

D 形光纤 Bragg 光栅弯曲灵敏度的理论和实验研究*

周金龙¹ 董小鹏^{1,2,**} 石志东²

(1 厦门大学信息科学与技术学院光波技术研究所, 厦门 361005)

(2 上海大学光纤研究所, 上海 208100)

摘要 用材料力学理论分析了 D 形光纤 Bragg 光栅(D-shaped fiber Bragg grating, D-FBG)以及常规光纤 Bragg 光栅由弯曲引起的轴向应变,得到了光栅 Bragg 波长漂移的弯曲敏感特性. 实验结果和理论计算结果基本相符. 与常规 FBG 相比,该 D-FBG 的弯曲灵敏度要高近 80 倍. 因此 D-FBG 可以直接应用于弯曲形变的测量,以及间接应用于压力、加速度等物理量的测量. 理论分析和实验结果对采用该类型光纤光栅的器件和传感系统的设计具有参考意义.

关键词 D 形光纤 Bragg 光栅; 光纤弯曲传感; 光纤光栅传感器

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

光纤 Bragg 光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器是一种波长调制型光纤传感器,通过外界参量对 Bragg 波长的调制来获取传感信息. 光纤光栅传感系统有诸多优点,如抗电磁干扰、传感头结构简单、方便构成传感网络等等,所以得到了越来越广泛的应用^[1~4]. D 形光纤 Bragg 光栅(D-FBG)由于其物理结构上的非圆对称,而对弯曲有很高的灵敏度,引起了大家的兴趣. F M Araujo 等人利用 D-FBG 的弯曲敏感特性制得对温度不敏感的弯曲传感器^[5]. T. Allsop 等人在 D 形光纤上刻写了长周期光栅测得其弯曲和方向特性^[6]. 赵东晖等人也在 D 形光纤和一些特殊结构的光纤上刻写了长周期光栅制得矢量性弯曲传感器^[7]等.

目前 D-FBG 弯曲敏感特性的研究工作主要都是实验方面的,而几乎没有理论分析方面的. 这样用 D-FBG 设计传感系统和器件时,若没有理论分析和设计基础,就不能优化光栅的设计并较为准确的预期和解释实验结果. 为此,本文在 D 形光纤及其 Bragg 光栅的传输特性,以及弯曲对光栅 Bragg 波长的影响及传感机理等方面进行了详细的分析,得到了波长变化与弯曲及光纤参量的理论关系和曲线,并将理论与实验结果作了对比. 文中对 D 形光纤几何双折射对结果的影响也作了分析和讨论. 这些结果对 D-FBG 的设计及其传感应用有较大的意义.

1 理论分析与数值计算

1.1 弯曲引起的纤芯轴向应变

在理论分析前先引入材料力学中的中性层(neutral layer)、中性轴(neutral axis)以及形心(centroid)的概念与定义. 材料发生弯曲形变时,既不会伸长也不会压缩的纵面称为中性层,中性层与横截面(cross section)的交线称为中性轴^[8]. 弯曲形变是材料绕中性轴发生的相对转动. 形心指的是物体的几何中心.

为了简化模型的复杂程度,假设只有纯弯曲,即只考虑轴向应力,而不考虑横向应力. 如图 1、图 2,

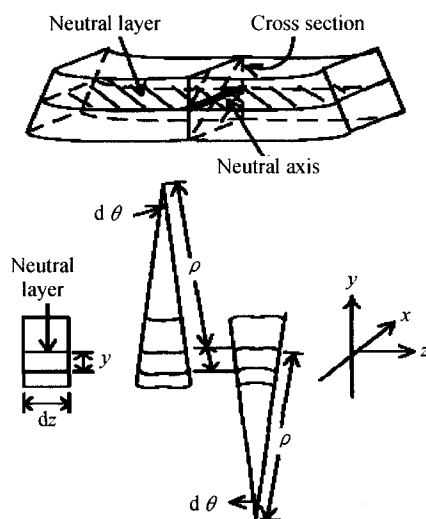


图 1 弯曲材料中性层、中性轴、横截面、曲率半径 ρ 的示意图
Fig. 1 Schematic diagram of neutral layer, neutral axis, cross section, curvature radius ρ for bending material

以中性层为 x, z 轴平面,以中性轴为 x 轴,以截面形心 C 为原点建立直角坐标系. 则距离中性层为 y 的平面沿 z 轴方向的应变变量 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{(\rho \pm y)d\theta - \rho d\theta}{\rho d\theta} = \pm \frac{y}{\rho} \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(60177026)和福建省自然科学基金(0012-K32008)资助

** Tel: 0592-2580187 Email: xpd@xmu.edu.cn

收稿日期: 2005-12-30

式中 ρ 是中性层的曲率半径, $\epsilon > 0$ 表示伸长, $\epsilon < 0$ 表示压缩.

