

# 干涉型光纤声传感器的研究

唐明光 廖波帆 刘树杞 樊均洪  
(成都电讯工程学院)

## 提 要

本文对光纤声传感器的压力灵敏度作了理论分析,且分析讨论了非均匀压力下的灵敏度,实现了直流相位跟踪零差检测(PTDC)系统,并测定了声压与输出电信号的关系,采用5m长光纤得到声压检测阈值为200 $\mu\text{Pa}$ 。

关键词: 光纤声传感器。

## 一、引 言

众所周知,干涉型光纤传感器在理论上具有很高的灵敏度,探测微弱信号尤显优越。目前,对水下军事应用、水下鱼群探测、保密监听等微弱声探测及微弱电信号,噪声测试都具有非常实际的意义。从70年代末以来,人们一直利用干涉型光纤传感器的高灵敏度进行微弱声探测的研究<sup>[1]</sup>。采用Mach-Zehnder干涉仪装置,10m长包Hyterl护套光纤,在光功率15 $\mu\text{W}$ ,频率1kHz情况下,检测最小声压为100 $\mu\text{Pa}$ <sup>[2]</sup>。干涉型光纤声传感器的研究成果也具有较强的通用性,只需改变光纤的被复材料及传感器结构,便可推广到磁场、温度、电流、振动、地震波等物理量的探测。因此,它是一种多功能检测系统。

作为干涉型光纤传感器的检测没有单一的最佳方案,在现有的方案中,每一种都有其利弊。对零差检测系统而言,主要技术问题是如何解决由于相位随机漂移而产生的信号衰落,以使输出稳定<sup>[3~5]</sup>。本文所报道的干涉型光纤声传感系统,采用直流相位跟踪(PTDC)的方法实现了抗信号衰落。PTDC系统的优点在于结构简单,电学复杂性低,信号畸变小以及系统处于线性运行状态等。该系统在国内未见报道,国外仅见一例<sup>[6]</sup>。它是在真空条件下,用信号源驱动绕有光纤的信号臂的压电陶瓷以模拟声信号。本文描述的是实际环境中,用喇叭作为声波激励光纤敏感头的系统。

## 二、干涉型光纤声传感器理论

### 1. 干涉型光纤声传感器机理

当光纤在外界声压作用下,其折射率 $n$ 和长度 $l$ 发生变化,从而引起光纤中传输光的相位 $\phi$ 产生 $\Delta\phi$ 的变化,可容易地得出

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta n}{n} = \epsilon_s + \frac{\Delta n}{n} \quad (1)$$

式中,  $\epsilon_3 = \frac{\Delta l}{l}$  为光纤的轴向应变。折射率  $n$  的改变可根据光弹性效应计算<sup>[4]</sup>, 即

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{ij} = P_{ijkl}\epsilon_{kl}, \quad (i, j, k, l=1, 2, 3) \quad (2)$$

式中,  $P_{ijkl}$  为光弹系数,  $\epsilon_{kl}$  为应变。对于沿  $z$  轴(即 3 轴)传播的光波, 我们只关心  $\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{11}$  和  $\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{22}$ , 具有  $\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{11} = \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{22} = -2\frac{\Delta n}{n^3}$ ,  $\epsilon_{11} = \epsilon_{22}$ 。考虑到光纤为一各向同性介质, 因而将(2)式中的脚标简化后有

$$P_{12} = P_{13}, \quad P_{44} = \frac{1}{2}(P_{11} - P_{12})。 \quad (3)$$

于是得到相对相位灵敏度  $\frac{\Delta\phi}{\phi}$  为

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \epsilon_3 - \frac{n^2}{2}[2\epsilon_1(P_{11} - P_{44}) + \epsilon_3(P_{11} - 2P_{44})]。 \quad (4)$$

这就是相位灵敏度的通式。式中  $\epsilon_1$  为光纤的径向应变,  $\epsilon_3$  为轴向应变,  $P_{11}$ 、 $P_{44}$  为光弹系数。式中第一项为光纤长度变化引起的相位变化, 第二项为光纤折射率变化产生的光相应变化。对于石英光纤,  $P_{11} = 0.13$ ,  $P_{44} = -0.075$ ,  $n = 1.46$ , 代入式(4)后得

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = 0.70\epsilon_3 - 0.44\epsilon_1。 \quad (5)$$

