

文章编号: 0253-2239(2006)07-1001-6

四芯光纤弯曲传感器*

赵士刚¹ 王 雪² 苑立波^{2**}

(¹ 哈尔滨工程大学 国家大学科技园, 哈尔滨 150001)
(² 哈尔滨工程大学 理学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 提出了一种新颖的基于四芯光纤的弯曲传感器,可用于弯曲测量。该传感器采用一段四芯光纤作为敏感单元,四芯光纤的四个纤芯作为一个四光束干涉仪,在光纤出射端远场形成周期分布的干涉格子。该四光束干涉仪的干涉相位差是光纤弯曲曲率半径的函数,因而,弯曲曲率半径的变化可导致格子光场的移动。波长为 650 nm 的低相干半导体激光二级管被用来做为光源,所形成的干涉格子光场由 CCD 探测器记录。理论上,建立了远场格子图案强度分布函数与曲率半径的关系,并得到了实验的验证。

关键词: 光纤光学; 四芯光纤; 弯曲传感器; 远场; 格子图案

中图分类号: TP212.14; TN253 文献标识码: A

Four-Core Fiber Based Bending Sensor

Zhao Shigang¹ Wang Xue² Yuan Libo²

(¹ National University Science Park, Harbin Engineering University, Harbin 150001)
(² Department of Physics, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract: A novel four-core fiber-based bending sensor has been proposed, in which four-core fiber is used as the sensing element, the four cores of the fiber act as a four-beam interferometer, and the far-field interferogram grids with periodical distributions are formed on the fiber output end. The phase difference is a function of the radius of curvature, so the change of the radius of curvature shifts the far-field interferometric grid pattern. A low-coherence laser diode with wavelength of 650 nm is adopted to illuminate the fiber and the interferogram pattern in the far-field is recorded by a CCD camera. The relationship between the far-field grid pattern intensity distribution and the radius of curvature is established theoretically and confirmed experimentally.

Key words: fiber optics; four-core fiber; bending sensor; far field; grid pattern

1 引 言

许多建筑结构由于在载荷的作用下会发生弯曲。“智能结构”可主动矫正或补偿这些弯曲^[1],因而常常需要测量或监测这些连续结构的形变和弯曲。事实上,结构梁的变化通常是由于弯曲而产生应变,这样就需要对弯曲进行测量。常规的做法是借助于梁的上下两个应变片就可以测量弯曲,这是电子学采用的测量方法^[2~4]。同样地也可以用目前发展起来的两个光纤应变传感器来实现这种弯曲测量^[5,6]。事实上,目前已经提出了几种光纤弯曲传

感器,如:基于双模光纤的弯曲传感器^[7],多芯光子晶体光纤弯曲传感器^[8,9]和多芯光纤光栅传感器^[10]。这些传感器既可以表面粘贴,也可以埋入结构内部。无论是表贴还是植入结构内部,为了获得准确的测量性能,如何对温度的影响加以分离或进行补偿成为解决问题的关键。

本文所提出的基于四芯光纤的四光束单根光纤干涉仪可以自动补偿由于温度热膨胀所带来的影响,仅对绝对弯曲敏感。在该光纤弯曲传感器中,四个纤芯彼此间的相位差是弯曲曲率半径的函数。它

* 国家自然科学基金(60577005)教育部高校优秀青年教师教学科研奖励计划资助课题。

作者简介: 赵士刚(1963~),男,黑龙江甘南县人,哈尔滨工程大学博士研究生,主要从事光纤传感技术的研究。

** 通信联系人。E-mail: lbyuan@vip.sina.com

收稿日期: 2005-09-09; 收到修改稿日期: 2006-01-05

可以通过光纤出射端格子光场的位移进行探测并解调出来。

2 传感器理论模型的建立

实验中所用的四芯光纤的横截面图如图 1 所示。光纤有四个纤芯,只有一个共同的包层,这四根独立光纤纤芯以正方形的形式排列并置放于正方形的四个角上,每个纤芯都可以作为一个独立的导模,光纤含包层的直径为 $125\ \mu\text{m}$ 。

