

应用光学双稳原理的高精度 光纤传感器

李淳飞 吴 杰 张 雷 刘丽君 李 斌

(哈尔滨工业大学物理系, 哈尔滨 150006)

提 要

本文提出一种光纤干涉仪与光电混合光双稳装置相结合的新型光纤传感器。用光双稳开关脉冲计数度量温度变化,其测量精度比基于干涉条纹计数的一般干涉型光纤传感器的精度约高10~100倍,而且测量精度可调节。完成了这种传感器原理的模拟实验验证。

关键词: 光学双稳性, 光纤传感器, 干涉仪。

一、引 言

在种类繁多的光纤传感器中,干涉型(或相位调制型)光纤传感器是目前人们公认的灵敏度最高的一种传感器。其原理是以双光束或多光束干涉形成的干涉条纹的移动数来实现对长度、温度、压力等物理量的测量。其测长精度局限于相邻条纹的间距,即半个波长,相应相移变化为 2π 。

本文建议在双光束或多光束光纤干涉仪中插入一电光调制器,加上光电反馈装置,构成光电混合双稳式光纤传感器。新传感器的测长精度可比 $\lambda/2$ 高100倍。若采用波长为 $0.6\mu\text{m}$ 的He-Ne激光,精度可达3nm,这是相当原子晶格常数量级的量子尺寸。

新的传感器是以矩形开关脉冲计数代替正弦波干涉条纹计数,因此测量灵敏度高;可靠性好;测量方法简便直接,不需对输出脉冲进行限幅整形;而且因为输出开关脉冲宽度可调,使传感器的测量精度可调。此外,这种传感器还能鉴别温度的上升与下降,这是一般干涉型温度传感器做不到的。

Mejias等人曾首先提出这种传感器的初步设想^[1,2],但他们的方案是采用一种吸收型全光双稳器件,很难在实验中实现。本文改用LiNbO₃光电混合双稳器件,从而首次完成了原理实验^[3],对三角波形模拟的温度变化进行的测量,证明了这种传感器原理的正确性和可行性。本文主要介绍Mach-Zehnder双光束干涉型双稳光纤传感器的原理和实验。

二、实 验 装 置

本工作采用以下实验装置,如图1所示。在马赫-陈德尔干涉仪的测量臂中包含一段传感光纤,而在参考臂中插入一个光电混合光学双稳装置,它由电光晶体相位调制器和探测器

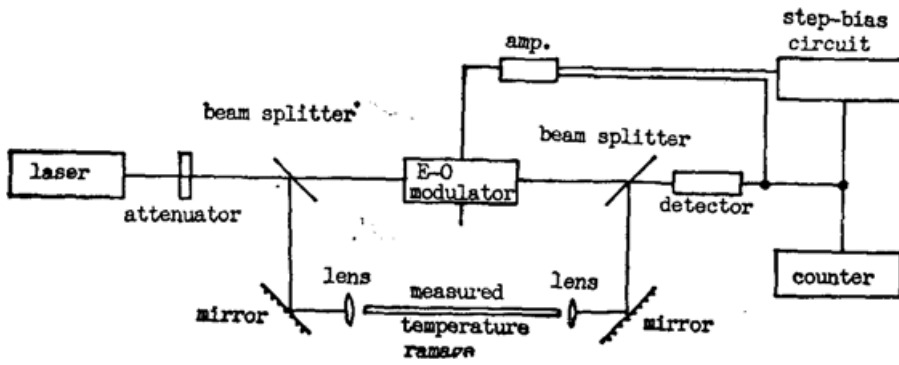


Fig. 1 The principle diagram for Mach-Zehnder optical bistable fiber sensor

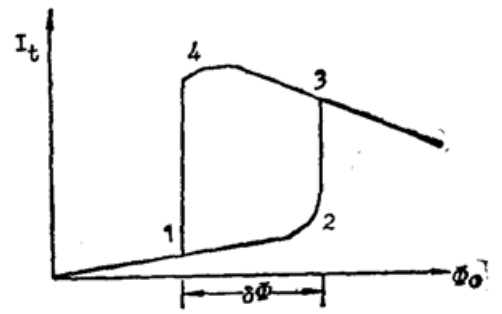


Fig. 2 $I_t \sim \Phi_0$ optical bistability
 $\phi_0 = \pi V_0 / V_\pi$ is half wave voltage,
 $\delta\Phi$ is the range of optical bistability

