

# 实用化双折射式光纤温度传感器 系统最佳设计

王 勇 廖延彪

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

辛 军 林铁生 冯其波

(北方交通大学物理系, 北京 100044)

**摘 要** 利用双折射效应和偏振调制原理, 设计了一种实用化的反射式光纤温度传感器, 分析了精度、灵敏度等测量的主要指标与光源、双折射晶体及传输光纤之间的相互关系, 并进行了相应的实验, 给出了系统参数选择的最佳设计方案。

**关键词** 偏振调制, 光纤温度传感器, 双折射。

## 1 引 言

与传统的传感器相比, 光纤传感器具有体积小、重量轻、灵敏度高、耐腐蚀、抗电磁干扰、安全可靠等优点, 而且便于多点、多参量及分布式测量。偏振调制的光纤传感器可以有效地测量温度、压力、加速度、电流和电压<sup>[1-5]</sup>。基于双折射效应, 作者制作了一种较快速响应的、在电磁场及易燃、易爆环境下使用的反射式光纤温度传感器。在 0~ 150℃ 测量范围内, 要求精度 0.5℃, 灵敏度 0.2℃。不论哪种传感结构, 最重要的问题是选择最佳的系统参数, 以保证所要求的测量精度和灵敏度。针对这一传感结构, 本文在研究了系统各参数相互关系的基础上, 提出了系统最优设计的方法, 并进行了相应的实验。理论分析和实验表明, 通过选择合适的参数, 这一传感结构完全可满足实用化的要求。文中所采用的分析方法和实验方法亦适用于其它偏振调制的光纤传感器。

## 2 测温原理

基于双折射效应的反射式光纤温度传感器结构如图 1 所示。双折射晶体采用石英, 其快轴与起偏方向相差 45°, 输入输出共用一根光纤。传输光纤及耦合器为 100/140 μm 的多模光纤。光电二极管 PD<sub>1</sub> 探测反射的信号光, PD<sub>2</sub> 用于探测光源的功率。两探测器的输出分别为<sup>[2]</sup>:

$$V_1 = \frac{1}{4} \int_{\Delta\lambda} F_1 F_2^2 P(\lambda) D_1(\lambda) [1 + \cos \delta] d\lambda, \quad V_2 = \frac{1}{2} \int_{\Delta\lambda} F_1 P(\lambda) D_2(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

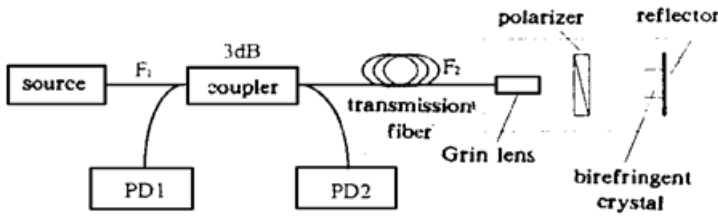


Fig. 1 The reflective fiber-optic temperature sensor, based on the birefringence effect

由实验值<sup>[6]</sup>插值得到。晶体厚度 $l$ 仅与温度有关。为便于研究系统参数的优化,可以忽略各光学元件之间的耦合效率因子,并假设光纤耦合器的分光比为 $1:1$ ,以及光源的光谱分布 $P(\lambda)$ 为高斯型。采用两路输出信号的比值作为温度测量信号:

$$V = V_1/V_2 = \frac{1}{2} \int_{\Delta\lambda} F_1 F_2^2 [1 + \cos \delta] P(\lambda) D_1(\lambda) d\lambda / \int_{\Delta\lambda} F_1 P(\lambda) D_2(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

利用测量信号 $V$ 与温度 $T$ 之间的单值关系可达到测温的目的。

### 3 传感系统的最佳设计

由(3)式可知,输出的测量信号 $V$ 与光源的光谱分布、晶体厚度、传输光纤均有关。系统优化设计的目的就是选择最佳的光源、晶体和光纤,以提供足够的测量精度和灵敏度。本文从(3)式出发,研究各参数之间的相互关系及对测量的主要指标的影响,并根据实际情况进行参数最优选择。实验中采用的光源有 He-Ne 激光器、半导体激光器(LD)和发光二极管(LED),波长有 $0.6 \mu\text{m}$ 、 $0.8 \mu\text{m}$ 、和 $1.3 \mu\text{m}$ 。