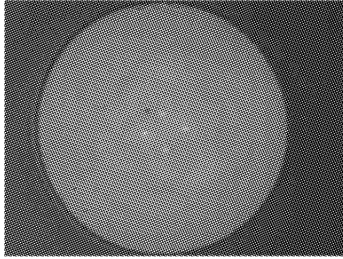


图 1 作为弯曲传感器的四芯光纤

Fig. 1 Four-core fiber acting as a bending sensor

为了分析四芯光纤由于弯曲导致的每个纤芯的相位差,建立了如图 2 所示的四芯光纤处于弯曲状态下的参考坐标,目的是方便建立起各个参量彼此间的数学关系。

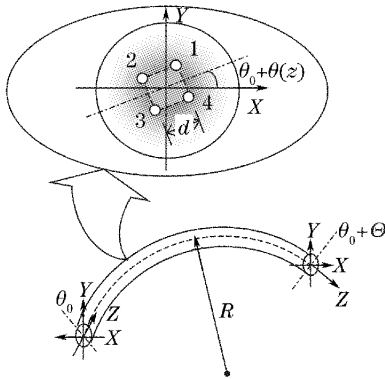


图 2 用于计算四芯光纤在弯曲状态下相位差的坐标关系

Fig. 2 Coordinate diagram to calculate the phase difference of the bended four-core fiber

对于由图 2 所给出的四芯光纤弯曲坐标系统,在给定的坐标系统中,光纤的弯曲处于 $Y-Z$ 平面内,其中任意一个纤芯 m 由弯曲所导致的相对于光纤轴心的相位差可表示为

$$\delta\phi_m = k_0 n L \left\{ \frac{\delta n_m}{n} + \frac{\delta L_m}{L} \right\}, \quad (1)$$

$$m = 1, 2, 3, 4$$

式中 k_0 为波数, n 为纤芯折射率, L 为光纤长度, δn_m 和 δL_m 分别为由于光纤弯曲所导致的第 m 个光纤纤芯的折射率和几何长度的变化。(1) 式中的 $\delta L_m/L$

项对应着第 m 个光纤纤芯的主应变

$$\epsilon_z = \frac{\delta L_m}{L} = \frac{x_m}{R}, \quad m = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

式中 R 为光纤弯曲的曲率半径, x_m 为纤芯 m 到 X 轴上的投影(从坐标原点到纤芯 m 间的线段在 X 轴上的投影),可由下式给出:

$$x_m = \frac{\sqrt{2}}{2} d \cos \left[\theta_0 + (2m-1) \frac{\pi}{4} + \theta(z) \right], \quad (3)$$

$$m = 1, 2, 3, 4$$

其中 d 为四芯光纤紧邻纤芯的间距(以四个纤芯为顶点的四边形边长), θ_0 为初始方位角, $\theta(z)$ 为四芯光纤沿传输路径的扭转角。而在弯曲过程中,其偏离轴心纤芯的折射率变化为^[11]

$$\delta n_m \approx \delta n_{mx} \approx \delta n_{my} \approx -c_2 \frac{n^3}{2} \frac{x_m}{R}, \quad (4)$$

$$m = 1, 2, 3, 4$$

式中 $c_2 = 0.204$, 为一常量。

于是,弯曲所导致的相位变化由下式给出:

$$\delta\phi_m = \frac{\sqrt{2} k_0 n L d}{2R} \left[1 - c_2 \frac{n^2}{2} \right] \times$$

$$\cos \left[\theta_0 + (2m-1) \frac{\pi}{4} + \theta(z) \right]. \quad (5)$$

假设四芯光纤沿传输方向其扭转角满足线性关系

$$\theta(z) = \frac{\Theta}{L} z, \quad (6)$$

式中 Θ 为光纤输出端的扭转净增角。则一段处于弯曲曲率为 R , 扭转角为 Θ 的四芯光纤,其每个纤芯由于弯曲和扭转所带来的输出相位差为

$$\Delta\phi_m = \frac{\sqrt{2} k_0 n L d}{2R} \left[1 - c_2 \frac{n^2}{2} \right] \times$$

$$\cos \left[\theta_0 + (2m-1) \frac{\pi}{4} + \Theta \right] =$$

$$\xi \left(\frac{L}{R} \right) \cos \left[\theta_0 + (2m-1) \frac{\pi}{4} + \Theta \right], \quad (7)$$