定义纤芯截面的平均应变量为

$$\bar{\epsilon} = \frac{\int \epsilon dA}{A} \quad (2)$$

A 为纤芯截面面积. 对于常规 FBG, 计算得

$$\bar{\epsilon} = 0 \quad (3)$$

对于 D-FBG, 计算得

$$\bar{\epsilon} = \pm \frac{r}{\rho} \frac{\cos(\arcsin \frac{d}{r}) + \frac{1}{3} \cos(3\arcsin \frac{d}{r})}{\pi + 2\arcsin \frac{d}{r} + \sin(2\arcsin \frac{d}{r})} \cdot$$

$$\cos \alpha = K \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

$$K = \pm \frac{r \cos(\arcsin \frac{d}{r}) + \frac{1}{3} \cos(3\arcsin \frac{d}{r})}{\pi + 2\arcsin \frac{d}{r} + \sin(2\arcsin \frac{d}{r})} \cdot$$

$$\cos \alpha = K \frac{1}{\rho}$$

式中正号表示向 y 轴正方向弯曲, 负号表示向 y 轴负方向弯曲, ρ 是中性层的曲率半径, r 是包层半径, d 是 D-FBG 侧平面与纤芯中心的距离, α 是侧平面与中性层的夹角 (如图 2), $\bar{\epsilon} > 0$ 表示纤芯伸长, $\bar{\epsilon} < 0$ 表示纤芯压缩. 可见 D-FBG 弯曲产生的纤芯平均应变跟 r, d, α, ρ 四个参量以及弯曲方向相关.

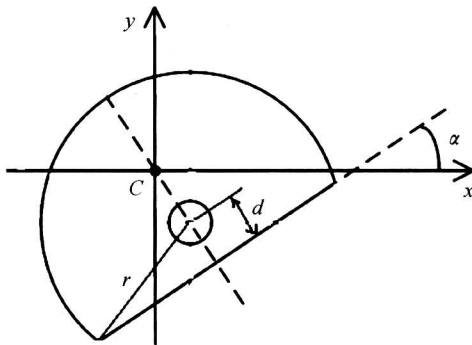


图 2 D-FBG 的横截面及其形心 C
Fig. 2 Cross section of D-FBG and its centroid C

1.2 D 形光纤 Bragg 波长与弯曲半径的关系

因为纤芯面积相对于光纤截面来说非常小, 而且光栅横向尺寸远远小于曲率半径, 所以可以近似认为纤芯轴向应变在横截面内是均匀分布的, 等于其平均值 $\bar{\epsilon}$.

均匀的轴向应变与 Bragg 波长相对漂移量 S 具有如下的关系^[9]

$$S = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = 0.784\epsilon_{zz} = 0.784\bar{\epsilon} \quad (5)$$

式中 λ_B 为 Bragg 波长, $\Delta\lambda_B$ 为波长漂移量, ϵ_{zz} 为轴向应变变量.

所以由式 (3)、(5) 可得, 常规 FBG 弯曲产生的

Bragg 波长相对漂移量 $S=0$. 而由式 (4)、(5) 可得, D-FBG 弯曲产生的 Bragg 波长相对漂移量为

$$S = 0.784\bar{\epsilon} = K' \frac{1}{\rho} \quad (6)$$

$$K' = 0.784K$$

根据实验使用的 D-FBG (如图 3), 数值计算时

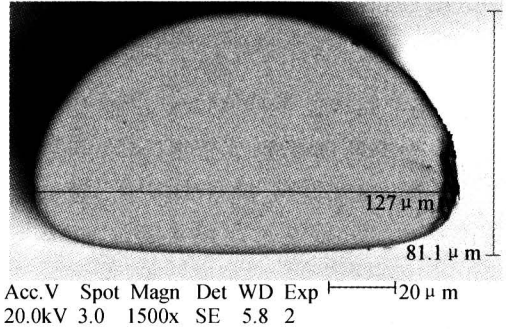


图 3 实验所用的 D-FBG 端面电镜扫描图片, 直径为 $127 \mu\text{m}$, 高度为 $81.1 \mu\text{m}$
Fig. 3 SEM image of D-FBG used in experiments, diameter is $127 \mu\text{m}$, height is $81.1 \mu\text{m}$

设定

$$r = 127/2 = 63.5 \mu\text{m}$$

$$d = 81.1 - 63.5 = 17.6 \mu\text{m}$$

为了取得最大灵敏度, 取 $\alpha=0$, 实验中 D-FBG 的侧平面平行于中性层.