#### 3.1 基于测量范围和线性的考虑

研究输出曲线的测量范围、线性、灵敏度时,可以忽略传输光纤及探测器的影响,于是输出的测量信号改写为:

$$U = \int_{\Delta\lambda} P(\lambda) [1 + \cos \delta] d\lambda / \int_{\Delta\lambda} P(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

在系统稳定的情况下,(4)式与(3)式仅相差一个比例系数。

考虑测量的范围及线性,即在 $0 \sim 150^\circ\text{C}$ 范围内,保证 $U-T$ 曲线单调并且具有最好的线性。从(1)式可知,此时 $\delta$ 需满足

$$2(k-1)\pi < \delta < 2k\pi, \quad \text{或} \quad 2k\pi < \delta < 2(k+1)\pi \quad (5)$$

特别,在测温范围的中点( $75^\circ\text{C}$ ), $\delta$ 满足下式时, $U-T$ 曲线的线性较好。

$$\delta(T = 75^\circ\text{C}) = 2k\pi \pm \pi/2 \quad (6)$$

(5)式、(6)式中的 $k$ 值为相同的正整数。

对于确定的工作波长,(6)式给出分立的晶体厚度的最佳取值(用 $l_0$ 表示);(5)式给出实际厚度 $l$ 的取值范围 $\Delta l$ ,即实际厚度 $l$ 应满足: $l_0 - \Delta l < l < l_0 + \Delta l$ ,这是磨抛石英晶体时,需要控制的加工精度。对于 $1.31 \mu\text{m}$ 的光源,表1中给出了 $0.5 \sim 1.5 \text{ mm}$ 范围内石英最佳厚度及允许的最大偏差。同时计算表明,谱宽 $\Delta\lambda$ 在 $0 \sim 40 \text{ nm}$ 范围内,最佳取值 $l_0$ 仅与波长 $\lambda$ 有关,而与 $\Delta\lambda$ 无关。由表1可见,随着厚度 $l_0$ 的增加,取值范围 $\Delta l$ 则减小,当 $\Delta l = 0$ 时,则得到 $l_0$ 的最大取值。例如当 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ 时, $l_0 < 3.66 \text{ mm}$ ;当 $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ 时, $l_0 < 2.35 \text{ mm}$ ;当 $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ 时, $l_0 < 1.85 \text{ mm}$ 。

式中 $F_1$ 、 $F_2$ 表示光纤的传输系数, $P(\lambda)$ 为光源的光谱分布, $\Delta\lambda$ 为其谱宽, $D_1$ 、 $D_2$ 表示探测器的光谱响应率, $\delta$ 为双折射晶体中e光与o光的相位差,由下式给出:

$$\delta = 4\pi l(T) \Delta n(\lambda, T) / \lambda \quad (2)$$

式中e光、o光的折射率差 $\Delta n$ 是光源波长 $\lambda$ 和温度 $T$ 的函数,在进行数值计算时,可

在进行数值计算时,可

为高斯型。采用两路输出信号的比值作为温度测量信号:

Table 1. In the range of 0.5~1.5 mm, the optimal thickness and its maximal deviation ( $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ )

$l_0/\text{mm}$	0.517	0.556	0.594	0.632	0.670	0.709	0.747	0.785	0.824	0.862	0.902	0.939	0.977
$\Delta\lambda/\mu\text{m}$	17	16	16	16	16	16	15	15	15	15	15	14	14
$l_0/\text{mm}$	1.015	1.054	1.092	1.131	1.169	1.207	1.245	1.284	1.322	1.360	1.399	1.437	1.475
$\Delta\lambda/\mu\text{m}$	14	14	14	14	13	13	13	13	13	12	12	12	12

测温曲线的线性对测量的系统误差有影响。在测量过程中,二次仪表是通过输出曲线内插的方法换算温度值,由于输出曲线的非线性,内插过程不可避免会带来系统误差。因此通过光学系统参数的优化提高输出曲线的线性,可以减小系统误差。为定量描述输出  $U-T$  曲线的线性,定义其线性度为:

$$C_L = 1 - \frac{|\Delta U|_{\max}}{U_{\max} - U_{\min}} (\%) \quad (7)$$

式中  $\Delta U$  表示  $U$  曲线与连接其最大、最小值的直线的对应偏差。 $U-T$  曲线的线性度  $C_L$  与光源波长  $\lambda$ 、谱宽  $\Delta\lambda$  及石英晶体的厚度  $l_0$  有关。采用波长  $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$  的光源时,  $C_L$  与  $l_0$  的关系如图 2 所示。图中 3 条曲线分别对应谱宽  $\Delta\lambda = 1.0 \text{ nm}$ ,  $25 \text{ nm}$ ,  $50 \text{ nm}$ 。可见随着  $l_0$  的增大,  $C_L$  将减小,且与  $\Delta\lambda$  基本无关。经计算可知,采用 10 位的 A/D 转换芯片,  $C_L > 98\%$  时,内插的误差总小于  $0.4^\circ\text{C}$ ,于是根据图 2 有  $l_0 < 1.2 \text{ mm}$ 。对于选定的  $l_0$ ,为保证线性,晶体加工的实际厚度  $l$  应尽可能与之接近。