式中 ξ 为一无量纲常数。将 $k_0 = 2\pi/\lambda$; $\lambda = 0.65\ \mu\text{m}$; $n = 1.46$; $d = 18\ \mu\text{m}$ 和 $c_2 = 0.204$ 代入上式,则由(7)式得

$$\xi = \frac{\sqrt{2} k_0 n d}{2} \left(1 - c_2 \frac{n^2}{2} \right) = 140.46. \quad (8)$$

由于光纤长度 L 是一定的且已知,对于固定于待测材料或构件上的光纤,光纤的初始端和出射端的方位角也是确定的。因而,待测曲率半径 R 是相位差的函数。

由于四芯光纤的四个纤芯间距较小,本文所用光纤四个纤芯紧邻间距为 $18\ \mu\text{m}$, 当采用同一束光

注入时,可以认为四个光纤芯注入的光功率近似相同。为得到四芯光纤出射相干光场,可以借助于叠加原理,将四个光纤芯视为四个点光源,对四个光波矢

量场进行叠加^[12,13],从而可以推导出四芯光纤出射端的光场强度分布为

$$I(u, v) = 4I_0 [1 + \cos(\psi_1 - \psi_4) \cos(\phi_1 - \phi_4) + \cos(\psi_2 - \psi_3) \cos(\phi_2 - \phi_3) + \cos(\psi_1 - \psi_2) \cos(\phi_1 - \phi_2) + \cos(\psi_1 - \psi_3) \cos(\phi_1 - \phi_3) + \cos(\psi_2 - \psi_4) \cos(\phi_2 - \phi_4) + \cos(\psi_3 - \psi_4) \cos(\phi_3 - \phi_4)], \quad (9)$$

式中 ψ_m 为每个光纤芯的偏振方向与 X 轴的夹角,如图 3(c) 所示。 $(\phi_k - \phi_m)$ 为任意两个光纤芯之间的总相位差,由下式给出:

$$\phi_k - \phi_m = k_0(l_k - l_m) + (\Delta\phi_k - \Delta\phi_m), \quad (10)$$

$$k, m = 1, 2, 3, 4$$

式中 $l_m (m = 1, 2, 3, 4)$ 为光纤出射端纤芯 m 到观测平面之间的距离:

$$l_m = [(u - x_m)^2 + (v - y_m)^2 + D^2]^{1/2}, \quad (11)$$

对于远场而言满足条件, $(u, v) \gg (x, y)_{\max}$, 于是(11)式可以近似为

$$l_m \approx D \left[1 - \frac{ux_m + vy_m}{D} \right], \quad (12)$$

这样(10)式可进一步简化为

$$\phi_k - \phi_m = \frac{k_0}{D} [u(x_m - x_k) + v(y_m - y_k)] + (\delta\phi_k - \delta\phi_m), \quad (13)$$

$$k, m = 1, 2, 3, 4$$

式中 x_m 由(3)式给出, y_m 为纤芯 m 到 Y 轴上的投影,由下式给出:

$$y_m = \frac{\sqrt{2}d}{2} \sin \left[\theta_0 + (2m - 1) \frac{\pi}{4} + \theta(z) \right], \quad (14)$$

$$m = 1, 2, 3, 4$$

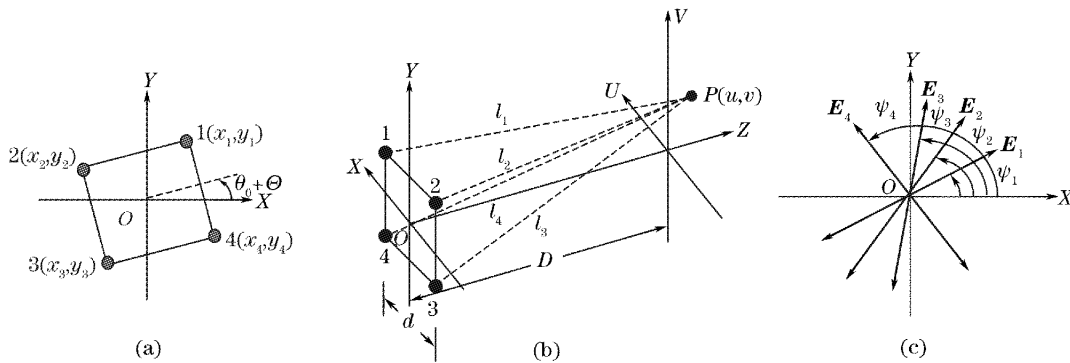


图3 四芯光纤出射端纤芯位置坐标、偏振状态和空间光场坐标系

Fig. 3 Core positions on the output end of the fore-core fiber, polarization states and spatial optical-field coordinate system

