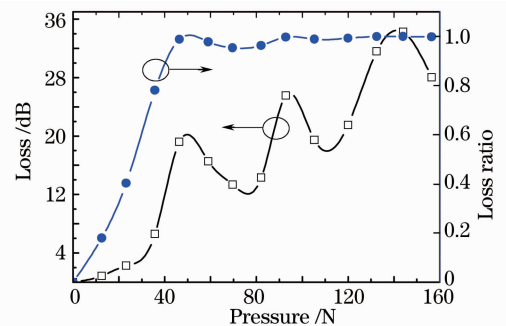


图6 峰值损耗和峰值损耗率随压力的变化关系  
Fig. 6 Peak loss and peak loss ratio versus applied pressures

图7为附加损耗随压力变化的趋势图。由于远离谐振波长, $\kappa$ 很小,仍然处于欠耦合状态,所以1510 nm和1620 nm处的损耗随压力继续增加;由于1620 nm较之1510 nm更远离谐振波长,交流交叉耦合系数较小,所以损耗更小;在压力小于70N时,1620 nm处附加损耗小于0.5 dB。如果在对光纤施压之前将光纤拉紧,可以进一步减小附加损耗。

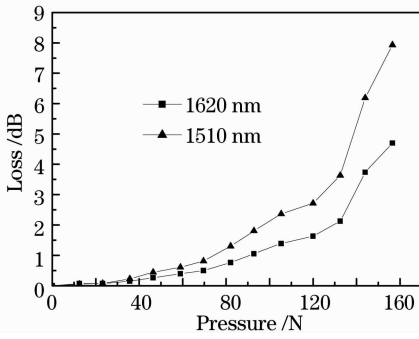


图 7 1510 nm 和 1620 nm 处附加损耗同压力的关系

Fig. 7 Additional loss at 1510 nm and 1620 nm versus applied pressures

由(3)式求得在欠耦合状态时光栅的交流交叉耦合系数为： $\kappa = \arcsin(\sqrt{P})/L$ 。再根据图 6 中的峰值损耗率代入上式求出交流交叉耦合系数  $\kappa$ ，得到  $\kappa$  与对应压力的关系，如图 8 所示。可见在压力小于饱和压力时两者呈现很好的线性关系，这验证了(4)式所示的 MBLPFG 的形成机理为光纤的周期性微弯效应。

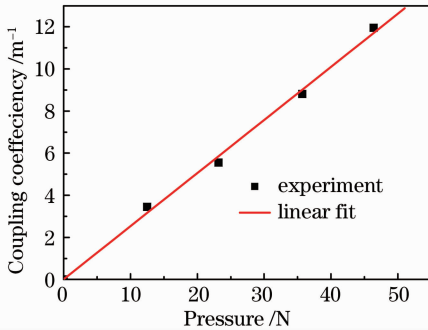


图 8 交流交叉耦合系数  $\kappa$  与压力的关系

Fig. 8 “AC” cross-coupling coefficient  $\kappa$  versus applied pressures

## 4 结 论

通过实验研究了基于微弯效应的长周期光纤光栅的特性。发现这种光纤光栅透射谱中的谐振波长、各波长透射损耗以及损耗谱的半峰全宽都可以分别用空间周期、压力和光栅长度进行调节；长度 12 cm 的 MBLPFG 在接近第一饱和压力点时，峰值损耗达 19 dB，带宽为 20 nm，附加损耗仅 0.26 dB；在第三饱和压力点时，峰值损耗达到 34 dB；附加损耗随压力增加而持续增加；通过计算得到欠耦合状态下光栅交流交叉耦合系数与压力的关系。

综上，这种 MBLPFG 与传统光写入长周期光纤光栅相比，由于有很好的可调性和可重构性，可在光纤带阻滤波器、EDFA 的增益平坦器和压力传感

器等方面得到广泛的应用。

## 参 考 文 献

- 1 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
- 2 A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins *et al.*. Long-period fiber-grating-based gain equalizers [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(5): 336~338
- 3 V. Bhatia, A. M. Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensor [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9): 692~694
- 4 Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Effect of bend curvature on transmission spectra of long-period fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 722~725
- 5 Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Bending sensing rules for long-period fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1681~1685
- 6 Liao Xian, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Simultaneous measurement of high-temperature and strain using a combined long-period fiber grating/fabry-perot sensor fabricated by laser pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 884~888
- 7 Li Chunfei, Zang Zhigang. Optical switching in a nonlinear-fiber connected long-period fiber grating Pair [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1919~1923
- 8 D. D. Davis, T. K. Gaylord, E. N. Glytsis *et al.*. Long period fiber grating fabrication with focused CO<sub>2</sub> laser beams [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(3): 302~303
- 9 I. K. Hwang, S. H. Yun, B. Y. Kim. Long-period fiber gratings based on periodic microbends [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(18): 1263~1265
- 10 C. B. Probst, A. Bjarklev, S. B. Andreasen. Experimental verification of microbending theory using mode coupling to discrete cladding modes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(1): 55~61
- 11 S. Savin, M. J. Dignonnet, G. S. Kino *et al.*. Tunable mechanically induced long-period fiber gratings [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(10): 710~712
- 12 I. Sohn, J. Kim, N. Lee *et al.*. Tunable gain-flattening filter using long-period fiber grating based on periodic core deformation [C]. *SPIE*, 2001, **4594**: 110~116
- 13 Chung-Yih Tang, Paoyi Tseng, Chih-Nan Lin *et al.*. Long-period fiber grating effects with double-sided loading on fiber [C]. *SPIE*, **4904**: 104~108
- 14 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 15 J. N. Blake, B. Y. Kim, H. E. Engan *et al.*. Analysis of intermodal coupling in a two-mode fiber with periodic microbends [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **24**(4): 281~283
- 16 Wang Jiuling, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. Refractive index characteristic for edge-written long-period fiber gratings induced by CO<sub>2</sub> laser pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1730~1734
- 17 I. B. Sohn, J. W. Song. Gain flattened and improved double-pass two-stage EDFA using microbending long-period fiber gratings [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **236**(1-3): 141~144