### 3.2 基于灵敏度的考虑

定义  $U-T$  曲线的灵敏度  $S$  及平均灵敏度  $S_a$  为:

$$S = [U(T + \Delta T) - U(T)]/\Delta T, \quad (8)$$

$$S_a = (U_{\max} - U_{\min})/(150 - 0) \quad (9)$$

前者描述  $U-T$  曲线各点的斜率,后者表示  $U-T$  曲线的平均斜率。对于波长为  $1.31 \mu\text{m}$  的光源,利用(9)式并采用数值积分的方法可以得到  $U-T$  曲线平均灵敏度  $S_a$  与光源谱宽  $\Delta\lambda$  及晶体厚度  $l_0$  的关系,如图 3 所示。由图 3 可见,对任一厚度  $l_0$ ,平均灵敏度  $S_a$  随光源谱宽  $\Delta\lambda$  的增加而降低,其下降的快慢取决于  $l_0$ ,当  $l_0 < 0.7 \text{ mm}$  时,  $S_a$  随  $\Delta\lambda$  的增加而缓慢减小,但当  $l_0 > 1.5 \text{ mm}$  时,  $S_a$  随  $\Delta\lambda$  的增加将迅速减小。谱宽  $\Delta\lambda$  在  $0 \sim 15 \text{ nm}$  范围内,平均灵敏度  $S_a$  随晶体厚度  $l_0$  的增加而增大,而当  $\Delta\lambda$  超过  $15 \text{ nm}$  时,  $S_a$  随  $l_0$  ( $0 \sim 2 \text{ mm}$ ) 的增加出现极大峰。一般地,当选用窄谱光源时曲线的灵敏度较高,并可采用增加厚度的办法提高灵敏度,但会降低线性和响应速度。在给定了宽光谱的光源时,应选择  $S_a$  的极大峰所对应的最佳晶体厚度。

二次仪表的测温灵敏度是由  $U-T$  曲线的灵敏度  $S$ 、电路的放大倍率及 A/D 芯片的分辨率所决定。因此根据测量要求,通过优化系统参数来保证  $U-T$  曲线的灵敏度是十分重要的。

本文采用一支 He-Ne 激光器、两个半导体激光器和四个发光二极管进行实验。石英晶体厚度为  $0.9 \text{ mm}$ ,起偏器选用对波长不敏感的偏振棱镜(曲阜 LGP-1)。在  $25^\circ\text{C}$  时,对于不同的光源,测得  $U-T$  曲线灵敏度  $S$  如图 4 所示。图中三条曲线分别对应  $0.65 \mu\text{m}$ 、 $0.83 \mu\text{m}$  和  $1.31 \mu\text{m}$  光源下灵敏度与谱宽关系的理论曲线。实验结果较好地符合了理论计算。由图 4 可

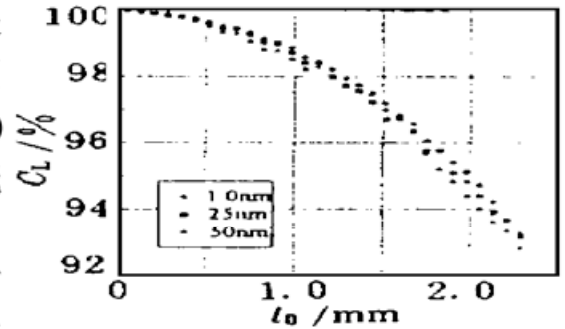


Fig. 2 The relation between the linearity  $C_L$  and the optimal thickness  $l_0$ ,  $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$

