

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0220-04

弯曲光纤布拉格光栅光谱特性的研究

杨利 邓晓

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系,安徽 合肥 230027)

摘要 从理论与实验两方面研究了基于普通单模光纤的光纤布拉格光栅在弯曲时光谱特性的变化。基于耦合模理论,以弯曲光纤为参考波导,研究了弯曲波导的分析模型和漏模求解工具,考虑了弯曲时光弹效应的影响,得到弯曲光纤中的准导模(漏模);分析了弯曲情况下,布拉格波长的变化情况,与实验结果基本吻合。在 1 cm 的弯曲半径下,布拉格波长向长波长的偏移在 10^{-2} nm 量级。

关键词 光纤光学;弯曲光纤光栅;漏模解模工具;耦合模理论

中图分类号 TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200835s2.0220

Study on Spectral Characteristics of Bend Fiber Bragg Grating

Yang Li Deng Xiao

(Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract The spectral characteristics of bend fiber Bragg gratings (FBGs) are theoretically and experimentally investigated. A bend fiber chosen as the reference waveguide in coupled mode analysis, the analysis model for bend waveguides and the mode solvers for leaky are studied, and the quasi guided mode (actually leaky modes) in the bend fibers are successfully solved. The influence of photoelastic effects is also taken into account during the mode searching. The variations of the spectral characteristics of bend FBG are analyzed by using coupled mode theory. The variation of Bragg wavelength is coincident with that obtained by experimental measurements. It is shown that red shift of Bragg wavelength is at the order of 10^{-2} nm for a common single mode fiber based bend FBG with bend radius of 1.0 cm.

Key words fiber optics; bend fiber Bragg grating; mode solver for leaky modes; coupled mode theory

1 引言

光纤光栅弯曲敏感特性的研究是设计光纤光栅弯曲传感器的基础,也是光纤光栅在通信和传感等领域应用中的一个不可忽视的环节。目前已有的光栅包括长周期光纤光栅^[1~3]、布拉格光纤光栅^[4]、垂直光栅和斜光栅^[4]。光栅所基于的光纤包括普通光纤、特种光纤^[5]和光子晶体光纤^[6]。光栅写入的光源包括紫外激光器、CO₂激光器^[7]和红外飞秒激光器^[8]。其中大部分工作集中在实验方面,而对于弯曲光纤光栅的准确建模和模拟仍是一个有挑战性的

问题。

对于普通光纤光栅的模拟,最常用且准确有效的方法是基于模式分析的耦合模分析^[9]。而弯曲光纤光栅的耦合模理论分析则面临两个困难:一是参考波导为弯曲光纤,主模实质上为漏模;二是在弯曲半径很小的情况下,与辐射模的耦合将成为不容忽视的问题^[10]。

本文首先研究了弯曲光纤这种泄漏波导的模式求解模型,如解析近似模型^[11,12]、全矢量等效直波导模型^[13]、严格的圆柱坐标系下的直接求解模

基金项目: 中国科学院优秀博士后启动基金,东南大学毫米波国家重点实验室开放课题(K200601)和安徽省光电子科学与技术重点实验室资助项目。

作者简介: 杨利(1973-),女,博士,副教授,主要从事光子器件与系统的建模、模拟与实验方面的研究。
E-mail: yanglil@ustc.edu.cn

型^[14],考虑了弯曲引起的应力作用对弯曲波导模式求解的影响^[15]。研究表明,对于普通弱导单模光纤,采用基于以完全匹配层为边界条件的全矢量数值解模器,得到了与解析近似方法相符的结果。对于大折射率差或更为复杂的波导结构而言,全矢量的数值模型是必不可少的。这里忽略了与辐射模的耦合。

在对弯曲光纤模式求解和直光纤布拉格光栅(FBG)光谱特性分析的基础上,讨论了弯曲半径为1 cm时,FBG光谱特性的变化;并与相应的实验结果进行了比较和讨论。

2 理论分析与模拟

2.1 弯曲光纤模式的准确求解

采用耦合模理论分析,选择弯曲光纤为参考波导;可见,弯曲光纤中模式的准确求解是弯曲光纤光栅光谱特性准确模拟的前提。

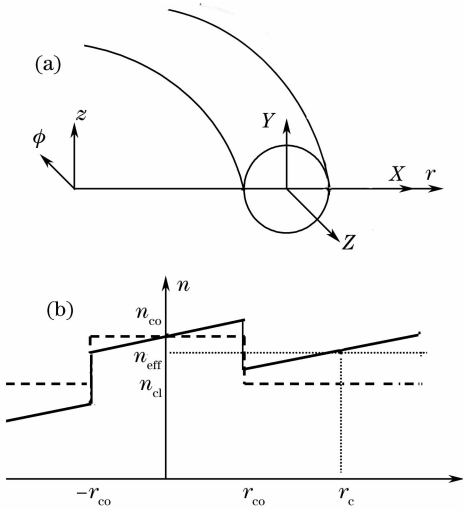


图 1 (a)圆柱坐标系和本地坐标系中的弯曲光纤;