图 4 是计算所得的 Bragg 波长相对漂移量与曲率的关系曲线. 当 $\rho = 1 \text{ cm}$, $\frac{1}{\rho} = 1 \text{ cm}^{-1}$ 时, $S = 1.40 \times 10^{-3}$. 式 (6) 定义的曲线斜率 K' 与参量 d 的关系如表 1, 显然斜率越大弯曲灵敏度越高.

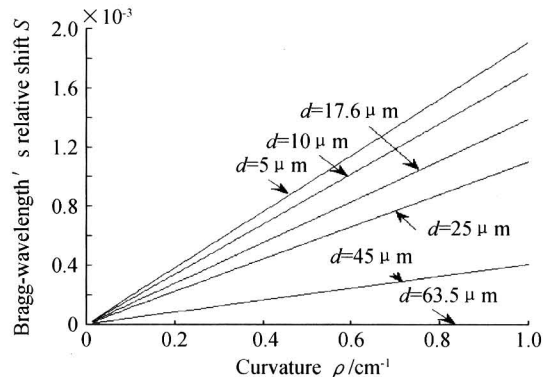


图 4 Bragg 波长相对漂移量 S 与曲率的关系曲线
Fig. 4 Bragg-wavelength's relative shift vs curvature

表 1 斜率 K' 与 D-FBG 参量 d 的对应值

$d/\mu\text{m}$	5	10	17.6*	25	45	63.5
$K'(\times 10^{-3} \text{ cm})$	1.90	1.69	1.40	1.10	0.41	0

* 为实验所用的 D-FBG 的参量 d

从上述理论分析可见, 常规 FBG 对弯曲不敏感, 而 D-FBG 在 d 值较小时对弯曲非常敏感, 并且 Bragg 波长相对漂移量与曲率呈良好的线性关系, 适用于弯曲及相关的传感测量. 当 D-FBG 半径 r 、

侧平面与中性层夹角 α 及其曲率一定时,侧平面与纤芯中心距离 d 越小,弯曲灵敏度越高.

但 d 值较小时, D 形光纤的双折射对实际测量会造成一定影响. 图 5 是采用 Apollo 光子分析软件 APSS 基于有限差分法计算得到的光纤模式双折射 B 随参量 d 的变化曲线, 其中 $B = (\beta_x - \beta_y) / k$, $k = 2\pi / \lambda$, β_x, β_y 分别为沿 x 和 y 方向偏振的 HE_{11} 模传输常量. 当入射光包含 x 和 y 两个偏振方向模式时, 每个偏振方向模式对应的 Bragg 波长叠加后会造成光栅反射波形展宽甚至分裂, 这一问题会给传感解调系统设计和信号处理带来困难. 解决这一问题的途径一方面可以通过起偏装置使 D 形光纤中仅传输单一偏振方向的光, 另一方面, 从图 5 可见当 D 形光纤侧平面与纤芯中心距离参量 d 大于 $10 \mu\text{m}$ 时, 其几何双折射已减小到可以忽略程度. 因此, 结合图 4 和图 5 计算曲线, 在弯曲灵敏度足够的情况下, 选择较大的 d 值 ($d > 10 \mu\text{m}$) 可以有效降低光源及传输过程偏振态变化对测量结果的影响.

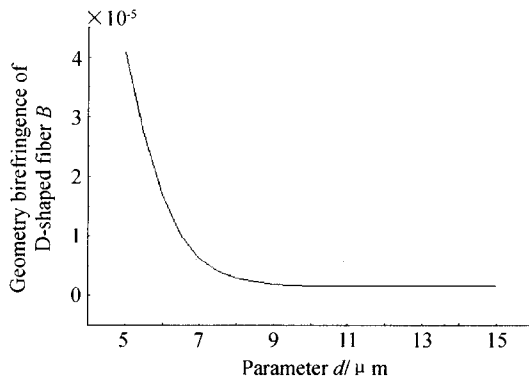


图 5 D 形光纤的几何双折射与参量 d 的关系
Fig. 5 Geometry birefringence of D -shaped Fiber vs parameter d

2 实验结果与讨论

D -FBG 与常规 FBG 在无弯曲状态下, 用 AQ6317B 光谱仪测得其 Bragg 波长分别为 $\lambda_D = 1552.61 \text{ nm}$, $\lambda_0 = 1550.12 \text{ nm}$.