见, 当  $\Delta\lambda$  超过一定范围后, 灵敏度将迅速下降, 甚至无法测温。于是在给定  $l_0$ 、 $\lambda$  及最低灵敏度的情况下, 可以获得  $\Delta\lambda$  的最大允许值。在本文的实验系统中, 若要求二次仪表的测温灵敏度为  $0.2^\circ\text{C}$ , 则  $S$  不应小于  $0.5 \times 10^{-2} (^\circ\text{C}^{-1})$ , 此时对应光源的最大谱宽为  $38 \text{ nm}$  ( $1.31 \mu\text{m}$  光源)、 $15 \text{ nm}$  ( $0.83 \mu\text{m}$  光源) 和  $0.5 \text{ nm}$  ( $0.65 \mu\text{m}$  光源)。

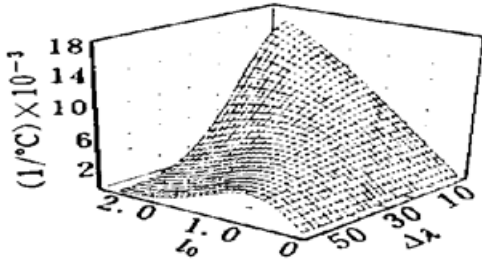


Fig. 3 The average sensitivity  $S_a$  as the function of the bandwidth  $\Delta\lambda$  and the optimal thickness  $l_0$ , with  $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$

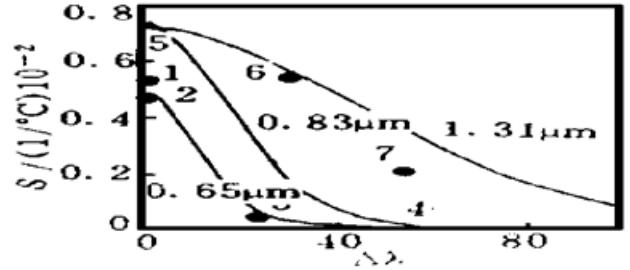


Fig. 4 Comparisons between experiment results and calculations ( $l = 0.9 \text{ mm}$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ ). 1: He-Ne,  $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda < 0.1 \text{ nm}$ , 2: LD,  $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda \approx 1 \text{ nm}$ , 3: LED,  $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda > 25 \text{ nm}$ , 4: LED,  $\lambda = 0.83 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda > 55 \text{ nm}$ , 5: LD,  $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda \approx 1 \text{ nm}$ , 6: LED,  $\lambda = 1.30 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda > 30 \text{ nm}$ , 7: LED,  $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda > 55 \text{ nm}$

### 3.3 基于精度的考虑

测量的精度取决于测量的系统误差和随机误差。系统误差可通过实验校准和提高输出曲线的线性来克服。由(3)式可见, 本系统中的随机误差来自光源的漂移、多模光纤中的模式噪声、探测器噪声以及电路的噪声等。

#### 3.3.1 光源漂移的影响

光源的漂移包括功率的波动和中心波长的漂移, 主要来自光源温度和驱动电流的变化。由式(3)可知输出测量信号  $V$  与光源功率波动无关, 因此光源的漂移主要考虑其中心波长的漂移。

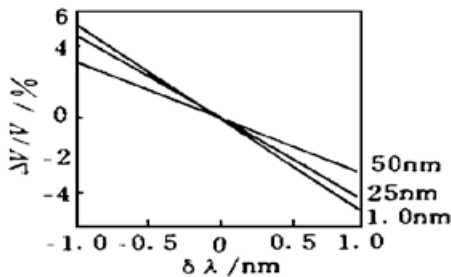


Fig. 5 Calculated relative error  $\Delta V/V$  versus wavelength drift  $\delta\lambda$  with different bandwidths

漂移。

对于  $1.31 \mu\text{m}$  光源, 晶体温度为  $25^\circ\text{C}$  时, 计算得到输出信号的相对误差随中心波长漂移  $\delta\lambda$  的关系如图 5 所示。图中三条曲线分别对应不同的谱宽。可见, 波长漂移越大, 输出信号的误差越大, 并且采用窄谱光源时, 输出受波长漂移的影响要大于采用宽光谱的光源。因此只要保证波长漂移  $\delta\lambda <$

$0.1 \text{ nm}$ , 即温度控制在  $0.5^\circ\text{C}$  以内[设波长的温漂系数 ( $0.1 \sim 0.2$ )  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ ], 这是容易实现的。则输出的相对误差小于  $0.4\%$ , 对应测温误差可小于  $0.3^\circ\text{C}$ 。

