

文章编号: 0253-2239(2008)09-1681-05

长周期光纤光栅弯曲传感特性

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 基于耦合模理论和微扰近似,研究了长周期光纤光栅(LPFG)弯曲传感特性与弯曲曲率及光栅结构参数(光栅长度和栅格周期)之间的关系。当弯曲曲率增大到某一值时,一个透射峰分裂为两个,两个分裂峰的谐振波长与弯曲曲率的变化关系呈二次曲线关系,与栅格周期成反比变化,而与光栅长度基本无关。利用 B-Ge 共掺单模光纤制作的 LPFG 证实了理论的正确性,且具有很好的重复性。

关键词 长周期光纤光栅; 传感器; 弯曲曲率; 栅格周期; 光栅长度

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082809.1681

Bending Sensing Rules for Long-Period Fiber Gratings

Zhao Hongxia Bao Jilong Chen Ying

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

Abstract A certain value, a method to analyze bending sensing rules of long-period fiber grating (LPFG) according to bending curvature, grating length and grating period was reported, based on coupled-mode theory and perturbation approximation. When the bending curvature reaches a certain value, the transmission spectra of the bended LPFG split. The two resonant wavelengths of the splitting peaks change conically with the bending curvature and inversely with grating period, but are independent on grating length. The LPFG written on the B-Ge co-doping single-mode fiber proves the above conclusion.

Key words long-period fiber grating; sensor; bending curvature; grating period; grating length

1 引言

长周期光纤光栅(LPFG)传感器^[1]作为一种新型传感器正在引起人们的极大兴趣。LPFG是把纤芯中传输的基模能量耦合到同向传输的包层模中的损耗型光栅,因此它的透射光谱极易受包层和周围介质的影响,这一特点使它不仅与光纤布拉格光栅(FBG)一样提供了监测多种物理量的可能性,诸如温度、应变、弯曲半径等,而且 LPFG 具有高的检测灵敏度^[2~5],尤其是在弯曲灵敏度方面,即使是微弯也会使 LPFG 的透射谱发生明显的变化。关于 LPFG 弯曲传感特性,国内外已开展了诸多的研究^[6,7],但对于 LPFG 弯曲传感特性的理论,国际上研究不多,而且缺乏系统性。

本文具体研究了 LPFG 弯曲传感特性与弯曲曲率及光栅结构参数(光栅长度和栅格周期)之间的

关系,这不仅对灵活选择合适的参数以得到实际所需的弯曲传感器具有理论指导作用,而且通过参数优化处理,可以大大提高长周期光纤光栅传感器的敏感度,对实际研制和应用具有重要意义。

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^[8]

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

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

式中 R 和 S 表示纤芯基模和同向包层模的复振幅, δ 和 k 表示直流自耦合系数和模式间的交流交叉耦合系数。

收稿日期: 2008-01-08; 收到修改稿日期: 2008-04-02

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

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

当直流自耦合系数 $\delta = 0$ 时, LPFG 的交叉耦合率达到最大值, 此时纤芯基模耦合到包层模的谐振波长为^[9]

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

Λ 和 λ_{D} 为 LPFG 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), 其中 $\sigma_{\text{kj}}^{\text{co}}$ 是芯层不同模式间的直流耦合系数, $\sigma_{\text{kj}}^{\text{cl}}$ 是包层不同模式间的直流耦合系数。

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

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

当 LPFG 弯曲时, 弯曲对其影响发生在两个方面: 1) 使 LPFG 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 Λ 基本不变; 2) 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。在仅考虑弯曲而忽略其它应力的情况下, y 轴方向的压应力和 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^[10]