应变  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_3$  可由弹性理论推得<sup>[6,7]</sup>, 其结果如下

$$\begin{cases} \epsilon_3 = \frac{1}{E_g} [\sigma_{\theta\theta} - \nu_g(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{r\theta})], \\ \epsilon_1 = \frac{1}{E_g} [\sigma_{r\theta} - \nu_g(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\epsilon\theta})], \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $E_g$ 、 $\nu_g$  分别为光纤芯的杨氏模量和泊松比,  $\sigma_{r\theta}$ 、 $\sigma_{\theta\theta}$  分别为光纤芯的径向和切向应力,  $\sigma_{\epsilon\theta}$  为轴向应力, 其值为

$$\sigma_{r\theta} = \sigma_{\theta\theta} - P_t。 \quad (7)$$

$$\begin{cases} \sigma_{\theta\theta} = -\frac{(1-2\nu_c)P + 2(1-f)\nu_g E_c/E_g + f\nu_c P_t}{f + (1-f)E_c/E_g}, \\ P_t = \left[ \frac{2(1-\nu_c^2)}{(1-f)E_c} - \frac{(\nu_c - \nu_g)(1-2\nu_c)}{fE_g + (1-f)E_c} \right] \frac{P}{Q}, \\ Q = \frac{(1+\nu_c)[1+f(1-2\nu_c)]}{(1-f)E_c} + \frac{1-\nu_g-2\nu_c\nu_g}{E_g} \\ + \frac{2(\nu_c - \nu_g)[(1-f)\nu_g E_c/E_g + f\nu_c]}{fE_g + (1-f)E_c}。 \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $E_c$ 、 $\nu_c$  分别为光纤包层的杨氏模量和泊松比,  $f = \left(\frac{a}{b}\right)^2$ ,  $a$ 、 $b$  分别为光纤芯的半径和包括被复层在内的光纤半径,  $P$  为声压。

## 2. 三种光纤的相位灵敏度(各向均匀压力)

根据理论分析, 对裸光纤, 镀铝光纤和环氧被复层光纤的相位灵敏度进行了计算, 结果如表 1 所示。表中  $E_g = 7.2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ,  $\nu_g = 0.17$ 。

Table 1 Comparison between the phase sensitivities of three optical fibers

type of optical fiber	$f = \left(\frac{a}{b}\right)^2$	$E_c (\times 10^{10} \text{ N/m}^2)$	$\nu_c$	$E_c/E_g$	$\frac{\Delta\phi}{\phi \cdot \Delta P} (\times 10^{12} \text{ m}^2/\text{N})$
nacked optical fiber	1	7.20	0.17	1	-2.380 (12.186)
Alcoated optical fiber	0.46	7.00	0.36	1	-0.571 (11.441)
epoxyresin coated optical fiber	$0.44 \ll 1$	0.25	0.40	$0.035 \ll 1$	-27.9 (159.8)
note	Values in parentheses under $\frac{\Delta\phi}{\phi \cdot \Delta P}$ are calculated under an isotropic pressures $P$ in Pa.				

### 3. 非各向均匀压力下的灵敏度

事实上, 光纤受到的压力往往不是各向同性, 若光纤绕在圆筒上, 如图 1 所示, 其轴向受到的是拉力  $P_s$  的作用, 而不是压力  $P$ 。这样光纤的轴向应变增大, 从而提高相位灵敏度。在这种情况下, 应变应为

$$\epsilon_z = -[\sigma_z + \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)]/E, \quad (9a)$$

$$\epsilon_r = -[\sigma_r + \nu(\sigma_z - \sigma_\theta)]/E, \quad (9b)$$

$$\epsilon_\theta = -[\sigma_\theta + \nu(\sigma_z - \sigma_r)]/E. \quad (9c)$$

由平衡条件

$$f\sigma_{zg} + (1-f)\sigma_{zc} = -P_s, \quad (10)$$

和连续条件

$$\epsilon_{zg} = \epsilon_{zc}, \quad \epsilon_{\theta g}|_{r=a} = \epsilon_{\theta c}|_{r=a}. \quad (11)$$

解得包层应力为

$$\begin{cases} \sigma_{rc} = \frac{a^2(P_r - P_t)}{(1-f)r^2} + \frac{fP_t - P_r}{1-f}, \\ \sigma_{\theta c} = \frac{a^2(P_r - P_t)}{(1-f)r^2} + \frac{fP_t - P_r}{1-f}. \end{cases} \quad (12)$$