#### 3.3.2 模式噪声的影响

对于一个确定的波长  $\lambda$ , 光纤中传输模式的传播常数记为  $\beta(\mu, \lambda)$ ,  $\mu$  对应横模阶数(含偏振模式),  $\lambda$  对应纵模阶数。通过晶体后  $(\mu, \lambda)$  阶模式的 e 光与 o 光的相位差为:

$$\delta = 2l \Delta\beta(\mu, \lambda) \tag{11}$$

各模式对应不同的相位差, 于是输出的测量信号可写为:

$$V = (1/2) \sum_{\lambda} \sum_{\mu} P_{\mu}(\lambda) F_{1l}(\beta) F_{2l}^2(\beta) C^2(\beta) H(\beta) [1 + \cos \beta] / \sum_{\lambda} \sum_{\mu} P_{\mu}(\lambda) F_{1l}(\beta) C(\beta) \quad (12)$$

式中  $F_{1l}(\beta)$ 、 $F_{2l}(\beta)$  表示  $\mu$  模式的传输系数,  $C(\beta)$  表示光纤耦合器的模功率分布,  $H(\beta)$  表示探头的传输系数,  $P_{\mu}(\lambda)$  对应光谱分布。输出  $V$  是光纤中所有模式叠加的结果。外界扰动作用于传输光纤(长度约 2 m), 使得各模式的功率分布、相位差发生变化, 造成输出结果变化(模式噪声<sup>[7]</sup>)。在实验中温度变化及振动等原因, 造成输出的波动最大可达(15~ 20)%。对光纤各段施加微扰, 发现在靠近光纤耦合器及探头处, 施加干扰所产生的影响远大于其它部分。因此必须挑选性能良好的耦合器, 并使其免受外界干扰。正是由于横模功率分布易受外界的干扰而变化, 使得输出信号随外界扰动变化, 造成系统稳定性下降。

但随着光源谱宽  $\Delta\lambda$  的增加, 情况则不同。特别是当谱宽超过一定范围后, 纵模的叠加作用将完全抵消横模干涉的效果, 使得各个模式输出之和不随光纤微弯、扭曲的状态而变化, 此时  $V$  仅与探头温度有关。从光源相干长度方面考虑, 可以认为当光源相干长度小于多模光纤中相邻模式的光程差时, 各模式之间不发生相互干涉, 输出信号不受模式噪声的影响。在本系统中, 只要光纤的弯曲半径不小于 3 cm, 多模光纤的传输损耗可以忽略。

为验证上述分析, 选用不同谱宽的光源进行稳定性试验, 仍采用厚度 0.9 mm 的晶体。实验结果如表 2 所示。可见当光源谱宽增加以后, 系统稳定性明显提高, 但这是以测温灵敏度的降低为代价的。因此在保证所需的灵敏度条件下, 选择宽谱的光源, 可以减少模式噪声的影响、提高系统的抗干扰性能。例如对于波长 1.31  $\mu\text{m}$  的光源, 测量范围 0~ 150 $^{\circ}\text{C}$ , 光源的最佳谱宽 25~ 30 nm。在本文的实验中, 采用波长 1.30  $\mu\text{m}$ 、谱宽约 30 nm 的发光二极管光源时, 输出信号的相对波动小于 0.8%, 此时对应温度精度为 0.5 $^{\circ}\text{C}$ , 而灵敏度优于 0.2 $^{\circ}\text{C}$ , 可满足实用化的要求。

在单模保偏光纤系统中, 因为几乎不存在模式噪声, 所以其抗干扰性能明显优于多模光纤。然而, 由于单模光纤芯径小、耦合及调整困难, 因此在许多场合下仍采用多模系统, 通过本文介绍的优化方法或补偿技术<sup>[8, 9]</sup>提高其测量的精度。

Table 2. Measured relative fluctuation of the output signal  $V_1$ , with different sources

light source	He-Ne	LD	LD	LED	LED	LED	LED
wavelength/ $\mu\text{m}$	0.633	0.65	1.31	0.65	0.83	1.30	1.31
bandwidth/nm	< 0.1	~ 1.0	~ 1.0	~ 25	> 55	> 30	> 55
$\Delta V/V / \%$	> 20	10~ 15	10~ 15	< 0.6	< 0.1	~ 0.7	< 0.4

### 3.3.3 其它噪声的影响

探测器的噪声及电路的噪声所产生的随机误差可用下式表示:

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_{\text{PD}}^2 + \epsilon_{\text{MUX}}^2 + \epsilon_{\text{AMP}}^2 + \epsilon_{\text{SH}}^2 + \epsilon_{\text{AD}}^2} \quad (13)$$

