

# 高灵敏度双折射光纤压力传感器

谢海明

(中国科学院安徽光学精密机械研究所)

## 提 要

本文报道了一种高灵敏度双折射光纤压力传感器。它的结构简单,环境温度的变化几乎不影响它的灵敏度。压力温度灵敏度比约为  $53\text{K}\cdot\text{bar}^{-1}$ 。它的温度灵敏度只是“熊猫”光纤的  $1/7.5$ 。

关键词: 光纤, 纤维光学, 光纤传感器。

## 一、引 言

马赫-陈德(Mach-Zehnder)干涉型光纤双折射传感器的优点是相干模在完全相同的温度和压力条件下,对以不同方式影响二个模的外场获得很好的响应。它的结构简单,只需要用二个空间滤波器或检偏器把二个干涉模分开和重新合成。

采用偏振保持光纤的传感器不仅有比传统的干涉型光纤传感器更为简单的结构形式,而且能用它获得较佳的压力灵敏度<sup>[1]</sup>。

本文报道了一种新型偏振光纤压力传感器的设计与制作。它有很高的压力灵敏度,且其灵敏度几乎不受环境温度的影响。

## 二、理 论

对单模偏振传感器可以通过评价干涉相位的大小和干涉级次来达到相位测量。现在讨论相位灵敏度  $s = l^{-1} \cdot d\phi/dP$ 。式中  $l$  是承受压力光纤段的长度。为了便于分析  $s$ , 考虑有同样几何尺寸的方孔、方截面的光纤模型(图 1(a))。在中心区近光纤芯处,内压力  $P_i$  产生沿  $X$  方向的合张力  $\sigma_x = -P_i$ , 沿  $Y$  方向的合张力  $\sigma_y = (2r_0/w)P_i$ ,  $w = b - 2r_0$  表示光纤任一边的总壁厚。张力的各向异性为  $(\sigma_x - \sigma_y) = -(P_i b/w)$ 。采用平面波近似,直接从弹光分析产生的双折射为<sup>[2]</sup>

$$B = \beta_x - \beta_y = -s_i P_i, \quad (1)$$

$$s_i = -(F_{11}^3 b / \lambda w) (F_{11} - F_{12}), \quad (2)$$

式中  $\beta_x$ 、 $\beta_y$  分别是  $X$  方向和  $Y$  方向上偏振光传播常数,  $\lambda$  是自由空间波长,  $n_0$  是平均折射率,  $F_{ij}$  是压光张量分量; 对二氧化硅  $(F_{11} - F_{12}) = -2.4 \times 10^{-7} \text{bar}^{-1}$ , 采用波长  $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$  以及所用光纤几何尺寸, 相位灵敏度  $s_i = 9.6 \text{rad}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{bar}$ 。

当外压力  $P_0$  作用在光纤上时,产生的张力各向异性为  $(\sigma_x - \sigma_y) = P_0(b/w)$ , 该值与压力作用在通道内产生的张力各向异性的绝对值相同。这表明光纤材料的弹性是各向同性和

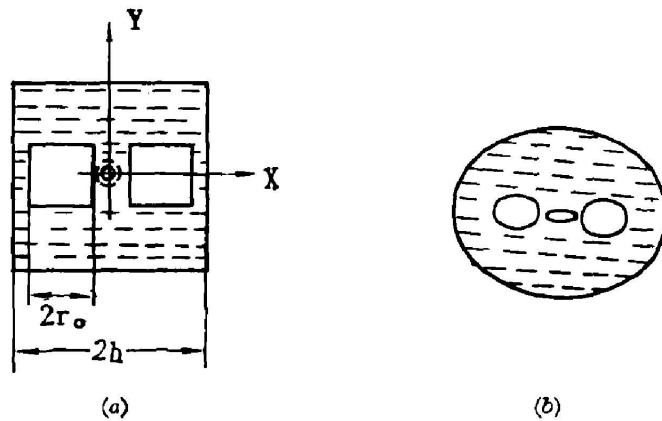


Fig. 1

- a) Square model of side-hole fiber used for approximate calculations;  
 b) Cross-section of experimental fiber (approximate dimension  $2b=190\ \mu\text{m}$ ;  $2r_0=58\ \mu\text{m}$ )