放大器反馈系统组成。当温度场的变化引起光纤长度和折射率变化，从而引起干涉仪两臂的相位差改变时，致使光双稳器件发生开启动作，如图 2 所示，工作点沿 1-2-3 点变化。光开启信号通过探测器触发阶梯波发生器，产生一阶梯偏置电压加在晶体上，使双稳器件发生关闭动作，工作点沿图 2 中的 3-4-1 点变化，回到初始状态。这样就有一个完整脉冲信号输出。温度进一步连续变化，将使光双稳器件产生一系列开关动作，在探测器输出端将出现一系列矩形脉冲，由示波器或计数器记录脉冲数，从而测得相应的温度变化值。脉冲频率越高 ($\delta\Phi$ 越小)，测量精度越高。

本实验使用的激光光源为稳频 He-Ne 激光器，输出功率为 0.5 mW，可用衰减器调整光强，实验时以恒定光强输入。电光调制器是用 Z 切割 LiNbO₃ 晶体构成，厚 1.5 mm，长 3 cm，垂直光传播的 Z 方向的两面镀以金电极，半波电压约 300 V。探测器用光电倍增管。偏置电路包含 A/D 转换器、比较器、触发器、阶梯波发生器和 D/A 转换器等单元电路。本实验用一个具有 A/D 和 D/A 转换接口的微型计算机代替偏置电路，并产生三角波电压信号来模拟待测区的三角波形温度变化。

三、工作原理

双光束干涉相位差 Φ 与输出光强 I_t 和输入光强 I_i 之间的关系为^[4]

$$I_t = \alpha I_i (1 + M \cos \Phi) \quad (1)$$

式中 α 和 M 为常数。 Φ 与 I_t 还有如下关系：

$$\Phi = \Phi_0 + K I_t \quad (2)$$

(1) 式和 (2) 式分别绘于图 3。输入光强不变，只改变初始相位 Φ_0 ，直线 2 随 Φ_0 改变发生平移，在 $\delta\Phi$ 范围内，曲线 1 与直线 2 有两个以上的交点，为光学双稳区，如图 2 所示。

Φ_0 的变化是由于测温臂的相位变化 Φ_T 引起，设参考臂相位变化为 Φ_B ，则

$$\Phi_0 = \Phi_T - \Phi_B \quad (3)$$

相位变化 Φ_T 则是因温度变化引起测温光纤长度和折射率变化所致：

$$\Phi_T = \frac{2\pi}{\lambda} \left(n \frac{dL}{dT} + L \frac{dn}{dT} \right), \quad \Delta T = \frac{2\pi}{\lambda} \left(n\beta + \frac{dn}{dT} \right) L \Delta T \quad (4)$$

式中 $\beta = \frac{1}{L} (dL/dT)$ 为热膨胀系数, (dn/dT) 为折射率-温度系数, n 为光纤的折射率, L 为测温光纤长度, λ 为激光波长。对石英光纤有 $n=1.456$, $\beta=5 \times 10^{-7} 1/^{\circ}\text{C}$, $dn/dT=10 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$, 可见折射率随温度变化引起的相移比长度随温度变化引起的相移大一个数量级。代入以上数据, 算得

$$\Phi_T = 107 L \Delta T, \quad (5)$$

即 1 m 光纤每升高温度 1 度, 引起相移变化为 107 rad。

为了使光双稳器件的工作点回到起始点, 在晶体上加阶梯偏置电压 V , 此电压每次上升 δV , 正好产生 $\delta \Phi$ 的相位变化, 因此参考臂相位变化为:

$$\Phi_B = \frac{\pi}{V_\pi} V_B = \frac{\pi}{V_\pi} (V_0 + m\delta V), \quad (6)$$

其中 V_π 为晶体的半波电压, V_0 为初始偏压, m 为正整数, δV 应满足如下关系:

$$\Phi_T = m\delta\phi = \frac{\pi}{V_\pi} m\delta V. \quad (7)$$

由 (7) 式、(5) 式及以下定义:

$$T = T_0 + \Delta T = T_0 + m\delta T \quad (8)$$

得到温度最小测量单位 δT 为:

$$\delta T = \frac{1}{107L} \delta\phi = \frac{\pi}{107LV_\pi} \delta V. \quad (9)$$

温度最小测量单位正比于产生一次光双稳开关相应的相位变化, 或阶梯波发生器形成的一级电压变化。可以通过调变 $\delta\Phi$ 的办法改变测温精度 δT 。调变 $\delta\Phi$ 的方法之一是改变反馈放大系数 K , 使图 3 中直线 2 的斜率改变。由图 3 可见, 能使 $\delta\Phi$ 远小于 2π , 即远小于条纹间距。