在实际测量过程中,调整注入光的偏振态,同时采用扭转出射端的方法,对出射的格子光场进行控制和调整,消除四纤芯对角线纤芯(1,3)和(2,4)之间的干涉。并进一步合并纤芯(1,2)和(3,4)以及(1,4)和(2,3)干涉项,从而使得光场函数(9)简化为

$$I(u, v) = 4I_0 \{ 1 + 2\zeta_1 \cos(\phi_1 - \phi_2) + 2\zeta_2 \cos(\phi_1 - \phi_4) \}, \quad (15)$$

式中 $\zeta_1 = \cos(\psi_1 - \psi_2)$, $\zeta_2 = \cos(\psi_1 - \psi_4)$ 为一个小于1的与偏振态相关的常量系数。将(3)式,(8)式,(13)式和(14)代入(15)式得弯曲曲率半径 R 与远场干涉格子之间的函数关系为

$$I(u, v) = 4I_0 \left\{ 1 + 2\zeta_1 \cos \left\{ \frac{k_0 d}{D} [u \cos(\theta_0 + \Theta) - v \sin(\theta_0 + \Theta)] - \sqrt{2} \xi \left(\frac{L}{R} \right) \cos(\theta_0 + \Theta) \right\} \right. \\ \left. + 2\zeta_2 \cos \left\{ \frac{k_0 d}{D} [u \cos(\theta_0 + \Theta) - v \sin(\theta_0 + \Theta)] - \sqrt{2} \xi \left(\frac{L}{R} \right) \sin(\theta_0 + \Theta) \right\} \right\}, \quad (16)$$

由(16)式可以看出,弯曲曲率半径 R 的改变对应着光场 $I(u, v)$ 的一个空间平移。该平移的大小与曲率 $\rho = 1/R$ 之间存在线性关系:

$$\rho = \frac{k_0 d}{\xi L D} [u - v \tan(\theta_0 + \Theta)] + C, \quad (17)$$

式中 C 为一个常量。

由于每一个光纤芯都可以近似看作独立的单模光纤,而单模光纤出射光场的强度分布近似为高斯分布,即(16)式中的 I_0 可近似表达为^[14]

$$I_0 = G_0 \exp \left\{ -\frac{u^2 + v^2}{a_0^2 [1 + \eta (D/a_0)^{3/2}]^2} \right\}, \quad (18)$$

式中 G_0 为表征光场强度的常量, $\eta = 0.81 \times 10^{-7}$ 为

与光纤数值孔径相关的无量纲参量, $a_0 = 1.9 \mu\text{m}$ 为每一个光纤芯的模场半径, $D = 3 \text{ mm}$ 为光纤出射端到 CCD 探测面的距离,如图 4(a) 所示。将(18)式代入(16)式中,与实验情况对应,选 $\theta_0 = \Theta = 0$ 时,图 4(b) 给出了实验中获得的出射光场分布图,与由(16)式所给出的理论模拟结果[图 4(c)] 相比较,可以看出两者是比较吻合的。