均匀的。当在邻近光纤芯区没有满足这些条件时,实际光纤的双折射可以有如下形式:

$$B = B_T + s_0 P_0 - s_i P_{i0} \quad (3)$$

为由于在拉制过程中温度的张力或者芯线的缺陷所造成的静态双折射。

假设(见图2)光纤在拉制过程中,当冷却到固化温度  $T_{TR}$  时,光纤应该没有固有双折射,当温度继续下降时,光纤双折射线性增加,这是因为掺杂石英和不掺杂石英有不同的温度膨胀系数。在某一温度时的光纤双折射为

$$B = B_0 - C_T \cdot T \quad (4)$$

$B_0$  为  $0^\circ\text{C}$  时光纤双折射;  $C_T$  为温度灵敏度。在室温时

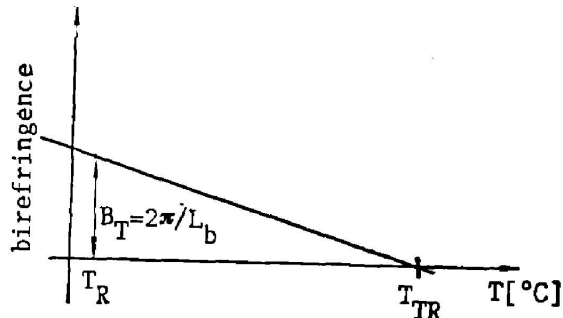


Fig. 2 Versus temperature

$$B(T_R) = B_0 - C_T T_R = B_T = (2\pi/L_b) \quad (5)$$

$$B_0 = B_T + C_T T_R \quad (6)$$

在温度  $T_{TR}$  时

$$B(T_{TR}) = B_0 - C_T \cdot T_{TR} = 0 \quad (7)$$

由此我们得到

$$B_T = C_T (T_{TR} - T_R) \quad (8)$$

### 三、实验及讨论

光纤压力传感器所用的光纤如图1(b)所示。该光纤的截面形状类似于“熊猫”光纤,只是在包层里有二个空气通道。它是用本身有二个孔洞的预制棒拉制而成的。光纤的折射率差为0.24%,芯的形状是圆的。由于在二氧化硅-空气界面各处张量不相等,在光纤拉制过程中,芯的形状发生形变。我们实测芯线为  $4\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ 。光纤的截止波长为  $\lambda > 1.13\ \mu\text{m}$ 。