光纤芯应力为

$$\sigma_{rg} = \sigma_{\theta g} = -P_{t0} \quad (13)$$

且有  $P_r = P \cos \theta$ ,  $P_s = P \sin \theta$ , 由式(9)、(10)、(11)、(12)、(13)解得

$$\sigma_{zg} = \frac{(\sin \theta + 2\nu_c \cos \theta)P + 2[f\nu_c + (1-f)\nu_f E_c/E_g]P_t}{f + (1-f)E_c/E_g}, \quad (14a)$$

$$P_t = \left[ \frac{2(1-\nu_c^2)}{(1-f)E_c} \cos \theta + \frac{(\nu_c - \nu_g)(\sin \theta + 2\nu_c \cos \theta)}{fE_g + (1-f)E_c} \right] \frac{P}{B}, \quad (14b)$$

$$B = \frac{(1+\nu_c)[f(1-2\nu_c)+1]}{(1-f)E_c} + \frac{1-\nu_g-2\nu_c\nu_g}{E_g} + \frac{2[(1-f)\nu_g E_c/E_g + f\nu_c](\nu_c - \nu_g)}{fE_g + (1-f)E_c}. \quad (14c)$$

可见圆筒上不同方位处, 光纤受到的应力不同。为了求得总的效应, 我们取平均, 即

$$\bar{\sigma}_{zg} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_{zg} d\theta, \quad (15a)$$

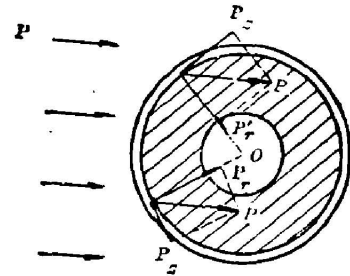


Fig. 1 Inhomogeneous pressures acting on the optical fiber

$$\bar{P}_i = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} P_i d\theta. \quad (15b)$$

由式(9)和(12)、(13)得

$$\bar{\epsilon}_{sg} = -[\bar{\sigma}_{sg} - 2\nu_g \bar{P}_i], \quad (16a)$$

$$\bar{\epsilon}_{rg} = [\nu_g \bar{\sigma}_{sg} - (1 - \nu_g) \bar{P}_i]. \quad (16b)$$

从而得

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = 0.70\bar{\epsilon}_{sg} - 0.44\bar{\epsilon}_{rg}. \quad (17)$$

由此计算得到的三种光纤的压力灵敏度也列于表1中(即括号内的值)。

### 三、信号的检测

信号检测是干涉型光纤传感器的重要环节。检测目的是把传感器的光学输出转换为正

比于信号场振幅的一个电信号。干涉型光纤传感器的检测系统较之振幅型光纤传感器的检测系统要复杂得多,是目前正在研究的一项关键技术。

现在讨论图2所示的检测系统。为分析方便,设信号只作用于信号臂,检测系统只作用于参考臂。信号臂光纤的出射光场电矢量为

$$\mathbf{E}_s = \mathbf{E}_{s0} \exp[j(\omega t + s(t) + \phi_s)]. \quad (18)$$

参考臂光纤的出射光场电矢量为

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{E}_{r0} \exp[j(\omega t + A(t) + \phi_r)]. \quad (19)$$

式中,  $s(t)$  为声信号,  $\phi_s$ 、 $\phi_r$  分别为信号臂和参考臂的随机漂移相位,  $A(t)$  为压电陶瓷产生的调制相位。这两束光在组合镜表面混频,合成的场强为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_s + \mathbf{E}_r. \quad (20)$$

用两个光电管探测到的两个电信号分别为<sup>[8]</sup>

$$V_{i1} = V_{i0} [1 + \cos(s(t) + \phi_s - \phi_r - A(t))], \quad (21)$$

$$V_{i2} = V_{i0} [1 - \cos(s(t) + \phi_s - \phi_r - A(t))], \quad (22)$$

$$V_{i3} = V_{i1} - V_{i2} = 2V_{i0} \cos[s(t) + \phi_s - \phi_r - A(t)]. \quad (23)$$

式中,

$$V_{i0} = \frac{2e\lambda}{hc} \eta \alpha R O_p. \quad (24)$$

$\eta$  为光探测器量子效率,  $\alpha$  为混频效率, 它决定于偏振态和组合耦合器的分束比,  $O_p$  为入射光纤功率,  $R$  为光探测器负载电阻,  $\lambda$  为光波长,  $c$  为光速,  $h$  为普朗克常数,  $e$  为电子电荷。展开式(23), 考虑到  $s(t)$  很小, 近似得