$$\sigma_x = -\frac{E}{2} x^2 \rho^2, \quad (5)$$

E 为光纤材料的杨氏模量, ρ 为弯曲曲率。

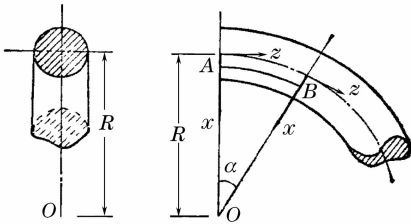


图 1 弯曲光纤示意图

Fig. 1 Sketch of bending fiber

根据弹光效应, 利用公式

$$S_{\mu} = \lambda_{\nu} \sigma_{\nu}, \quad (6)$$

和

$$\Delta b_{\mu} = p_{\nu} S_{\nu}, \quad (7)$$

可求出相对介电抗渗张量各分量的变化分别为

$$\Delta b_1 = P^1 x^2 \rho^2, \quad (8)$$

$$\Delta b_2 = \Delta b_3 = P^{11} x^2 \rho^2, \quad (9)$$

其中

$$P^1 = (p_{11} - 2\nu p_{12})/2,$$

$$P^{11} = (p_{12} - \nu p_{11} - \nu p_{12})/2,$$

ν 为泊松比, p_{11} 和 p_{12} 为弹光系数张量元。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

$$\Delta \epsilon_1 = -\epsilon_0 n^2 (n^2 P^1 x^2 \rho^2) + \epsilon_0 n^2 (n^2 P^1 x^2 \rho^2)^2, \quad (10)$$

$$\Delta \epsilon_2 = \Delta \epsilon_3 = -\epsilon_0 n^2 (n^2 P^{11} x^2 \rho^2) + \epsilon_0 n^2 (n^2 P^{11} x^2 \rho^2)^2, \quad (11)$$

$$\Delta \epsilon_4 = \Delta \epsilon_5 = \Delta \epsilon_6 = 0, \quad (12)$$

n 为光纤折射率。将介电系数张量元代入交流耦合系数公式

$$k_{\text{kj}} = \frac{\omega}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{\mu}^* (\Delta \epsilon E_{\nu}) dx dy, \quad (13)$$

式中 ω 为光波频率, E_{μ} 和 E_{ν} 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。计算结果如下:

$$k_{12} = k_{21} = 0, \quad (14)$$

$$k_{11} = -\frac{\beta}{2} \left(\frac{a}{u}\right)^4 (n^2 P^1 \rho^2)^2 + \frac{\beta}{2} \left(\frac{a}{u}\right)^2 (n^2 P^1 \rho^2) + \frac{3}{4} \frac{1}{\beta} (n^2 P^{11} \rho^2) - \frac{3}{4} \frac{1}{\beta} \left(\frac{a}{u}\right)^2 (n^2 P^{11} \rho^2)^2 \quad (15)$$

$$k_{22} = \frac{\beta}{2} \left(\frac{a}{u}\right)^4 (n^2 P^{11} \rho^2)^2 - \frac{\beta}{2} \left(\frac{a}{u}\right)^2 (n^2 P^{11} \rho^2) - \frac{3}{4} \frac{1}{\beta} (n^2 P^{11} \rho^2) + \frac{3}{4} \frac{1}{\beta} \left(\frac{a}{u}\right)^2 (n^2 P^{11} \rho^2)^2 \quad (16)$$

式中 a 和 β 分别表示纤芯半径与光波的纵向传播常数。而

$$u^2 = \sqrt{k^2 n^2 - \beta^2} a, \quad (17)$$

又因为^[9]

$$\sigma_{11}^{\text{co}} = k_{11} / \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \right], \quad (18)$$

$$\sigma_{22}^{\text{co}} = k_{22} / \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \right], \quad (19)$$

得弯曲后两个分裂峰的谐振波长分别为

$$\lambda_{\text{res1}} = \frac{1}{1 - \sigma_{11}^{\text{co}}(\Lambda/2\pi)} \lambda_{\text{D}}, \quad (20)$$

$$\lambda_{\text{res2}} = \frac{1}{1 - \sigma_{22}^{\text{co}}(\Lambda/2\pi)} \lambda_{\text{D}}. \quad (21)$$

3 仿真与分析

由(20)式和(21)式可知, LPFG 弯曲后, 谐振波长发生分裂, 一个分裂为两个。分裂峰的谐振波长不仅与弯曲曲率有关, 还与 LPFG 的栅格周期及光栅长度有关。