(b)光纤弯曲前后的折射率分布

Fig.1 (a) Bend fiber in cylindrical and local coordinates;

(b) Index profile before and after bending

图 1(a)为置身于圆柱坐标系中的弯曲光纤,其本地坐标系为 XYZ,未弯曲时的折射率分布为图 1(b)中划线所示。沿用 Marcuse 的解析推导,标量波动方程可以表示为^[11]

$$\frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + n_{eq}^2(X, Y) \kappa^2 E = 0, \quad (1)$$

式中,等价的直波导折射率分布 $n_{eq}^2(X, Y)$ 满足

$$n_{eq}^2(X, Y) = n^2(X, Y) \left(1 + 2 \frac{X}{R}\right). \quad (2)$$

这意味着弯曲波导对应于一个等价的直波导,其折

射率分布如图 1(b)中实线所示。由图所示,随着 X 的增大,包层折射率将大于模式的有效折射率,未弯曲波导中传输的导模也因而转化为漏模;这也为模式的准确求解增加了难度。

对于弯曲半径较大的弱导光纤而言, Marcuse 的解析标量近似模型与实验得到了较好的吻合。而对于大折射率差或折射率分布更为复杂的结构,如光子晶体光纤,则需要借助于数值解法,从全矢量的波动方程出发,如全矢量的等效直波导近似模型和圆柱坐标系下的直接求解模型。后者更为直接,在弯曲半径较小的情况下也更为准确。在漏模的数值求解中,完全匹配层(PML)为一种理想的边界条件^[14],尽管 PML 的参数选择有一个技巧问题。

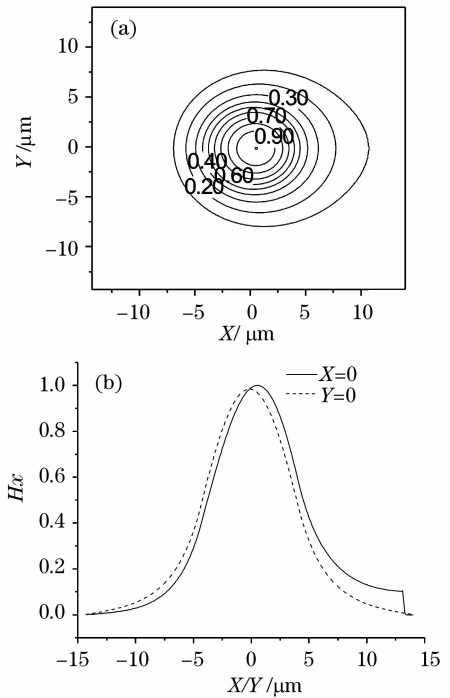


图 2 (a) 主分量 H_x 的幅度在截面的场分布;

(b) 主分量 H_x 的幅度沿本地横向坐标轴的场分布

Fig.2 (a) Field pattern of primary component H_x in cross

section; (b) Field pattern of primary component

H_x along two local coordinate axes in cross section

在选择和验证模型的基础上,以 PML 为边界条件,数值求解了单模光纤 Corning S28 在弯曲半径为 1 cm 时的情况^[16]。在波长为 $1.545 \mu\text{m}$ 时,得到的有效折射率为复数,实部为 $1.44614 - j4.65 \times 10^{-6}$,虚部表示辐射损耗。其中磁场主分量 H_x 在光纤截面的场分布如图 2(a)所示,沿坐标轴的分布如图 2(b)所示。而未弯曲时的有效折射率为 1.44608。

2.2 光弹效应对弯曲光纤折射率的影响

当光纤弯曲时,光纤沿纵向在弯曲的内侧($X < 0$)将被挤压,在外侧($X > 0$)被拉伸;而纵向的应力将引起横向的应力。应力会在光纤内引起应变,并由光弹效应引起折射率的变化。横向的折射率变化可以表示为^[10,15]

$$\Delta n_x = -\frac{n_1^3}{4R^2} P_{xx} (X^2 - b^2) (1 + \nu), \quad (3a)$$

$$\Delta n_y = -\frac{n_1^3}{4R^2} P_{yx} (X^2 - b^2) (1 + \nu), \quad (3b)$$

式中,泊松比 $\nu = 0.17$, 光弹系数 $P_{xx} = 0.113$, $P_{yx} = 0.252$ ^[17], b 为光纤外径。在弯曲半径为 1 cm 时,光纤芯层在 X 和 Y 方向的折射率增量分别小于 3.93×10^{-6} 和 8.76×10^{-6} 。经分析和模拟^[16],光弹效应引起的折射率增量对于有效折射率的影响相对于 2.1 节中的折射率增量,可以忽略。

