

温度对光纤电压传感器测量精度影响的研究

郑小平 廖延彪 赖淑蓉
(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 研究了光纤电压传感器的敏感元件——石英晶体的物理性能对传感器输出的影响。理论分析及实验结果表明: 环境温度的起伏, 造成敏感晶体材料的特性及其承受的应力发生变化, 致使电压传感器的长期稳定性不能满足 1% 的测量精度要求。

关键词 光纤, 电压, 温度, 光纤传感器。

1 引 言

传感器的核心是敏感元。它在很大程度上决定了传感器的性能, 因此对它的研究十分重要。文献[1]通过对 BGO 晶体在压力和温度作用下的特性进行研究, 提出了提高传感器性能的新方法, 得到了比较满意的实验结果; 文献[2]则利用该方法, 对以 BSO 晶体为敏感元件的光纤电压传感器示范了一种温度补偿的思路。但是 BGO、BSO 晶体的半波电压都较低, 更适合于低电压的场合, 而较高电压的测量则比较困难; 同时这些晶体的透光性能也较差。

本文利用石英晶体作为传感器的敏感元件, 对传感器的温度特性进行了研究。研究的重点放在石英晶体上, 再考虑到传感头的封装等因素, 传感器的温度效应可分为晶体的热应力效应及晶体本身的热光效应。结果表明: 晶体的热光效应使得传感器在工作温度范围内的精度只有 2.1%, 达不到实用所需的 1% 的精度要求。

2 原 理

采用如图 1 所示的光纤传感器结构。在理想情况下, 探测器归一化输出信号为^[3]

$$I = 1 + (\varphi/\rho) \sin \rho, \quad (\rho \gg \varphi) \quad (1)$$

式中 $\varphi = (V/V_\pi) \pi \sin \alpha$, V_π 为晶体的半波电压; V 为待测电压; ω 为电压频率; ρ 为晶体的旋光效应。

2.1 热应力对传感特性的影响: 弹光效应与压电效应

图 2 示出两种通常的固定敏感晶体的方法(光沿 Z 轴传输)。当温度发生变化时, 由于晶体、胶及电极三者的热膨胀系数不一致, 晶体内部将产生热应力, 即晶体将随温度变化的应

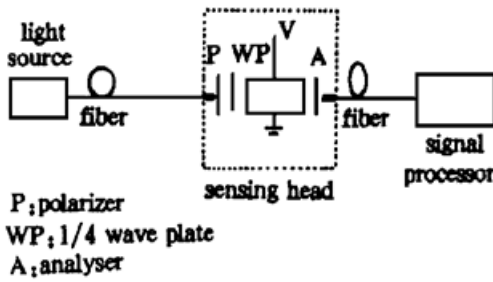


Fig. 1 Schematic diagram of optical fiber voltage sensor

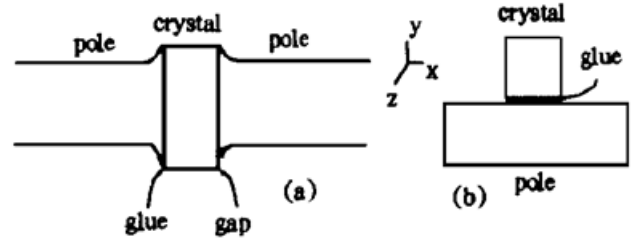


Fig. 2 Attachment of the sensing element

力。设这个应力为 σ ，则由弹光效应引起的晶体逆介电张量的改变量 $\Delta\beta$ 为^[4]

$$\Delta\beta = \Pi \cdot \sigma \tag{2}$$

式中， Π 为石英晶体的弹光张量。而晶体内部产生的电极化强度 P 为

$$P = d \cdot \sigma \tag{3}$$

式中， d 为石英晶体的压电张量。

以图 2(a) 为例，令 $\sigma = (\sigma_{ij})$ ，有： $\sigma_{11} = \sigma_1$ ， $\sigma_{33} = \sigma_3$ ，其余的 $\sigma_{ij} = 0$ 。则在下标简化的情况下

$$(\Delta\beta_m) = (\Pi_{11}\sigma_1 + \Pi_{13}\sigma_3, \Pi_{12}\sigma_1 + \Pi_{13}\sigma_3, \Pi_{31}\sigma_1 + \Pi_{33}\sigma_3, \Pi_{41}\sigma_1, 0, 0) \tag{4}$$

光沿 z 方向传输时，此项引起的附加相位为

$$\Delta\mathcal{Q} = (\pi/\lambda) n_0^3 (\Delta\beta_1 - \Delta\beta_2) L = (\pi/\lambda) n_0^3 (\Pi_{11} - \Pi_{12}) L \tag{5}$$