为了方便分析和定量讨论上述弯曲 LPFG 分裂峰谐振波长与弯曲曲率、栅格周期及光栅长度的关系,在下面的讨论和计算中均设 $n = 1.458$; $a = 1.45 \mu\text{m}$; $p_{11} = 0.12$; $p_{12} = 0.27$; $\nu = 0.17$; $\Lambda = 450 \mu\text{m}$; $\lambda_D = 1.55 \mu\text{m}$; $u = 16.8$; $\beta = 5.9 / \mu\text{m}$

在栅格周期和光栅长度一定的情况下,两个分裂峰的谐振波长与弯曲曲率的关系如图 2 所示。

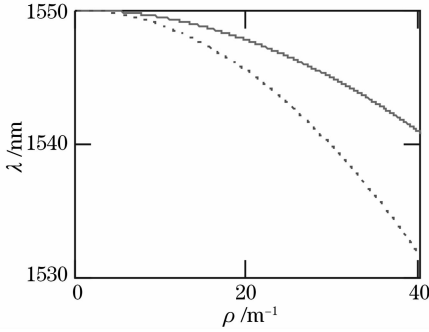


图 2 分裂峰谐振波长与弯曲曲率之间关系曲线

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

由图 2 可知,当弯曲曲率增为 2.56 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蓝移,但两分裂峰蓝移的幅度不同,即两分裂峰的间距呈增大趋势,同时谐振波长与弯曲曲率成很好的二次曲线关系。

图 3 为弯曲曲率和栅格周期一定的条件下,两个分裂峰的谐振波长与光栅长度之间的关系。

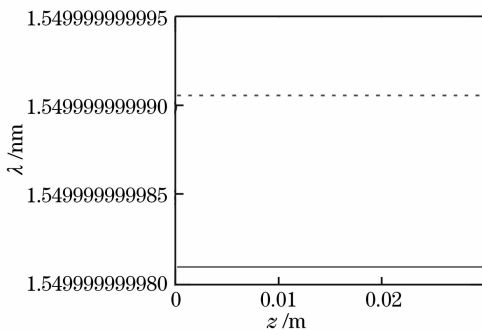


图 3 分裂峰谐振波长与光栅长度之间关系曲线

Fig. 3 Resonant wavelength of the split peaks versus length of LPFG

由图 3 可知,光栅长度对分裂峰谐振波长基本没有影响。主要是光栅长度远小于弯曲半径所致。但 LPFG 制作中,透射峰带宽随光栅长度的增大而减小,所以为了增大测量的灵敏度,尽量选择长度大一些的光栅。

图 4 是弯曲曲率和光栅长度一定的情况下,分裂峰谐振波长与栅格周期之间关系曲线。

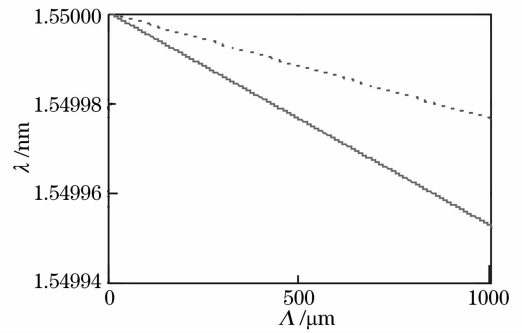


图 4 分裂峰谐振波长与栅格周期之间关系曲线

Fig. 4 Resonant wavelength of the split peaks versus period of LPFG

根据图 4 可知,分裂峰的谐振波长与栅格周期呈反比关系变化,随着栅格周期增大,谐振波长减小。但两个分裂峰谐振波长减小的快慢不同,且两个分裂峰的间隔与栅格周期呈线性关系变化,如图 5 所示。

