

文章编号: 0258-7025(2008)05-0722-04

# 弯曲曲率对长周期光纤光栅透射谱特性的影响

赵洪霞 鲍吉龙 陈莹

(宁波工程学院电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315016)

**摘要** 报道了一种分析长周期光纤光栅(LPFG)透射谱谐振波长和衰减率随弯曲曲率变化的方法。利用耦合模理论和微扰近似推导了长周期光纤光栅透射谱随弯曲曲率变化的一般表达式,得到当弯曲曲率为 $2.56 \text{ m}^{-1}$ 时,长周期光纤光栅透射谱分裂,分裂峰的谐振波长和衰减率与弯曲曲率呈非线性变化,但分裂峰的间距与弯曲曲率呈线性变化。利用 B-Ge 共掺单模光纤写入的长周期光纤光栅证实了理论的正确性,且具有很好的重复性。

**关键词** 光纤光学;长周期光纤光栅;弯曲曲率;谐振波长;衰减率

**中图分类号** TP 212.14 **文献标识码** A

## Effect of Bending Curvature on Transmission Spectra of Long Period Fiber Gratings

Zhao Hongxia Bao Jilong Chen Ying

(Electronic and Information Engineering College, Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315016, China)

**Abstract** A method to analyze the resonant wavelength and damping decrement of the transmission spectrum of long period fiber grating (LPFG) with bending curvature was reported. Based on coupled mode theory and perturbation approximation, the general expression of transmission spectrum of LPFG according to bend curvature is deduced. Furthermore, the transmission spectrum of the bended LPFG is found to be splitting when the bending curvature is  $2.56 \text{ m}^{-1}$ . The resonant wavelength and decrement of the split peaks change nonlinearly with the bending curvature, but the distance between split peaks changes linearly with the bending curvature. The LPFG written on the B-Ge co-doping single mode fiber proves the theory.

**Key words** fiber optics; long period fiber grating; bending curvature; resonant wavelength; decrement

## 1 引言

在许多工程应用领域,诸如新型复合材料开发和应用、直升机转叶设计和状态监测、传输线路状态监测、机器人操纵、人体姿态探测、太空勘探设备开发等,不仅需要连续地、长期可靠地获取温度、应变等参数的变化,更需要得到其弯曲曲率的变化信息。长周期光纤光栅(LPFG)是近几年出现的一种光纤无源带阻滤波器件,其具有无后向反射、全兼容于光纤、体积小和可埋入智能材料等优点以及更好的温度、压力、折射率和弯曲传感特性<sup>[1~5]</sup>,因此越来越引起人们的广泛关注。本文利用耦合模理论和微扰近似分析,得到了长周期光纤光栅弯曲传感特性的一般表达式,并加以实验验证。

## 2 理论分析

根据同步近似,长周期光纤光栅的模式耦合方程可近似表示为<sup>[6]</sup>

$$\frac{dR}{dz} = i\hat{\sigma}R(z) + ikS(z), \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dz} = -i\hat{\sigma}S(z) + ik^*R(z), \quad (2)$$

式中  $R$  和  $S$  为纤芯基模和同向包层模的衰减率,  $\hat{\sigma}$  和  $k$  为直流自耦合系数和模式间的交流交叉耦合系数。

当直流自耦合系数  $\hat{\sigma} = 0$  时,长周期光纤光栅的交叉耦合率达到最大值,即

$$t_{\max} = \sin^2(kL_g),$$

$L_g$  为纤芯基模和包层模之间的耦合长度,此时纤芯

收稿日期:2007-09-11;收到修改稿日期:2007-11-12

基金项目:浙江省自然科学基金(X106864)和宁波市自然科学基金(2007A610016)资助项目。

作者简介:赵洪霞(1970—),女,黑龙江人,副教授,主要从事光纤传感和光纤通信方面的研究。E-mail:zhx-1228@163.com

基模耦合到包层模的谐振波长为<sup>[7]</sup>

$$\lambda_{\text{res}} = \frac{1}{1 - (\sigma_{kj}^{\text{co}} - \sigma_{kj}^{\text{cl}})(\Delta/2\pi)} \lambda_D, \quad (3)$$