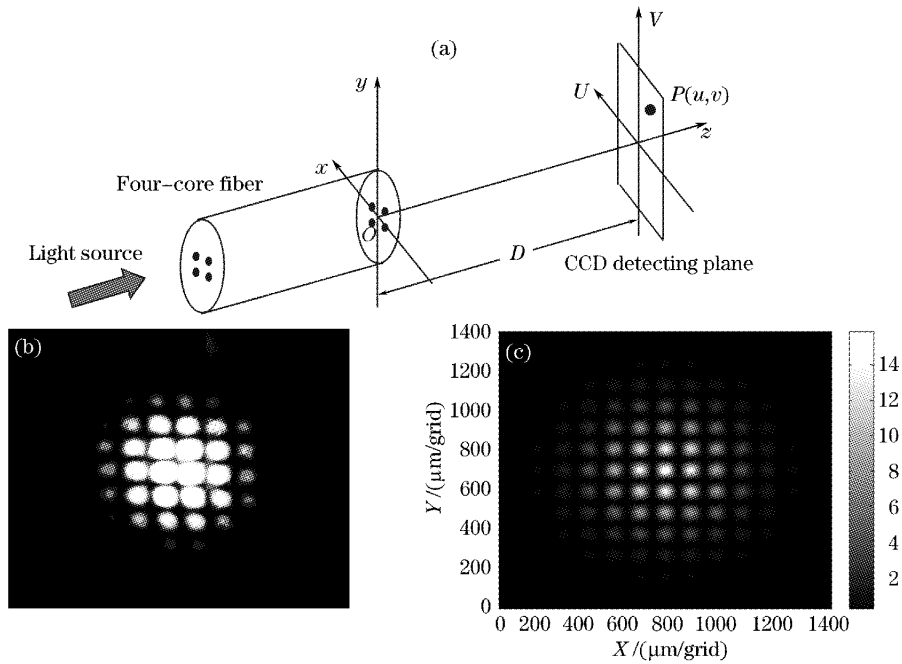


图 4 四芯光纤端出射光场实验与理论对比图。(a) 实验装置示意图, (b) 实验中获取的纤端出射远场图, (c) 理论仿真获取的纤端出射远场图

Fig. 4 Four-core fiber output far-field fringe patterns from experimental results (b) and theoretical simulation (c) with the experimental setup (a)

3 实验装置与传感特性参量的关系

实验中,在两个尺寸大小相同的金属弹簧片中间刻出一个小槽,用环氧树脂将四芯光纤胶合在两个金属弹簧片之间,以保证当组合弹簧片在弯曲的

时候光纤轴线处于无应变的中线上。弹簧片长度为 $L = 15 \text{ cm}$,采用力学上常用的三点弯曲梁结构,如图 5 所示。在实验中,简支梁的间距 $AB = 12 \text{ cm}$,弯曲中点由一个螺旋千分尺进行推进,每次步进递

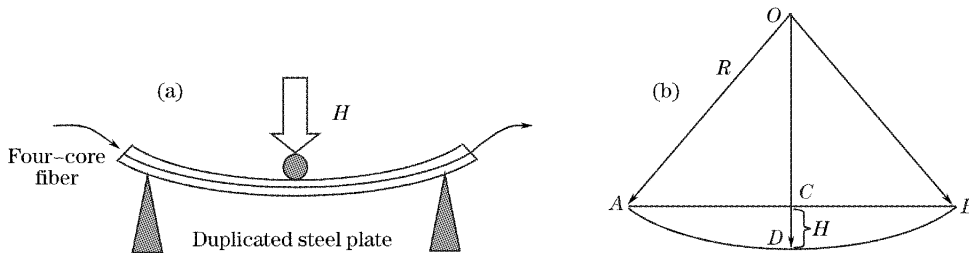


图 5 嵌入四芯光纤的金属弹簧片三点弯曲梁实验装置。(a) 三点弯曲简支梁结构, (b) 几何尺寸关系示意图

Fig. 5 Three-point bending beam experimental setup with four-core fiber embedded in the neutrality layer.

(a) Experimental setup of the three-point bending beam (b) schematic plan of the geometrical sizes

增 2 mm,直到 CD 累计达到 12 mm,依图 5(b)所给出的几何关系,设 $CD = H$,有

$$R = \frac{4H^2 + 12^2}{8H}(\text{cm}), \quad (19)$$

图 6 给出了随着三点弯曲曲率挠度 H 的递增,弯曲

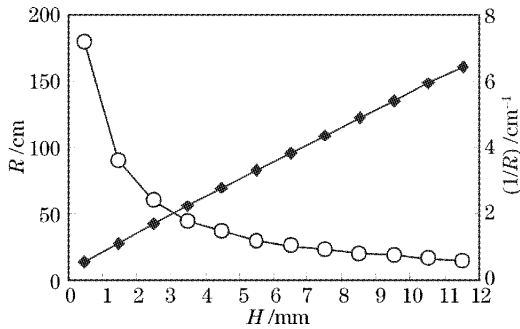


图 6 三点弯曲梁的挠度 H 与曲率半径 R 及曲率 $(1/R)$ 之间的关系曲线

Fig. 6 Relationship between deflection H and the radius of curvature as well as the curvature $(1/R)$ for the three-point bending beam