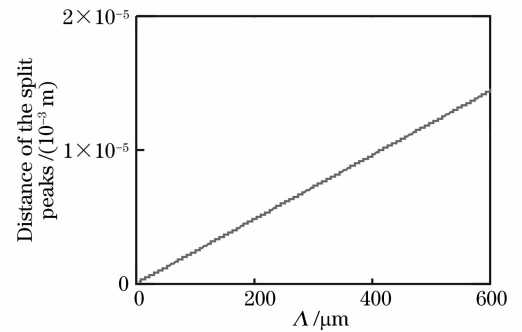


图 5 分裂峰间距与栅格周期之间关系曲线

Fig. 5 Distance of the split peaks versus period of LPFG

根据上述分析可知,在弯曲传感的测量中,为了增大传感灵敏度尽量选择长度大而栅格周期小的光栅。

4 实验研究

4.1 实验装置

测量长周期光纤光栅弯曲传感特性的系统配置如图 6 所示,LPFG 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,使 LPFG 位于铜架两个支点的中间,LPFG 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,以使 LPFG 紧贴于钢尺的下表面,但又不至于产生较大的轴向拉力,利用千分尺在钢尺中央施压使 LPFG 弯曲。由图 6 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); $L = 22 \text{ cm}$ 为被弯曲光纤的长度。用光谱分析仪分析光栅的透射谱特性,结果在计算机上实时显示,为保证 LPFG 不受温度的

影响,实验基本在恒温下进行。

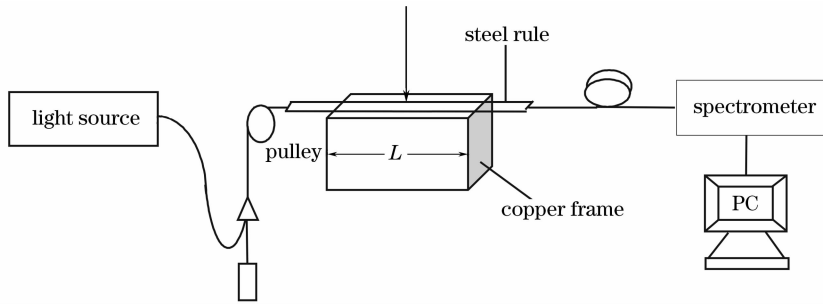


图6 LPPG 弯曲传感特性测试装置

Fig. 6 Experimental setup for bending characteristics test of LPPG

4.2 相同光栅长度和栅格周期的不同弯曲曲率传感实验

实验中所用 LPPG 栅格周期为 $450 \mu\text{m}$, 光栅长度为 5 cm , 在室温且不弯曲不受力情况下其透射峰谐振波长和衰减率分别为 1541.6 nm 、 4.212 dB 。实验发现, 弯曲初期, 透射峰谐振波长几乎不变, 衰减率逐渐减小。当弯曲曲率增大到 2.69 m^{-1} 时, 透射峰衰减率大幅减小, 同时一个透射峰分裂为两个, 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 7 所示, 由图可知实验结果和理论分析基本吻合。

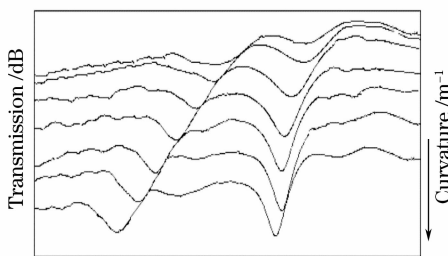


图7 两分裂峰的透射谱变化

Fig. 7 Transmission spectrum variation of the two split peaks

4.3 相同光栅长度和弯曲曲率, 不同栅格周期的弯曲传感实验

实验中选用两根长周期光纤光栅具有相同的光栅长度 50 mm , 栅格周期分别为 0.4 mm 和 0.57 mm 。利用图 6 所示的实验装置, 测得两根光栅分裂峰间距与栅格周期的关系如图 8 所示。