仔细调节光纤微调架, 满足激励单模的条件时能使这种光纤在较短的波长以它的基模工作。

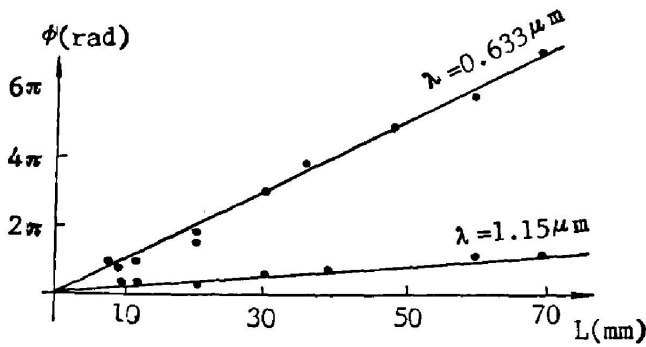


Fig. 3 Length of optical fiber versus retardation

用通常的实验装置测量静态双折射, 光源为  $\lambda=0.633 \mu\text{m}$  和  $\lambda=1.15 \mu\text{m}$  单模偏振激光器, 用透镜把光耦合输入、输出光纤。用检偏器和 Soleil-Babinet 补偿器测量静态双折射。测量一组长短不同的光纤 (10 mm~70 mm) 的延迟量来确定静态双折射。实测结果示于图 3。当  $\lambda=0.633 \mu\text{m}$  时,  $B_T=(305 \pm 10)\text{rad/m}$ , 对应的偏振拍长  $L_b=20.6 \text{mm}$ ; 当  $\lambda=1.15 \mu\text{m}$  时,  $B_T=(43 \pm 5)\text{rad/m}$ , 相应的偏振拍长  $L_b=145 \text{mm}$ 。  $B_T$  正号表示光纤慢轴沿  $X$  方向。这与我们用电光调制测量拍长当  $\lambda=0.633 \mu\text{m}$  时,  $L_b=19.3 \text{mm}$  基本一致<sup>[3]</sup>。产生误差的原因主要是当光纤端面抛光时, 光纤芯区边缘有少量擦痕而影响光的耦合; 其次, 是由于光纤本身的扭曲 (60 mm 长的光纤两端面相对扭转为  $25^\circ \sim 30^\circ$ )。

测量压力, 温度的实验装置如图 4 所示。在外压力测量时, 把长度为 0.85 m 的光纤放入内径为 2 mm 的钢管中, 然后用环氧树脂密封。当光纤内孔承载正常大气压时, 钢管能承受 10 bar 大气压。当测量内压力时, 把另一段长为 0.97 m 的光纤二端用玻璃窗口密封, 用于耦合光进入光纤或从光纤出射。这时光纤外部承受正常大气压。

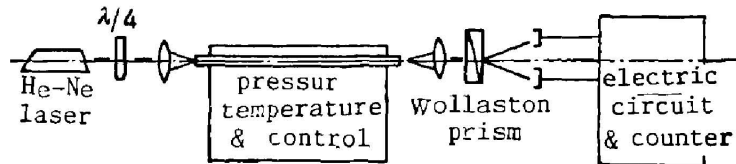


Fig. 4 Experimental setup for pressure and temperature measurement

### 1. 压力与双折射的关系

当改变内压力或外压力时, 双折射被连续改变, 并探测到周期改变的信号。测量结果示于图 5。图中表明所预期的压力关系是存在的。并且与方程 (1)~(3) 所计算的结果相一致。当  $\lambda=0.633 \mu\text{m}$  时,  $s_i=10.2 \text{rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ ,  $s_0=11.05 \text{rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$  与计算值  $s_i=9.6 \text{rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$  很吻合,  $(s_0/s_i)=1.12$ ; 当  $\lambda=1.15 \mu\text{m}$  时,  $s_i=4.57 \text{rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ ,  $s_0=5.48 \text{rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ ,  $(s_0/s_i)=1.2$ , 都稍许偏离单位 1。这表明在光纤材料里确实存在弹性的不均匀性或各向异性的值随波长增加而增加是因为多模扩充进入各向异性的张力区域。

### 2. 温度与相移的关系

温度测量装置同前。我们把长为 0.75 的光纤放置在直径为 2 mm 的钢管内。电热丝缠绕在钢管外, 改变电压控制温度。测量的结果示于图 6。当  $\lambda=0.633 \mu\text{m}$  时, 温度从  $5^\circ\text{C}$  上升到  $76^\circ\text{C}$  (与室温差), 每隔  $5^\circ\text{C}$  记录一次相移的变化, 测得的温度灵敏度  $C_T=0.2 \text{rad} \cdot$