2.3 FBG 弯曲前后光谱特性的变化

采用耦合模理论可以简洁而直观地分析和解释 FBG 的光谱特性^[9]。紫外光在单模光纤芯层引入短周期的折射率扰动,将引起前后向基模之间的耦合,在反射谱上出现一个谐振峰,而在透射谱的对应位置出现一个功率相当的凹陷。谐振峰的峰值波长 (Bragg 波长) 和功率的解析表达式分别为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (4)$$

$$P_r = \tanh^2(\kappa L), \quad (5)$$

式中 Λ 和 L 分别为光栅的周期和长度, n_{eff} 为基模的有效折射率, κ 为耦合系数。考虑到光栅中折射率的扰动 δn 引起的有效折射率的变化 δn_{eff} , 实际的 Bragg 波长与未考虑扰动的设计波长之间满足

$$\lambda_{\text{PB}} = \left(1 + \frac{\delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}}\right) \lambda_B. \quad (6)$$

Bragg 波长和峰值功率的变化是 FBG 在传感中衡量传感变化的重要参数,其中 Bragg 波长的变化最为直观。根据式(4)和(6),Bragg 波长的变化可以表示为

$$\Delta\lambda = 2\Lambda\delta n_{\text{eff}} + 2\Lambda\delta(\delta n_{\text{eff}}) + 2(n_{\text{eff}} + \delta n)\Delta\Lambda, \quad (7)$$

由于 δn 通常小于 10^{-3} , 式(7)中第二项较第一项可以忽略。同时,在本文讨论中,光纤的弯曲半径为纤芯半径的 2.409×10^{-3} 倍,弯曲引起的光栅周期变化可以忽略不计。由此可见,弯曲引起的 Bragg 波长变化主要取决于弯曲引起的光纤的有效折射率的变化。由模拟可知,弯曲半径为 1 cm 时, Bragg 波长的变化约为 0.064 nm(光栅周期选择与

实验参数一致)。需要说明的是,(6)式是针对实验测试光栅的折射率增量分布未知的情况引入的;对已知折射率分布变化的模拟, Bragg 波长的变化可以根据耦合模理论,直接由式(4)导出。

3 实验研究

图 3 为 FBG 弯曲前后光谱特性的变化,实验框图如图 4 所示。其中 FBG 为普通通信光纤由紫外光经周期为 1068.9 nm 的相位掩模板写成,弯曲前后的透射谱分别如图 3 中左右两谱线所示。由图可见,在弯曲半径为 1 cm 时,谐振峰向长波长偏移了 0.04 nm,透射峰降低约 0.5 dBm。

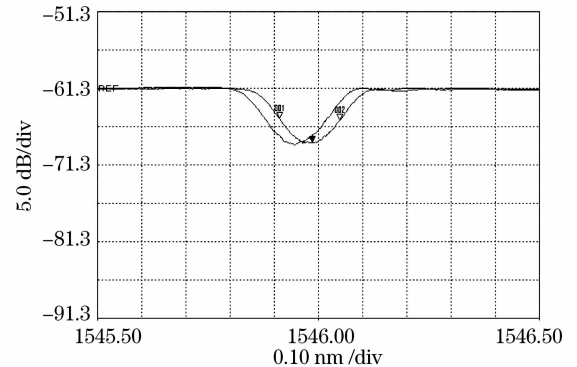


图 3 FBG 弯曲前后的透射光谱比较

Fig. 3 Transmission spectra of FBG before and after bending

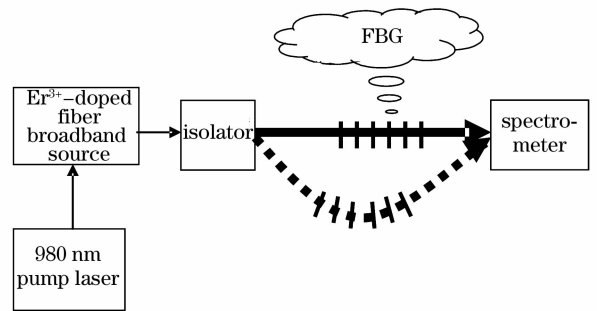


图 4 FBG 弯曲前后光谱特性测试的实验框图

Fig. 4 Experimental setup for the spectral study of bend FBG

4 模拟结果与实验结果的比较与讨论

在弯曲半径为 1 cm 时,模拟与实验得到的 Bragg 波长的红移分别为 0.064 nm 和 0.04 nm,均在 10^{-2} nm 量级,结果基本吻合。实际光纤光栅的结构参数无法准确获悉是两结果存在偏差的主要原因。此外,分析模型中的近似和数值求解中的误差,以及实验操作中固定光栅人为引入的应力和温度效应等均会引起模拟与实验结果的偏差。