如图 6, 将常规 FBG 与 D -FBG 都紧贴在半径为 1 cm 的圆柱上. ASE 光源发出 1550 nm 附近的宽谱光经过 3 dB 耦合器射入 FBG, 反射光经 3 dB

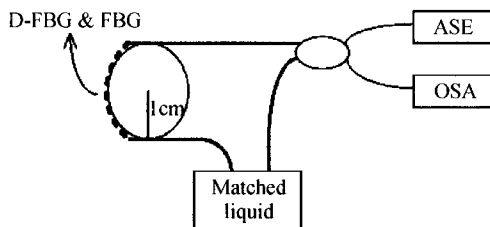


图 6 光纤光栅的实验测量原理图
Fig. 6 Schematic diagram of the spectra measurement arrangement

耦合器进入光谱分析仪 (AQ6317B). 把空余的光纤端面浸入匹配液中, 减少本底噪音, 分别测量两者 Bragg 波长漂移量.

在 1 cm 半径弯曲下, 实验测得常规光纤光栅 Bragg 波长为 $\lambda'_0 = 1550.09 \text{ nm}$ (如图 7), 漂移了 0.03 nm . $S = 1.94 \times 10^{-5}$, 理论值为零.

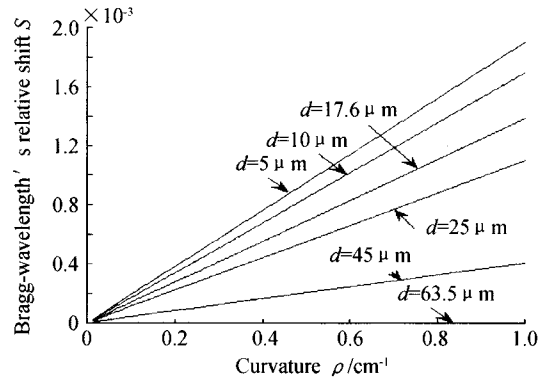


图 7 直及弯曲情况下圆对称 FBG 的反射谱线
Fig. 7 Reflection spectra of the circularly symmetrical FBG with and without bending

D -FBG 侧平面紧贴圆柱时, Bragg 波长 $\lambda'_{D1} = 1550.26 \text{ nm}$ (如图 8), 向短波长移动了 2.35 nm , 对应 $S = 1.51 \times 10^{-3}$, 与理论值 $S = 1.40 \times 10^{-3}$ 误差为 7.3% . 当 D -FBG 侧平面平行向外, 以圆柱面紧贴圆柱时, 测得 Bragg 波长 $\lambda'_{D2} = 1555.19 \text{ nm}$ (如图 8), 向长波长漂移了 2.58 nm , 对应 $S = 1.66 \times 10^{-3}$, 与理论值 $S = 1.40 \times 10^{-3}$ 误差为 15.7% . 而在相同弯曲半径下, 实验测得常规圆对称 FBG 的 Bragg 波长相对漂移量仅为 $S = 1.94 \times 10^{-5}$. 由此可见, 在上述测量条件下, D -FBG 的弯曲灵敏度比圆对称 FBG 分别高 78 (压缩光栅) 及 86 倍 (拉伸光栅) 之多.

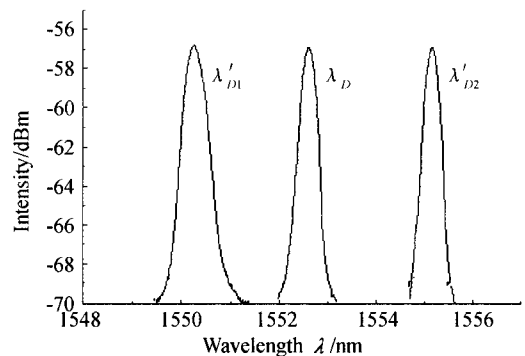


图 8 直及不同弯曲方向情况下 D -FBG 的反射谱线
Fig. 8 Reflection spectra of the D -shaped FBG with different orientation and without bending

上述实验测量结果与理论分析存在一定误差, 主要原因可能有: 1) 理论模型采取了一定程度上的近似. 没有考虑横向应力以及应力不均匀等实际存在的复杂情况. 另外, 计算所用参量与实际光纤的

参量可能不完全相同;2)实验测量条件和方法引入的误差. D-FBG 侧平面与柱面不完全平行,外界环境的波动,材料的蠕变,光谱仪的测量准确度等都会引入一定的误差.