式中  $\epsilon_{\text{PD}}$  为探测器误差,  $\epsilon_{\text{MUX}}$  为模拟多路转换误差,  $\epsilon_{\text{AMP}}$  为输入放大器的误差,  $\epsilon_{\text{SH}}$  为采样保持误差,  $\epsilon_{\text{AD}}$  为 A/D 转换误差。采用性能稳定的光电二极管, 其随机误差小于 0.1%; 一般系统中第二、三、四项的误差要小于最后一项, 因此只要考虑 A/D 的转换误差, 其主要包括量化误差、非线性误差、失调误差和增益误差。对于 10 位的 A/D 转换芯片, 分辨率为 0.1%, 在 0~ 10 V 输入时, 量化误差最大为 5 mV, 为减小量化误差的影响, 应尽可能增大信号的幅度。其它三项误差均小于量化误差。

以上的分析和实验表明, 影响系统精度的主要因素是光源的漂移和光纤中的模式噪声, 因此在进行系统优化设计时, 须着重考虑提高光学系统的性能。

**结 论** 综上所述, 根据系统各参数与主要测量指标(精度、灵敏度、线性、稳定性等)之间的关系可知, 为提高多模光纤系统的稳定性, 应采用宽光谱的光源, 再结合现有的光源及二次仪表对灵敏度、线性的要求, 可确定出合适的光源及晶体的最佳厚度, 同时应保证晶体的实际加工厚度接近最佳厚度。

在实验系统中, 采用了波长  $1.3 \mu\text{m}$ 、谱宽约  $30 \text{ nm}$  的光发射二极管光源, 石英晶体厚度为  $0.9 \text{ mm}$ 。在  $0 \sim 150^\circ\text{C}$  测量范围内, 输出曲线的线性度超过  $98.5\%$ , 此时测温精度达到  $0.5^\circ\text{C}$ , 而灵敏度优于  $0.2^\circ\text{C}$ , 可满足一般测量的要求。

显然, 在精度、灵敏度要求不太高的场合, 只要选择了合适的系统参数, 则这一温度传感结构既能保证所要求的温测灵敏度, 又能保证系统精度。而对于要求高精度、高灵敏度测温的场合, 则必须采用窄谱的光源提高测量的灵敏度, 并通过补偿技术保证测量的精度。

### 参 考 文 献

- [1] W. B. Spillman, Jr.. Multimode fiber-optical pressure sensor based on the photoelastic effect. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(8): 388~ 390
- [2] A. B. Wang, X. J. Fang, X. D. Jin *et al.*. Birefringence-balanced polarimetric optical fiber sensor for high-temperature measurements. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(19): 1021~ 1023
- [3] S. Tai, K. Kyuma, M. Nunoshita. Fiber optic acceleration sensor based on the photoelastic effect. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(9): 1771~ 1774
- [4] A. Papp, H. Harms. Magneto-optical current transformer. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(22): 3729~ 3745
- [5] T. Mitsui, K. Hosoe, H. Usami *et al.*. Development of fiber-optic voltage sensors and magnetic-field sensors. *IEEE Trans. Power Del.*, 1987, **PWRD-2**(1): 87~ 93
- [6] W. G. Driscoll. *Handbook of Optics*. New York: Kingsport Press, 1978, Section 7
- [7] A. R. Mickelson, A. Weierholt. Modal noise-limited signal-to-noise ratios in multimode optical fibers. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(15): 3084~ 3089
- [8] 金晓丹, 廖延彪, 赵华凤等. 一种高精度补偿式双折射型光纤温度传感系统. *中国激光*, 1996, **23**(5): 465~ 469
- [9] X. Jin, Y. Liao, S. Lai *et al.*. Single-LED optical fiber sensor system using a novel polarization-modulated compensation technique. *Proc. SPIE*, 1995, **2594**: 243~ 248

## Optimization of a Practical Birefringence Fiber-Optic Temperature Sensor

Wang Yong      Liao Yanbiao

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Xin Jun      Lin Tiesheng      Feng Qibo

(Department of Physics, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

(Received 8 October 1997; revised 9 February 1998)

**Abstract** Based on the birefringence effect, a practical reflective fiber-optic temperature sensor was developed with the polarization-modulated method. The relations among the accuracy, sensitivity and parameters including the source, crystal and optical fiber, are analyzed in terms of theory and experiments. The methods of selecting the optimal system parameters are illustrated.

**Key words** polarization-modulated, fiber-optic temperature sensor, birefringence.