图 4 给出三角形波的温度变化、阶梯形偏置电压和输出光强随时间变化的对应曲线。可见当待测温度由上升变为下降时, 输出的负脉冲变成正脉冲, 由此可判断温度的上升或下降。

四、实验结果与结论

图 5 是两张模拟温度变化和输出脉冲的示波器照片。(a) 为以三个脉冲度量的增温和降温输出脉冲。(b) 为以七个脉冲度量的增温和降温脉冲输出。所得结果基本与原理分析图 3 相同。两张照片中的调制信号的频率分别为 1 Hz 和 0.5 Hz。

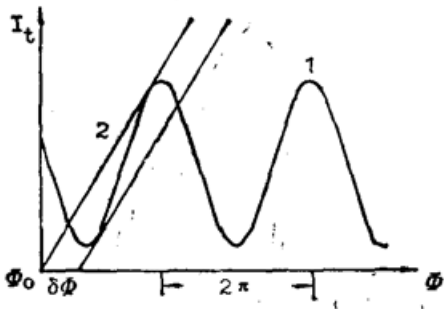


Fig. 3 The operating characteristic of optical bistable Mach-Zehnder interferometer, where
1—is the $I_t = I_s(1 + M \cos \Phi)$;
2—the $I_t = (\Phi - \Phi_0)/K$

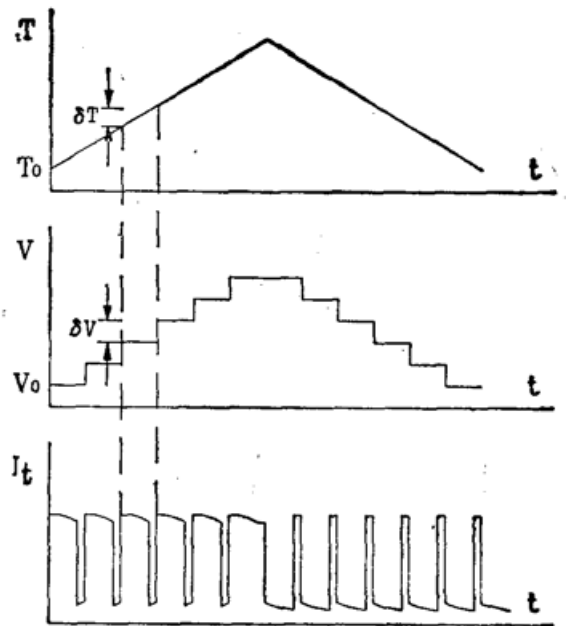


Fig. 4 The plots of temperature, bias voltage and output intensity versus time for OB fiber sensor

本实验证明了光学双稳器件引入光纤温度传感器中, 用双稳开关脉冲计数代替干涉条纹计数的测温方法是可行的。不仅可以提高温度测量精度, 而且可以判别温度的上升与下降。此传感器的原理不仅适用于温度测量, 也适用于长度、压力等其它物理量的测量。

进一步的工作需用此传感器实测温度, 给出测量精度定标。而且应使装置进一步实现光波导化。建议用一个与光纤耦合的光波导调制器代替现有的电光晶体器件, 这样不仅可以缩小传感器的体积, 还可以略去放大器, 提高器件的响应速度。



Fig. 5 Setup of simulated temperature testing for OB fiber temperature sensor

参 考 文 献

- [1] R. M. Mejias, R. Martinez-Herrero *et al.*; *Appl. Opt.*, 1985, **24**, No. 14 (Jul), 2091.
- [2] P. M. Mejias, R. Martinez-Herrero, *Appl. Opt.*, 1988, **27**, No. 5 (Mar), 811.
- [3] Chunfei Li, Lei Zhang *et al.*; *Proc. SPIE* (Topic Meeting on Optical Sensor, Orlando, March 1989).
- [4] Chunfei Li, Jia-Yong Ji; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**, No. 8 (Aug), 1317.

High accurate fiber sensor using optical bistability

LI CHUNFEI, WU JIE, ZHANG LEI, LIU LIJUN AND LI BIN

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006)

(Received 1 July 1991; revised 12 August 1991)

Abstract

A new kind of fiber temperature sensor combined fiber interferometer with electrooptic hybrid optical bistable device is proposed in this paper. By counting switching pulses of optical bistability to measure temperature the measuring accuracy of this sensor is about 10~100 times higher than that of the common fiber interferometer sensor and which is adjustable. The experimental Simulation in principle for this sensor as been accomplished.

Key words: optical bistability, optical fiber sensor, interferometer.