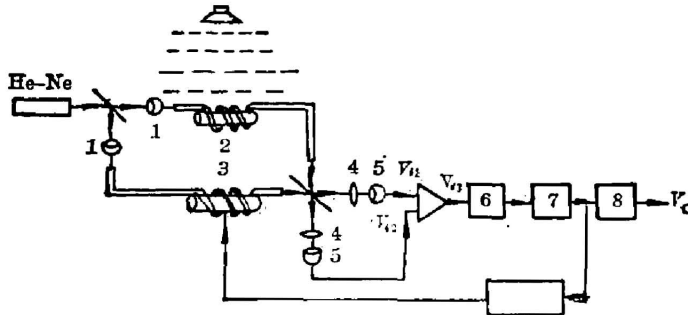


Fig. 2 Block diagram of detection system

$$V_{is} = 2V_{i0} [\cos(\Delta\phi - A(t)) \cdot s(t)]. \quad (25)$$

式中,  $\Delta\phi = \phi_s - \phi_r$ 。当无补偿时,  $A(t) = 0$ , 于是有  $V_{is} = 2V_{i0} [\cos \Delta\phi - \sin \Delta\phi s(t)]$ 。式中第一项为随机相位  $\Delta\phi$  引起的直流漂移, 第二项为振幅受到  $\Delta\phi$  调制的声信号。由于随机相位因子  $\Delta\phi$  在几秒钟内很容易地从 0 漂移到  $2\pi$  或  $2\pi$  以上, 结果给输出带来明显的衰落。当  $\Delta\phi = k\pi$  ( $k$  为正整数) 时,  $V_{is} = \pm 2V_{i0}$ , 已经探测不到声信号  $s(t)$ 。加上补偿后, 调节压电陶瓷电压, 使  $\Delta\phi - A(t) = \frac{\pi}{2}$ , 此时

$$V_{is} = 2V_{i0}s(t) = 2V_{i0}[\epsilon - A(t)], \quad (26)$$

$$\epsilon = s(t) + \Delta\phi - \frac{\pi}{2}. \quad (27)$$

从线性控制理论的观点看,  $V_{is}$  是一个误差信号, 利用  $V_{is}$  产生一个适当的反馈电压  $A(t)$  施加到压电陶瓷上, 可以精确地消掉  $\epsilon$ 。这样的反馈信号是  $V_{is}$  的积分, 即

$$V_A = g \int V_{is} dt, \quad (28)$$

如果  $V_A$  使得  $A(t) = \epsilon$ , 则

$$hV_A = A(t) = \epsilon = s(t) + \Delta\phi - \frac{\pi}{2}, \quad (29)$$

式中,  $h$  为压电陶瓷上的电压弧度比, 即施加于压电陶瓷上的单位电压引起光纤中光的相位变化弧度数 (rad/v)。通过适当滤波,  $s(t)$  就可以从  $V_A$  中取出。

为了实现  $A = \epsilon$ , 由环路微分方程

$$\dot{V}_A + 2ghV_{i0}V_A = 2gV_{i0}\epsilon, \quad (30)$$

看出, 当反馈线路的增益带积  $2ghV_{i0}$  足够大, 使得  $V_A \ll 2ghV_{i0}V_A$  时, 即可实现  $A(t) = hV_A = \epsilon$ 。

实际系统中, 加在压电陶瓷上的电压  $V_A = \frac{1}{h} \left[ s(t) + \Delta\phi - \frac{\pi}{2} \right]$ , 由于  $s(t)$  约为  $10^{-5} \sim 10^{-7}$  rad, 故实际上压电陶瓷产生的调制相位

$$A(t) = hV_A = \Delta\phi - \frac{\pi}{2}. \quad (31)$$

即  $\Delta\phi - A(t) = \frac{\pi}{2}$ , 这就实现了信号臂与参考臂之间的正交偏振条件, 此时  $V_{is} = 2V_{i0}s(t)$ , 经电子线路放大处理后, 得输出信号为

$$V_o = 2V_{i0}K_V s(t). \quad (32)$$

式中,  $K_V$  为电路放大倍数。

#### 四、实验结果及讨论

我们用灵敏度为  $50 \text{ mV/Pa}$ , 最小可探测声压为  $356 \mu\text{Pa}$  (25 dB), 刻度精度为  $\pm 0.3 \text{ dB}$  的 TS-1 型精密声级计与光纤声传感器进行了比较。测定了喇叭驱动电压  $V_L$  与声压  $P$  (dB) 的关系, 并换算成  $V_L - P$  (Pa) 曲线, 其线性良好, 并与理论计算十分吻合。实验表明, 光纤声传感器更为灵敏, 测得的最小可探测声压为  $200 \mu\text{Pa}$ 。