式中 L 为晶体的长度。极化强度 $P = (d_{11}\sigma_1, 0, 0)$ 在晶体内部产生附加电场 E 为

$$E = \left[\frac{d_{11}\sigma_1}{\epsilon_0\chi_{11}}, 0, \right] \tag{6}$$

等效于在晶体上附加了一个随温度变化的电压

$$V_a = \frac{d_{11}\sigma_1}{\epsilon_0\chi_{11}} b \tag{7}$$

式中 b 为晶体的厚度， χ_{11} 为晶体的电极化率。这样当光沿 Z 轴方向传播时，热应力引起的光附加相位

$$\mathcal{Q}_a = \frac{V_a}{V_\pi} \pi + \Delta\mathcal{Q} = \left[\frac{d_{11}b}{V_\pi\epsilon_0\chi_{11}} + \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 (\Pi_{11} - \Pi_{12}) L \right] \sigma_1 \tag{8}$$

这时(1)式应该修正为

$$I = I + [\mathcal{Q} + \mathcal{Q}_a/\rho] \sin \rho \tag{9}$$

按照传统光纤电压传感器对信号处理的方式，传感器的最终输出为：

$$S = \frac{(\mathcal{Q}/\rho) \sin \rho}{1 + (\mathcal{Q}_a/\rho) \sin \rho} \tag{10}$$

由(10)式可知，热应力影响着传感器的稳定性及精度。

2.2 热光效应的影响

不考虑热应力，(10)式简化为

$$S = (\mathcal{Q}/\rho) \sin \rho \tag{11}$$

然而热光效应使得 S 仍受温度的影响

$$\frac{\partial S}{\partial T} = \frac{\partial V_\pi}{V_\pi \partial T} + (\text{ctg } \rho - \frac{1}{\rho}) \frac{\partial \rho}{\partial T} \tag{12}$$

对 $16 \times 16 \times 16$ (mm) 的石英晶体， $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ，计算得： $\partial S/S \partial T = 5.1 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$ 。若

环境温度变化 100 K, $\partial S/S\partial T = 5.1\%$, 也就是 $\pm 2.55\%$ 。显然达不到 1% 的测量精度。

3 实 验

实验采用的系统如图 1 所示。由(8)式可知：虽然晶体受到两个方向的热应力，但影响传感器输出的只有 x 方向的热应力。因此可以沿与通光方向垂直的方向给晶体施加压力，来等效晶体的热应力对传感器响应的作用。实验时保持晶体上的电压为 5 kV。结果如图 3 所示。可以看到，热应力对传统的光纤电压传感器输出有明显的影响，当晶体所受的应力为 $70N / (16\text{ mm} \times 16\text{ mm}) = 0.27\text{ MPa}$ 时，传感器的输出偏离理想情况达 1.2%。

为了防止给晶体加温时热应力的干扰，采用了如图 4 所示的实验装置，较准确地测出热

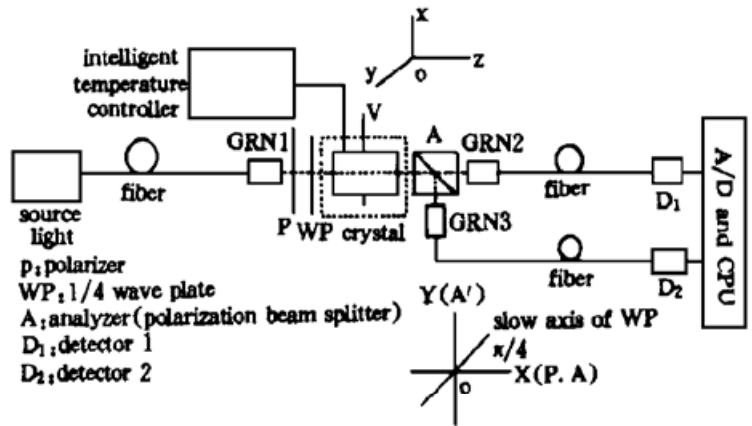
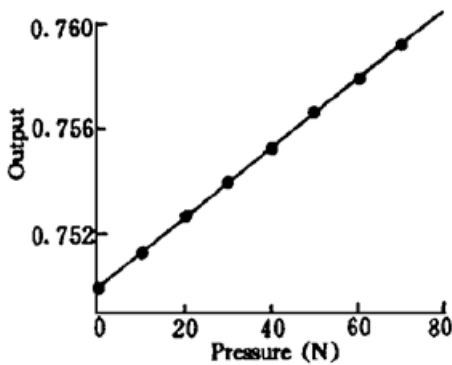


Fig. 3 Influence of the thermal stress on the output of the sensor

Fig. 4 Detecting system with two-optical path

光效应对传感特性的影响。这时两个探测器接收到的信号分别为

$$I = I \pm [(\varphi + \varphi_0) / \rho] \sin \rho \tag{13}$$

分别对这两个信号处理后得

$$S_{\pm} = \frac{(\varphi / \rho) \sin \rho}{1 \pm (\varphi_0 / \rho) \sin \rho} \tag{14}$$