3 结论

与常规圆对称 FBG 相比,相同弯曲半径下, D-FBG 具有比圆对称 FBG 高 80 倍的弯曲灵敏度. 所以采用 D-FBG 制作弯曲传感器,可以达到相当高的灵敏度. 理论分析和实验结果对于 D-FBG 的优化设计和 D-FBG 的参量选取都有较大的帮助和指导意义. 如何进一步改进理论分析和实验测量方法,将 D-FBG 应用于实际的传感测量系统中,是下一步研究工作的重点.

参考文献

- 1 武林,潘文娜,殷宗敏,等. 光纤光栅的应用研究. 光纤与电缆及其应用技术,2005,(1):6~11
Wu L, Pan W N, Yin Z M, et al. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2005,(1):6~11
- 2 刘波,曹晔,罗建花,等. 光纤光栅水听器技术实验研究. 光子学报,2005,34(5):686~689
Liu B, Cao Y, Luo J H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005,34(5):686~689
- 3 李景义,饶云江,牛永昌,等. 基于新型长周期光纤光栅的低成本应变传感系统. 光子学报,2005,34(3):431~433
Li J Y, Rao Y J, Niu Y C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005,34(3):431~433
- 4 胡爱姿,饶云江,王义平,等. 基于新型长周期光纤光栅的动态横向负荷传感器. 光子学报,2003,32(11):1359~1362
Hu A Z, Rao Y J, Wang Y P, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003,32(11):1359~1362
- 5 Araujo F M, Ferreira L A, Santos J L, et al. Temperature and strain insensitive bending measurements with D-type fibre Bragg gratings. *Measurement Science and Technology*, 2001,12(7):829~833
- 6 Allsop T, Gillooly A, Mezentsev V, et al. Bending and orientational characteristics of long period gratings written in D-shaped optical fiber. *IEEE Transactions of Instrumentation and Measurement*, 2004, 53(1):130~135
- 7 Zhao D H, Zhou K M, Chen X F, et al. Implementation of vectorial bend sensors using long-period gratings UV-inscribed in special shape fibres. *Measurement Science and Technology*, 2004,15(8):1647~1650
- 8 郑承沛. 材料力学. 北京:北京工业大学出版社,1994. 179~181
Zheng C P. *Material Mechanics Theory*. Beijing: Published by Beijing Industry University Press, 1994. 179~181
- 9 廖延彪. 光纤光学. 北京:清华大学出版社,2000. 200
Liao Y B. *Fiber Optics*. Beijing: Published by Qinghua University Press, 2000. 200

Theoretical and Experimental Investigation of the Bending Sensitivity of the D-shaped Fiber Bragg Gratings

Zhou Jinlong¹, Dong Xiaopeng^{1,2}, Shi Zhidong²

¹ Institute of Lightwave Technology, Xiamen University, Xiamen 361005

² Institute of Fiber Optics, Shanghai University, Shanghai 208100

Received date: 2005-12-30

Abstract The axial strain of D-shaped fiber Bragg grating (D-FBG) and normal fiber Bragg grating induced by bending was analyzed with mechanics of materials. Bending sensitivity characteristic of Bragg wavelength's shift was obtained. Experiment result was in good agreement with the theory analysis. D-FBG's bending sensitivity was about 80 times higher than normal circularly symmetrical FBG. The studied D-FBG can be directly applied in bending measurement, and indirectly in pressure or acceleration measurement. The theory analysis and experiment result was helpful for the design of device or sensor system using D-FBG.

Keywords D-shaped fiber Bragg grating (D-FBG); Fiber bending sensing; Fiber Bragg grating sensor



Zhou Jinlong was born on March 14, 1981, in Yangzhong, Jiangsu Province, China. He received his B. E. degree from Xiamen University in 2003 and is currently pursuing the Ph. D. degree at Xiamen University. His research interest is in the field of fiber-optic sensor.