另一方面,弯曲半径为 1 cm 时,实验测得的透

射功率与未弯曲时相比,未见明显降低,这与采用无限包层模型模拟得到的理论结果有偏差,理论模型需要修正。

5 结 论

研究了普通单模光纤的光纤布拉格光栅弯曲时的光谱特性。结果表明基于普通单模光纤的普通FBG对于半径为1 cm的弯曲并不敏感;弯曲波导的解析近似模型对弯曲半径较大的弱导光纤是适用的。对弯曲半径较小,折射率差较大的结构,弯曲情况下漏模的求解建议从圆柱坐标系下的全矢量直接求解模型出发;同时,与辐射模的耦合问题需要纳入考虑。

致谢 感谢钱景仁教授、朱冰教授和苏觉老师在模拟与实验中所给予的建议和帮助。感谢许成林博士、鲁玉春同学和薛林林同学在弯曲波导模式求解中所给予的建议和帮助。

参 考 文 献

- Patrick H. J., Chang C. C., Vohra S. T.. Long period fibre gratings for structural bend sensing[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(18):1773~1775
- Wang Yiping, Rao Yunjiang, Zeng Xiangkai *et al.*. Bending characteristics analysis of long-period fiber gratings using coupled-mode theory[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10): 1205~1208
王义平,饶云江,曾祥楷等. 长周期光纤光栅弯曲特性的模式耦合理论分析[J]. *光子学报*, 2002, **31**(10):1205~1208
- Ueyn L. Block, Dangui Vinayak, Dignonnet J. F. Michel *et al.*. Origin of apparent resonance mode splitting in bent long-period fiber gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(2): 1027~1034
- Ivanov Alexei, Albert Jacques. Bent tilted fiber Bragg gratings for temperature-independent vibration sensing in vehicles[J]. *SPIE*, 2007, **6758**: 675803-1~8
- Zhou Jinlong, Dong Xiaopeng, Shi Zhidong. Theoretical and experimental investigation of the bending sensitivity of the D shaped fiber Bragg gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11): 1734~1737
周金龙,董小鹏,石志东. D形光纤 Bragg 光栅弯曲灵敏度的理论和实验研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(11):1734~1737
- He Zonghu, Zhu Yinian, Du Henry. Effect of macro-bending on resonant wavelength and intensity of long-period gratings in photonic crystal fiber[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(4):1804~1810
- Wang Yiping, Rao Yunjiang. A novel long period fiber grating sensor measuring curvature and determining bend-direction simultaneously[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, **5**(5):839~843
- Martinez A., Lai Y., Dubov M. *et al.*. Vector bending sensors based on fibre Bragg gratings inscribed by infrared femtosecond laser[J]. *Electro. Lett.*, 2005, **41**(8): 472~474
- Erdogan Turan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1277~1294
- Qian Jingren. Coupled Mode Theory [M]. Textbook for graduate students in University of Science and Technology of China
钱景仁. 耦合模理论[M]. 中国科学技术大学研究生教材
- Marcuse Dietrich. Field deformation and loss caused by curvature of optical fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(4): 311~320
- Vassalo Charles. Optical Waveguide Concepts [M]. Elsevier Science Publishers. 1991
- Lui Wayne, Xu Chenglin, Hirono Takuo *et al.*. Full-vectorial wave propagation in semiconductor optical bending waveguides and equivalent straight waveguide approximations [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(5): 910~914
- Feng Ningning, Zhou Guirong, Xu Chenglin *et al.*. Computation of full-vector modes for bending waveguide using cylindrical perfectly matched layers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(11):1976~1980
- Ulrich R., Rashleigh S. C., Eickhoff W.. Bending-induced birefringence in single-mode fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(6):273~275
- Fallahkhai Arman B., Li Kai S, Murphy Thomas E. Vector finite difference mode solver for anisotropic dielectric waveguides[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(11):1423~1431
- Bertholds A., Dandliker R.. Determination of the individual strain-optic coefficients in single-mode optical fibres[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(1):17~20