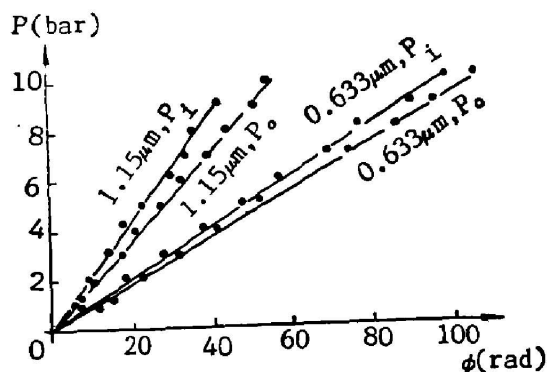


Fig. 5 Pressure-induced retardation

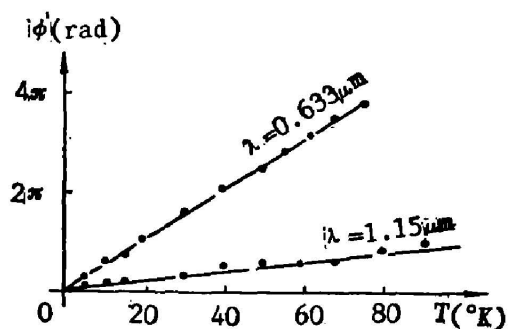


Fig. 6 Temperature-induced retardation

$\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。当  $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$  时, 温度的变化从  $5^\circ\text{C}$  到  $110^\circ\text{C}$ , 温度灵敏度  $C_T = 0.038 \text{rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

在实验中, 还发现降低压力与升高温度所引起的双折射改变的趋势是一致的; 反之, 亦然。这与我们对高双折射光纤双折射的理论分析和假设是完全一致的。

当用传感器测量内压力时, 由于侧孔光纤弹性容积小, 约为  $5 \text{mm}^3/\text{m}$ ; 所以当测量液体压力时, 由于液体的粘滞效应, 影响了响应速度。当压力不变时,  $1 \text{m}$  长的光纤约有  $1 \text{m}$  时间常数。当传感器测量外压力时就不存在这样的问题。

#### 四、结 论

作者设计和制作了一种新型双折射光纤压力传感器。当  $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$  时, 压力灵敏度为  $s_i = 10.2 \text{rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ ,  $s_o = 11.0 \text{rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ ; 温度灵敏度为  $C_T = 0.2 \text{rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。压力温度灵敏度比为  $53 \text{K} \cdot \text{bar}^{-1}$ 。这要比通常双折射光纤的压力温度灵敏度比的理论值<sup>[4]</sup>高 46 倍。它的温度灵敏度只是“熊猫”光纤的  $(1/7.5)$ <sup>[5]</sup>。换言之, 该种压力传感器在很大的动态范围内变化有压力感应双折射, 它的压力灵敏度几乎不受环境温度变化的影响, 而且结构简单、性能可靠。

作者感谢日本电信电话公司茨城电气通信研究所为我们提供了侧孔光纤。感谢 Ph. Dabkiwicz 博士和 R. Ulrich 教授对本工作所进行的有益讨论。

#### 参 考 文 献

- [1] M. P. Varnham, A. J. Barlow *et al.*; *Electron. Lett.*, 1983, 19, No. 17 (Aug), 699~700.
- [2] H. M. Xie, Ph. Dabkiewicz *et al.*; *Opt. Lett.*, 1986, 11, No. 5 (May), 333~335.
- [3] 谢海明; 《应用激光》, 1987, 7, No. 4 (Jul), 155~156.
- [4] W. Eickhoff; *Opt. Lett.*, 1981, 6, No. 4 (Apr), 204~206.
- [5] Y. Kikuchi, B. Yamauchi; *2nd International Conf. on Optical Fiber Sensors*, Stuttgart, 1984, 395~398.

## Birefringent fiberoptic pressure sensor with high sensitivity

XIE HAIMING

*(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)*

(Received 3 April 1987; revised 11 September 1987)

### Abstract

This paper describes a birefringent fiber-optic pressure sensor with high sensitivity and simple structure. The disturbance of environmental temperature doesn't affect its sensitivity. Pressure-versus-temperature sensitivity ratio is about  $53(\text{K} \cdot \text{bar}^{-1})$ . The temperature sensitivity is only  $1/7.5$  of that of "Panda" fiber.

**Key words:** fiber; fiber optics; fiber-optic sensor.