曲率半径 R 和曲率 $\rho(= 1/R)$ 之间的关系曲线,由此可以看出,曲率 ρ 与 H 近似呈线性关系。

4 实验结果与讨论

在四芯光纤出射端,CCD 所探测到的干涉图如图 7 (a) 所示。可以测得扭转角 $(\theta_0 + \Theta) = 71.5^\circ$ 。此干涉图的平移测量方法如图 7(b) 所示。测量得到曲线挠度 H 与 U 轴方向的平移和 V 轴方向的平移曲线由图 8(a) 给出,借助于图 5 的换算关系,可以还原为曲率半径,通过这种方法,就实现了结构弯曲的测量。

而图 8(b) 则给出了待测梁的挠度 H 与曲率 $(1/R)$ 之间的数据关系。理论计算由(19)式给出,实验上通过测量 Δu 和 Δv [如图 8(a) 所示],然后经过(18)式的变换,就得到了 H 与 $1/R$ 之间的实验测试数据点,如图 8(b) 所示。对比可以看出两者存在一定的差异。

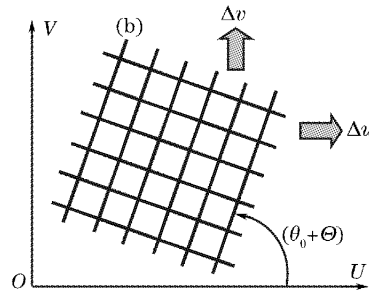
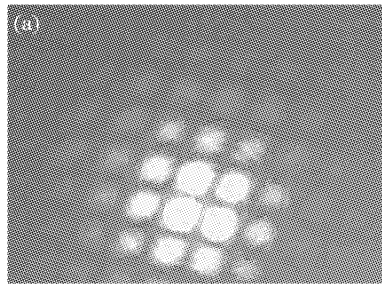


图 7 四芯光纤端远场格子干涉图及其位移测量方法示意图。(a) CCD 探测的远场干涉图,(b)格子整体平移测量方法
Fig. 7 The far-field interferometric grid pattern and its shift measuring approach. (a) Far-field fringe pattern from CCD and (b) measuring method of the integral shift of grid pattern

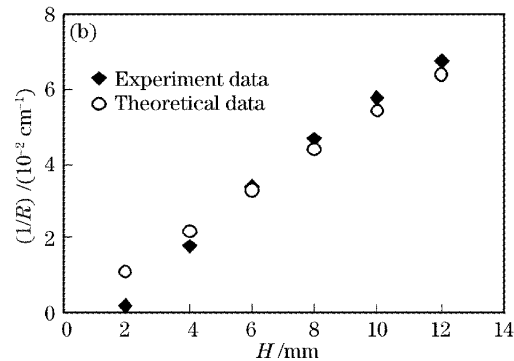
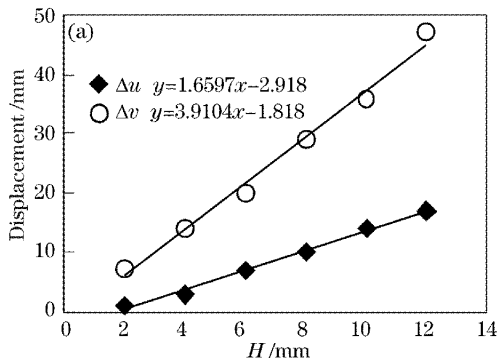


图 8 (a) H 与格子光场的位移之间的测试结果,(b) H 与 $(1/R)$ 之间的理论与实验对比结果
Fig. 8 (a) Measuring results of H and the shift of the grid pattern and (b) comparison between experimental data and theoretical prediction