$\Delta$  和  $\lambda_D$  为长周期光纤光栅的栅格周期和设计波长 (即光纤有效折射率调制无限小时的谐振波长)。

对于折射率调制只发生在纤芯的均匀单模长周期光纤光栅, 包层的折射率调制很小, 即  $\sigma_{kj}^{\text{co}} \gg \sigma_{kj}^{\text{cl}}$ , 因此(3)式可化简为

$$\lambda_{\text{res}} = \frac{1}{1 - \sigma_{kj}^{\text{co}}(\Delta/2\pi)} \lambda_D. \quad (4)$$

当长周期光纤光栅弯曲时, 弯曲对其影响发生在两个方面: 一是使长周期光纤光栅中每一个被调制的折射率横截面发生倾斜, 即栅格周期变小, 而栅格周期远小于弯曲半径, 则可认为  $\Delta$  不变; 二是使光纤变成了弯曲波导。

当光纤变为弯曲波导时, 内应变导致纤芯基模的两线偏振模传播常数不同, 因而产生线双折射, 即一个透射峰分裂为两个。在纯弯曲情况下,  $y$ 轴方

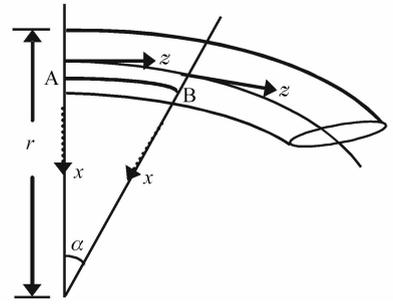


图 1 弯曲光纤示意图

Fig. 1 Schematic plan of bending fiber

向的压应力和  $z$  轴方向的拉应力远小于  $x$  轴方向的压应力, 忽略  $y$  轴方向和  $z$  轴方向的应力, 且由于光纤半径远小于弯曲曲率半径, 可设光纤弯曲时原来的横截面仍为平面 (如图 1 所示), 则  $x$  轴方向的应力为<sup>[8]</sup>

$$\sigma_x = -E_x^2/(2r^2),$$

$E$  为光纤材料的杨氏模量,  $r$  为曲率半径。

再利用公式

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu)/E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu)/E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu)/E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}$$

可得应变与应力分量成正比

$$s_1 = \frac{\sigma_x}{E}, \quad s_2 = s_3 = -\frac{\nu \sigma_x}{E}, \quad s_4 = s_5 = s_6 = 0,$$

式中  $\nu$  为泊松比。

根据弹光效应, 利用矩阵

$$\begin{bmatrix} \Delta b_1 \\ \Delta b_2 \\ \Delta b_3 \\ \Delta b_4 \\ \Delta b_5 \\ \Delta b_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (p_{11} - p_{12})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (p_{11} - p_{12})/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (p_{11} - p_{12})/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \end{bmatrix}$$

可求出相对介电抗渗张量各分量的变化分别为

$$\Delta b_1 = p^1 \frac{x^2}{r^2}, \quad \Delta b_2 = \Delta b_3 = p^{11} \frac{x^2}{r^2},$$

其中  $p^1 = \frac{1}{2}(p_{11} - 2\nu p_{12}), \quad p^{11} = \frac{1}{2}(p_{12} - \nu p_{11} - \nu p_{12}),$

因弹光效应的影响是一个微小量, 介电系数张量元可近似为

$$\Delta \epsilon_1 = -\epsilon_0 n^2 \left( n^2 p^1 \frac{x^2}{r^2} \right) + \epsilon_0 n^2 \left( n^2 p^{11} \frac{x^2}{r^2} \right)^2,$$

$$\Delta\epsilon_2 = \Delta\epsilon_3 = -\epsilon_0 n^2 \left( n^2 p^{11} \frac{x^2}{r^2} \right) + \epsilon_0 n^2 \left( n^2 p^{11} \frac{x^2}{r^2} \right)^2, \quad \Delta\epsilon_4 = \Delta\epsilon_5 = \Delta\epsilon_6 = 0,$$