由图 8 可知, 分裂峰间距与弯曲曲率成很好的线性关系, 且栅格周期越大, 分裂峰的间距越小。实验结果和理论分析基本吻合。

5 结 论

利用耦合模理论和微扰近似, 研究了长周期光

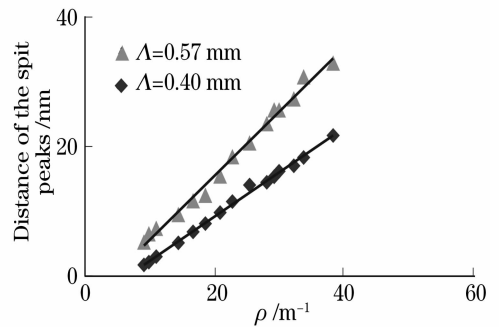


图8 分裂峰间距与弯曲曲率之间关系曲线

Fig. 8 Distance of the split peaks versus bending curvature

纤光栅弯曲传感特性与弯曲曲率及光栅结构参数（光栅长度和栅格周期）之间的关系, 并用实验证明了它的正确性。此结论对进一步研究 LPPG 的弯曲特性具有重要意义, 进而对设计高灵敏度 LPPG 弯曲传感器以达到实际要求有一定的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Chunn-Yenn Lin, Lon A. Wang, Gia-Wei Chern. Corrugated long-period fiber gratings as strain, torsion, and bending sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(8): 1159~1168
- 2 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
- 3 H. J. Patrick, C. C. Chang, S. T. Vohra. Long period fiber gratings for structural bend sensing[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(18): 1773~1775
- 4 Gao Kan, Zhou Yingwu, Lin Feng *et al.*. A novel pressure sensor based on long period fiber grating[J]. *Chin. 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
- 5 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]. *Chin. 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
- 6 Y. Liu, L. Zhang, J. A. R. Williams *et al.*. Optical bend sensor based on measurement of resonance mode splitting of long-

- period fiber grating[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(5): 531~533
- 7 Xu Yanping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi. 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,陈家璧. 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
- 8 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294

- 9 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
- 10 Peng Jiangde. *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

《中国激光》“综述”栏目征稿启事

《中国激光》创刊 30 多年以来,以反映我国激光领域的研究进展和成果为己任,见证了中国激光领域的发展历程和重大突破,在读者中树立了较高的学术地位,形成了较为成熟的办刊风格。近年来,激光研究的领域取得了令人瞩目的成就,在我国科技体系与国民经济中占据了越来越重要的地位,为了给广大研究人员提供更丰富、更全面的信息,应部分读者的要求,本刊增辟“综述”栏目,刊发综述类文章,反映激光领域热点专题的研究进展或动态。

具体要求:综述应尽可能就激光领域的研究热点结合最新的研究成果进行论述,涉及范围不需太大,但必须要有一定的深度和时间性,能反映出这一专题的历史背景、研究现状和发展趋势。执笔人(第一作者)应是在激光及其相关领域具有一定造诣,对某一方面有较深入研究的专家、学者。文章必须有作者自己的研究经验或体会,所介绍的工作应尽量适合国内已开展的工作或将要开展工作的需要。投稿同时,请作者提供详细的作者简介(包括研究领域、主要研究成果等)。

综述的写作格式一般包括四部分,即引言、正文、结论、参考文献。

引言,要用简明扼要的文字说明写作的目的、必要性、有关概念的定义,综述的范围,阐述有关问题的现状和动态,以及目前对主要问题争论的焦点等。引言一般以 200~300 字为宜,不宜超过 500 字。

正文,是综述的重点,应能较好地表达综合的内容。正文主要包括论据和论证两个部分,通过提出问题、分析问题和解决问题,比较不同学者对同一问题的看法及其理论依据,进一步阐明问题的来龙去脉和作者自己的见解。当然,作者也可从问题发生的历史背景、目前现状、发展方向等提出文献的不同观点。正文的重要部分应包括作者自己的工作实践。正文部分可根据内容的多少分为若干个小标题分别论述。

结论,是对综述正文部分作扼要的总结,作者应对各种观点进行综合评价,提出自己的看法,指出存在的问题及今后发展的方向和展望。

参考文献,是综述的重要组成部分。一般参考文献的多少可体现作者阅读文献的广度和深度,应以最近 3~5 年内的最新文献为主。

文章篇幅一般在 1 万字左右,一经录用,从速发表,稿酬从优。

投稿方式,网上投稿: www.opticsjournal.net 或 E-mail: mayi@siom.ac.cn

咨询电话: 021-69918427

《中国激光》编辑部