事实上,偏振态对本项测量有一定的影响。随着弯曲曲率半径的缩小,双折射效应在每个光纤芯

中就会逐渐增强,但好在双折射效应与沿光纤传输轴的主应变是彼此独立的,因为通过横向折射率

变化差,消除了主应变项,即

$$\Delta\delta n = \delta n_x - \delta n_y = (c_2 - c_1) \frac{n^3}{4R^2} (x_m^2 - r^2), \quad (20)$$

式中 $c_1 = 0.075$, r 为光纤的半径。尽管这个差值相对比较小,但对纤端格子光场的输出则通过对四个光纤芯中的偏振态 $\psi_m (m = 1, 2, 3, 4)$ 的改变而产生影响。在所采用的特殊四芯光纤的情况下,由于四个纤芯相对比较集中,这个影响相对要小一些。

5 结 论

多芯光纤弯曲传感器由于体积小,结构紧凑,构成的材料一致、热膨胀系数相同,因而具有自温度补偿的特点。可以对弯曲曲率的大小和方向进行分辨,可用做绝对弯曲传感。本文采用自行设计的四芯光纤作为四光束干涉仪,对其弯曲传感特性进行了讨论。分析了其传感机理,给出了相应的实验验证结果。由于四芯光纤的四光束光程差极小,因而可以用普通的半导体激光二极管作为它的光源,而不需要用体积较大的 He-Ne 激光器,从而使得该光纤弯曲传感器具有更加紧凑的结构。同时应该指出的是,这种传感器的光源与探测分别需要在光纤的两边布置,给应用带来了一定的不便。

参 考 文 献

- 1 B. Culshaw. *Smart Structures and Materials* [M]. Artech House, Norwood, MA, 1996. 5~18
- 2 Zhou Xiaojun, Gong Junjie, Liu Yongzhi *et al.*. Analysis of white-light interference distributed optic fiber sensor by polarized modes coupling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 605~608 (in Chinese)
- 3 Xiong Shuidong, Lou Hong, Hu Yongming *et al.*. Research on interferometric polarization maintaining fiber optic microvibration vector sensor[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(7): 843~847 (in Chinese)
- 4 Lingyun Xiong, Guiyun Kai, Lei Sun *et al.*. Dual wavelength erbium-doped fiber laser with a lateral pressure-tuned Hi-Bi fiber Bragg grating[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(12): 686~690
- 5 D. A. Jackson. Recent progress in monomode fiber-optic sensors [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1994, **5**(6): 621~638
- 6 M. G. Xu, J. L. Archambault, L. Reekie *et al.*. Thermally-compensated bending gauge using surface-mounted fiber gratings [J]. *Int. J. Optoelectron*, 1994, **9**(3): 281~283
- 7 C. E. Covington, J. Blake, S. L. A. Carrara. Two-mode fiber-optic bending sensor with temperature and strain compensation [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(9): 676~678
- 8 M. J. Gander, E. A. C. Galliot, R. McBride *et al.*. Bend Measurement Using Mutli-Core Optical Fiber [M]. 12th International Conference on Optical Fiber Sensors, 1997. 166~169
- 9 M. J. Gander, D. Macrae, E. A. C. Galliot *et al.*. Two-axis bend measurement using multicore optical fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **182**(1~3): 115~121
- 10 M. J. Gander, W. N. MacPherson, R. McBride *et al.*. Bend measurement using Bragg gratings in multicore fiber [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(2): 120~121
- 11 R. Vallee, D. Drolet. Practical coupling device based on a two-core optical fiber[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(24): 5602~5610
- 12 Yuan Libo. Fiber-optic moiré interferometer[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1997, **14**(9): 675~677
- 13 Yuan Libo, Zhou Limin. Fiber optic moiré interference principle [J]. *Optical Fiber Technol.*, 1998, **4**(2): 224~232
- 14 Yuan Libo, Zhao Qingwei, Liu Qian. Output optical field intensity distribution of a single mode fiber end[J]. *Opt. Commun. Technol.*, 1995, **19**(2): 158~160 (in Chinese)
- 苑立波,赵庆伟,刘启安. 单模光纤纤端光场的强度分布[J]. *通信技术*, 1995, **19**(2): 158~160