式中  $n$  为光纤折射率,  $p_{11}$  和  $p_{12}$  为弹光系数张量元, 将介电系数张量元代入交流耦合系数公式

$$k_{kj} = \frac{\omega}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{\mu}^* \cdot (\Delta\epsilon \cdot E_{\nu}) dx dy$$

$\omega$  为光波频率,  $E_{\mu}$  和  $E_{\nu}$  为理想圆单模光纤未扰动时两个本征模场振幅。在远离截止条件下, 场集中在纤芯中, 积分只需在纤芯截面内进行。计算结果为

$$k_{12} = k_{21} = 0,$$

$$k_{11} = \frac{\beta}{2} \left( \frac{a}{u} \right)^4 \left( n^2 p^{11} \frac{1}{r^2} \right)^2 - \frac{\beta}{2} \left( \frac{a}{u} \right)^2 \left( n^2 p^{11} \frac{1}{r^2} \right) - \frac{3}{4} \frac{1}{\beta} \left( n^2 p^{11} \frac{1}{r^2} \right) + \frac{3}{4} \frac{1}{\beta} \left( \frac{a}{u} \right)^2 \left( n^2 p^{11} \frac{1}{r^2} \right)^2,$$

$$k_{22} = \frac{\beta}{2} \left( \frac{a}{u} \right)^4 \left( n^2 p^{11} \frac{1}{r^2} \right)^2 - \frac{\beta}{2} \left( \frac{a}{u} \right)^2 \left( n^2 p^{11} \frac{1}{r^2} \right) - \frac{3}{4} \frac{1}{\beta} \left( n^2 p^{11} \frac{1}{r^2} \right) + \frac{3}{4} \frac{1}{\beta} \left( \frac{a}{u} \right)^2 \left( n^2 p^{11} \frac{1}{r^2} \right)^2,$$

因弯曲曲率  $\rho = 1/r$ , 则

$$k_{11} = \frac{\beta}{2} \left( \frac{a}{u} \right)^4 \left( n^2 p^{11} \rho^2 \right)^2 - \frac{\beta}{2} \left( \frac{a}{u} \right)^2 \left( n^2 p^{11} \rho^2 \right) - \frac{3}{4} \frac{1}{\beta} \left( n^2 p^{11} \rho^2 \right) + \frac{3}{4} \frac{1}{\beta} \left( \frac{a}{u} \right)^2 \left( n^2 p^{11} \rho^2 \right)^2,$$

$$k_{22} = \frac{\beta}{2} \left( \frac{a}{u} \right)^4 \left( n^2 p^{11} \rho^2 \right)^2 - \frac{\beta}{2} \left( \frac{a}{u} \right)^2 \left( n^2 p^{11} \rho^2 \right) - \frac{3}{4} \frac{1}{\beta} \left( n^2 p^{11} \rho^2 \right) + \frac{3}{4} \frac{1}{\beta} \left( \frac{a}{u} \right)^2 \left( n^2 p^{11} \rho^2 \right)^2,$$

$a, \beta$  分别为纤芯半径与光波的纵向传播常数, 而  $u = \sqrt{k^2 n^2 - \beta^2} a$ , 又因为<sup>[7]</sup>

$$\sigma_{11}^{\text{co}} = k_{11} / \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi z}{\Lambda} \right) \right],$$

$$\sigma_{22}^{\text{co}} = k_{22} / \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi z}{\Lambda} \right) \right],$$

得弯曲后两个分裂峰的谐振波长和衰减率分别为

$$\lambda_{\text{res1}} = \frac{1}{1 - \sigma_{11}^{\text{co}}(\Lambda/2\pi)} \lambda_{\text{D}}, \quad (5)$$

$$\lambda_{\text{res2}} = \frac{1}{1 - \sigma_{22}^{\text{co}}(\Lambda/2\pi)} \lambda_{\text{D}}, \quad (6)$$

$$t_{\text{max1}} = \sin^2(k_{11} L_{\text{g}}), \quad (7)$$

$$t_{\text{max2}} = \sin^2(k_{22} L_{\text{g}}). \quad (8)$$

为了方便分析和定量讨论弯曲长周期光纤光栅分裂峰谐振波长和衰减率与弯曲曲率的关系, 在下面的讨论和计算中均设  $n = 1.458$ ;  $a = 1.45 \mu\text{m}$ ;  $p_{11} = 0.12$ ;  $p_{12} = 0.27$ ;  $\nu = 0.17$ ;  $\Lambda = 450 \mu\text{m}$ ;  $\lambda_{\text{D}}$