### 1. $V_i \sim P$ 及 $V_o \sim P$ 关系

表 2 列出了实验数据。表 2 中  $P_b$  为背景噪声。将实验结果与第二节得到的理论计算结果描在同一图中以示比较,如图 3 所示。图 3 为声压  $P$  与检测系统输出信号  $V_o$  关系曲线。由图看出,系统工作在线性状态,且理论结果与实验值相当一致。表 2 中的修正值是指当测得的信号与背景噪声  $P_b$  相差小于 10 dB 时,采用图 4 所示的曲线进行修正。

Table 2 The measurement results

 $P_b = 26.5 \text{ dB}$ 

$V_i$ (mV)	5	20	30	40	60	80	100	150	180	200	300	
P (dB)	1	28.10	33.20	36.7	39.50	41.80	44.00	45.30	47.50	48.10	48.50	49.80
	2	28.40	33.00	36.90	39.80	42.00	44.10	45.50	47.50	48.00	48.30	50.00
	3	28.00	33.00	36.10	39.00	41.80	44.00	45.00	47.20	48.00	48.50	49.80
	average value	28.17	33.10	36.57	39.03	41.87	44.03	45.27	47.40	48.03	48.43	49.90
	correct value	28.97	33.02	36.17	39.03	41.87	44.03	45.27	47.40	48.03	48.43	49.90
$P (\times 10^{-4} \text{ Pa})$	2.81	7.98	12.87	17.89	24.80	31.81	36.69	46.89	50.41	52.79	62.52	

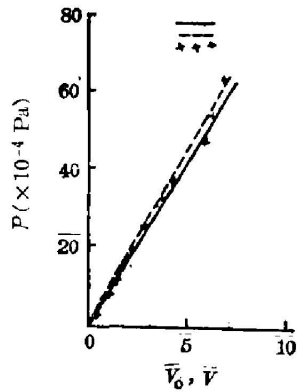


Fig. 3 Acoustic pressure as a function of output voltage

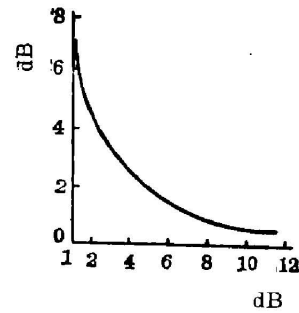


Fig. 4 The corrections concerning in background noises

### 2. 系统的检测阈值

当信噪比  $SNR = 6 \text{ dB}$  时 (即  $SNR = 20 \lg \frac{V_o}{V_b}$ ), 如图 5 所示, 其中  $V_b$  为检测系统输出端噪声电压, 通过外延法推算, 得出最小可探测压力  $P_{\min}$  为  $200 \mu\text{Pa}$  (见图 3), 这已超出 TS-1 型精密声级计的测量范围, 但光纤压力传感器仍可响应。这与国外所做的实验结果基本一致 (光纤长度  $10 \text{ m}$ ,  $P_{\min} = 100 \mu\text{Pa}$ )。如果将敏感头光纤长度由现有的  $5 \text{ m}$  增至  $100 \text{ m}$ , 则检测阈值有可能达到  $20 \mu\text{Pa}$ , 这已达到人耳的极限。

### 3. 有无相位跟踪的比较

图 6 为加上相位跟踪系统后的输出波形照片, 由图 6 看出, 其波形包络很好, 幅度稳定。去掉 PTDC 反馈跟踪系统后, 输出波形正弦包络变差, 幅度极不稳定。图 7 是去掉跟踪系统后, 间隔很短时间 (秒级) 拍摄的波形照片。