而最终的输出信号为

$$S = \frac{1}{2}(S_+ + S_-) = \frac{(\varphi / \rho) \sin \rho}{1 - [(\varphi_0 / \rho) \sin \rho]^2} \cong \frac{\varphi}{\rho} \sin \rho \tag{15}$$

与(10)式相比，这种技术能够消除热应力的影响。实验也验证了这种技术的可行性。如图 5 所示，曲线 B, C 分别为石英晶体受压时两单光路的输出信号，曲线 D 为两路光信号按照(15)式处理后的结果。显然采用双光路信号处理后，热应力对传感器几乎没有影响。

采用智能型温度控制器控制晶体加热温度，精度可达 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。图 6 为传感器在 5 kV 电压下，采用双光路技术，传感器随温度的输出变化。温度变化 90 K 时，输出变化了 4.2%，这与前面的理论推导是一致的。也就是说在消除热应力的情况下，传感器在工作温度范围内的精度为 $\pm 2.1\%$ 。

光纤电压传感器的长期稳定性受到传感器使用场合温度的影响。虽然采用新型的双光路检测技术，但也只能消除晶体热应力的影响，却无法改善由晶体热光效应引起的传感器性能的下降。实验表明晶体的热光效应使得传感器在工作温度范围内的精度只有 2.1%，达不到

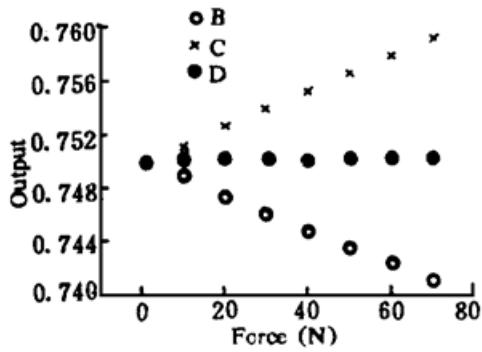


Fig. 5 Elimination of the thermal stress

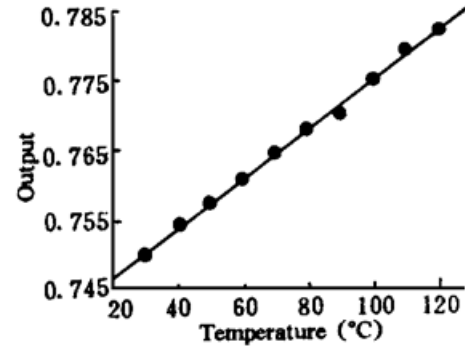


Fig. 6 Influence of the thermal optic effect on the sensor

实用所需的 1% 的精度要求。然而, 由图 6 可知传感器随温度的变化呈良好的线性, 这为对光纤电压传感器进行温度补偿提供了根据。

结 论 本文从理论和实验两方面研究了石英晶体作为电压传感器敏感材料时的温度效应。模拟结果表明影响传感器性能的主要因素是晶体的热光效应, 它使传感器在工作温度范围内的精度只有 2.1%。

参 考 文 献

- [1] K. S. Lee, Electrooptic voltage sensor: birefringence effect and compensation methods. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(30): 4453~ 4461
- [2] J. Niewisch, P. Menke, P. Krammer *et al.*, Temperature Compensation of a Potential Transformer using a BSO Pockels Cell. *Proceedings of OFS-11: Eleventh International conference on Optical Fiber Sensors-Advanced Sensing Photonics*, May 21~ 24, 1996, Japan, Publisher: JSAP, IEICE, IEEJ and SICE: 152~ 155
- [3] V. K. Gorchakov, V. V. Kutsaenko, V. T. Potapov, Electro-optical effects in bismuth silicate crystals and optical polarization sensors using such crystals. *Int. J. Optoelectron.*, 1990, **5**(2): 236~ 250
- [4] 陈 纲, 廖理儿, 晶体物理学基础. 北京: 科学出版社, 1992: 442~ 447

Influence of Temperature on Performance of Fiber-Optic Voltage Sensor

Zheng Xiaoping Liao Yanbiao Lai Shurong Hua Qing

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

(Received 3 September 1996; revised 26 November 1996)

Abstract The influence of the quartz, which acts as the sensing element of the fiber optic voltage sensor, on the performance of the sensor is studied. Both theoretical analysis and experimental results show that the fluctuation of the temperature brings about the undulation of the characteristic of the sensing crystal and the variation of the stress applied to the crystal, causing the consequence that the long-term stability of the sensor can not meet the requirement of measuring accuracy of 1%.

Key words fiber, voltage, temperature, fiber-optic sensor.