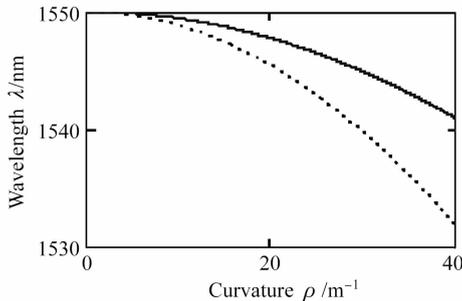


图2 分裂峰谐振波长与弯曲曲率的关系

Fig. 2 Resonance wavelength of the split peaks versus bending curvature

$= 1.55 \mu\text{m}$ ;  $u = 16.8$ ;  $\beta = 5.9/\mu\text{m}$ .

由(5)和(6)式得到两个分裂峰的谐振波长与弯曲曲率的关系如图2所示。由图可知, 当弯曲曲率为  $2.56 \text{ m}^{-1}$  时, 透射峰分裂, 一个透射峰分裂为两个, 两个分裂峰的谐振波长随弯曲曲率的增大同时蓝移, 并且分裂峰谐振波长与弯曲曲率成很好的二次曲线关系。但两分裂峰的间距呈增大趋势。

图3为(7)和(8)式所确定的两个分裂峰的衰减率与弯曲曲率的关系曲线, 由图可知, 随着弯曲曲率的增大, 两个分裂峰衰减率增大, 但增大的幅度不同。

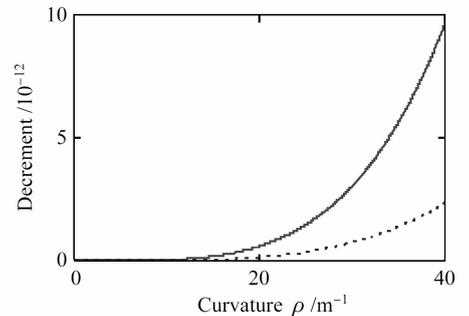


图3 分裂峰衰减率与弯曲曲率之间的关系

Fig. 3 Decrement of split peaks versus bending curvature

### 3 实验结果

实验中所用的长周期光纤光栅是利用周期为  $450 \mu\text{m}$  的不锈钢幅度模板, B-Ge 共掺的单模光敏光纤在  $248 \text{ nm}$  准分子激光照射下制成的。在室温且不弯曲不受力情况下的透射谱如图4所示, 其透射峰谐振波长  $\lambda = 1541.6 \text{ nm}$ , 衰减率为  $4.212 \text{ dB}$ 。