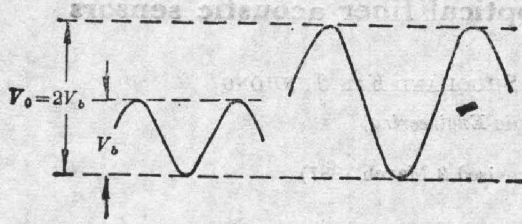


Fig. 5 Evaluation of the detection threshold

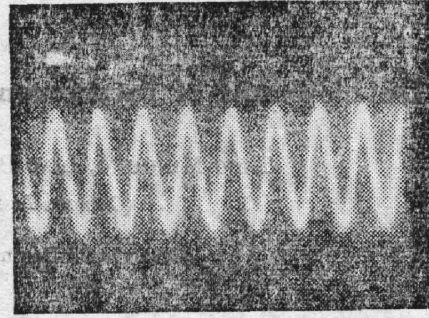
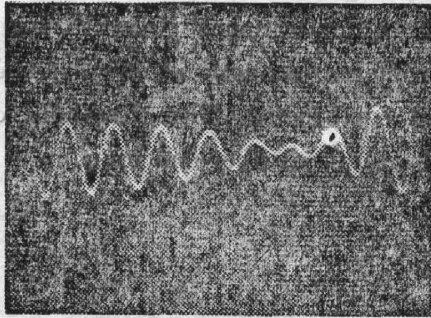
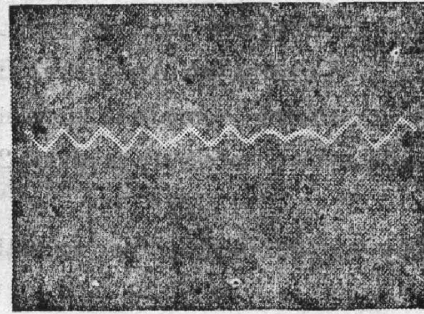


Fig. 6 The oscillograms of the output signals existing in the phase tracking system



(a)



(b)

Fig. 7 The oscillograms of the output signals in the absence of the phase tracking system

(a)  $t=0$ ; (b)  $t \approx 2$  sec

## 五、结 束 语

我们对光纤声传感器进行了理论分析,并实现了干涉型光纤声传感器直流相位跟踪检测系统。用 5m 长光纤制作的敏感头测得可检测声压阈值为  $200 \mu\text{Pa}$ ,声压与系统输出呈良好的线性关系。并与理论一致。

## 参 考 文 献

- [1] S. W. Thorton *et al.*; «2nd International Conference on Optical Fiber Sensors», (sept. 5~7, 1984, VDE-VERLAG GMBH, Berlin offenbach), 369.
- [2] C. M. Davis; *Laser Focus*, 1982, **18**, No. 2 (Feb), 112.
- [3] D. A. Jachson, R. Priest; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 17 (Sep), 2926.
- [4] A. Yariv; «*Quantum Electronics*», (Holt, Rinehart and Winston, New York 1975), 337.
- [5] P. Shajinko, E. L. Green; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 12 (Jun). 1985.
- [6] S. P. Tinroshenko, J. Goodier; «*Theory of Elasticity*», (Mc Graw-Hill, New York, 1970), 249.
- [7] B. Budiansky *et al.*; *Appl. Opt.*, 1979, **12**, **18**, No. 24 (Nov), 4085.
- [8] S. K. Sheem, T. G. Giallorenzi *et al.*; *Appl. Opt.*, 1982, **2**, **21**, No. 4 (Feb), 689.

## Development of interferometric optical fiber acoustic sensors

TANG MINGUNG, LIAO BOFAN LIU SHUQI AND FAN JUNHONG

(*Chengdu Institute of Radio Engineering*)

(Received 29 December 1986; revised 2 March 1987)

### Abstract

In this paper, the pressure sensitivity of an optical fiber acoustic sensor has been described theoretically and its sensitivity under inhomogeneous pressure has been analyzed and evaluated. An optical fiber interferometric acoustic sensor system with DC phase tracking homodyne detection has been established. The threshold of the detectable acoustic pressure is about  $200 \mu\text{Pa}$  with an optical fiber 5 m long.

**Key words:** optical fiber acoustic sensors.

---

### 中国光学学会光学测试专业委员会在南京成立

中国光学学会光学测试专业委员会成立大会于1987年10月5~8日在南京召开。会议首先听取筹备组组长陈进榜同志关于筹备成立光学测试专业委员会的报告。与会代表对陈进榜同志的报告表示满意,对筹备组成员的辛勤劳动、不懈努力表示感谢,对能在二年的时间内成立光学测试工作者自己的学术组织表示由衷的高兴。出席会议的全体委员一致推选潘君骅同志为主任委员,顾去吾同志为顾问。

最后,会议一致同意委托江西省科学院、江西省激光学会会同有关单位主办1988年第3届全国光学测试年会。

(黎 凡)