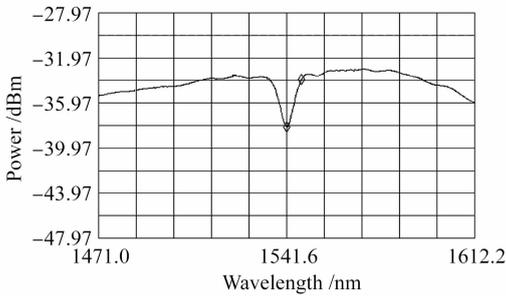


图 4 长周期光纤光栅透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum of the LPFG

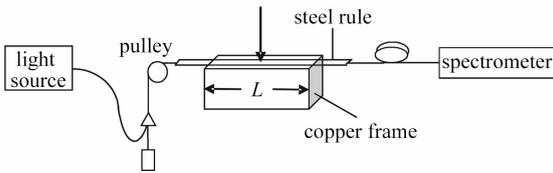


图 5 长周期光纤光栅弯曲特性测试装置

Fig. 5 Experimental installation for bending characteristics test of LPFG

为了测试长周期光纤光栅弯曲特性,设计了如图 5 所示的实验装置。长周期光纤光栅所在光纤的一端粘在弹性很好的不锈钢钢尺上,钢尺粘光栅面朝下放置于间距为  $L$  的长方形铜架上,并使长周期光纤光栅位于铜架两个支点的中间,长周期光纤光栅的另一端通过一个滑轮后悬挂重物使光纤始终处于绷紧状态,以至长周期光纤光栅紧贴于钢尺的下表面,但又不致于产生较大的轴向拉力,利用千分尺在钢尺中央施压使长周期光纤光栅弯曲。由图可知弯曲曲率  $\rho = 8h / (4h^2 + L^2)$ ,  $h$  为千分尺读出的  $L/2$  处光栅的弯曲量(单位 mm);  $L = 22$  cm。逐点记录光谱仪显示的光栅透射谱谐振峰峰值波长及衰减率和千分尺显示的弯曲量,同时保证实验基本在恒温下进行。

实验发现,弯曲初期,透射谱谐振波长几乎不变,衰减率逐渐减小。当弯曲曲率增大到  $2.69 \text{ m}^{-1}$  时,透射谱衰减率大幅减小,同时一个透射峰分裂为

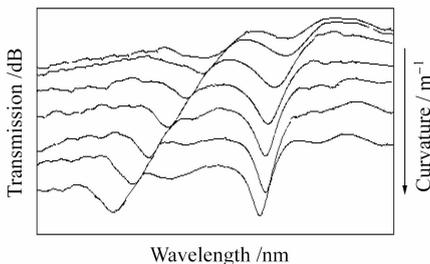


图 6 两分裂峰的透射谱变化

Fig. 6 Transmission spectrum variation of the split peaks

两个,两个分裂峰谐振波长蓝移的同时,衰减率逐渐增大。透射谱的变化情况如图 6 所示。两个分裂峰的间距与弯曲曲率成很好的线性关系,如图 7 所示,实线为(5)和(6)式相减得到的理论曲线,由图可知实验结果和理论分析基本吻合。

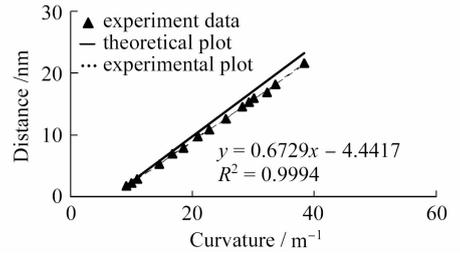


图 7 分裂峰间距与弯曲曲率之间关系曲线

Fig. 7 Distance of the split peaks versus bending curvature

## 4 结 论

长周期光纤光栅有比光纤布拉格光栅(FBG)更好的弯曲传感特性。利用耦合模理论,得到了长周期光纤光栅的弯曲传感特性的一般表达式,并用实验证明了它的正确性。

## 参 考 文 献

- 1 C. C. Ye, S. W. James, R. P. Tatam. Simultaneous temperature and bend sensing with long-period fiber gratings [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(14):1007~1009
- 2 H. J. Patrick, C. C. Chang, S. T. Vohra. Long period fibre gratings for structural bend sensing [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(18):1773~1775
- 3 Gao Kan, Zhou Yingwu, Lin Feng *et al.*. A novel pressure sensor based on long period fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8):997~1000  
高侃,周赢武,林峰等.基于长周期光纤光栅的压力传感器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8):997~1000
- 4 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栅高温应变特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):389~392
- 5 Xu Yanping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi *et al.*. Structure optimization of long-period fiber grating gas-sensing film sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3):326~330  
徐艳平,顾铮,陈家壁等.长周期光纤光栅气敏薄膜传感器结构优化[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3):326~330
- 6 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1277~1294
- 7 Rao Yunjiang, Wang Yiping, Zhu Tao. Theory and Applications of Fiber Gratings [M]. Beijing: Science Press, 2006. 255  
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. 255
- 8 Peng Jiande. Optoelectronic Technology Foundation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. 383~385  
彭江得. *光电子技术基础*[M]. 北京:清华大学出版社, 1988. 383~385