

文章编号: 1002-2082(2006)01-0066-03

一种基于外差探测的光纤 Bragg 光栅温度传感器

李志全, 汤 敬, 康健楠, 赵彦涛

(燕山大学 仪器科学与工程系, 河北 秦皇岛 066000)

摘 要: 提出了一种基于光纤 Bragg 光栅的温度传感器, 阐述了光纤 Bragg 光栅的温度传感机理, 用 2 个相同的光纤 Bragg 光栅构成折叠式 Mach-Zehnder (M-Z) 干涉仪, 其中一个光栅作为参考臂, 另一个作为传感臂; 采用外差探测技术来测量外界的温度物理量。当温度发生变化, Bragg 光栅的波长也随之改变。外差探测用来探测传感臂和参考臂由于温度变化引起的输出信号的频率差异。对其动态测量范围和灵敏度也进行了分析。

关键词: 光纤光栅; 外差探测; 动态范围; 灵敏度

中图分类号: TP212.11; TN253

文献标识码: A

A fiber Bragg grating temperature sensor based on heterodyne detection

LI Zhi-quan, TANG jing, KANG Jian-nan, ZHAO Yan-tao

(Department of Instrument Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: In this paper, a fiber Bragg grating (FBG) based temperature sensor is presented and its temperature measurement mechanism is explained. A folded Mach-Zehnder interferometer composed of two identical FBGs is employed in the sensing system. One of the gratings is used as a reference arm (local oscillator) and another as a sensing arm. The technology of heterodyne detection is utilized to measure the physical quantity of ambient temperature, since the wavelength of the FBG varies with the temperature. The heterodyne detection is used to detect the output signal frequency difference between the reference arm and sensing arm, which is caused by the temperature variation. The dynamic range and sensitivity of the system are analyzed and presented.

Key words: fiber Bragg grating; heterodyne detection; dynamic range; sensitivity

引言

近年来光纤传感器在许多领域得到广泛应用, 其中光纤光栅传感技术是 10 多年来发展最为迅速的技术之一^[1]。利用光纤布拉格光栅 (FBG) 的 Bragg 中心波长对环境的变化很敏感这一特性, 在智能结构的重要部位埋入 FBG, 可以用来监测应变、压力、位移、温度等外界物理量的变化^[2-3]。因为 FBG 传感器的信息载体是光, 无论以波长还是以位相为监测

对象, 都具有极限级的传感精度。波长编码保证其传感结果不受系统整体光强和光纤、耦合器连接损耗以及其他器件插入损耗的影响, 介电特性还使其免受电磁场影响。该类本征型传感器损耗低、光谱特性好、可靠性高, 易于复用和网络化管理, 可进行节点型的准分布式传感。光纤相对来说比较柔软, 传感回路易于植入或附着在结构表面, 能够实时提供应变、温度以及结构完整性方面的信息。

收稿日期: 2004-06-14; 修回日期: 2004-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助 (60377002)

作者简介: 李志全 (1954—), 男, 燕山大学仪器科学与工程系教授, 博士生导师, 主要从事非线性光电检测技术的研究工作, 已发表学术论文 100 余篇。

用光纤光栅传感器探测外界参量的技术有很多,其中包括基于光强、相位、偏振态、以及波长变化的技术^[4-6]。相位传感器的典型应用是 Mach-Zehnder(M-Z)干涉仪。M-Z 干涉仪是一种具有高相位分辨率的光学仪器。它利用干涉探测 FBG 传感器波长的变化,已经在光栅位移和应变传感测量中证明具有非常高的灵敏度。波长编码的低成本 FBG 温度传感器也已经得到迅速发展。在这种传感器中,当传感信息直接被编码为波长信息时,输出不依赖于整个光源的能量和耦合器中的损耗。

1960 年,Crane 首先提出了光外差干涉技术。随后,光外差技术在位移、振动及形貌测量等方面得到了成功的应用。其中位移测试技术可用于精密加工与定位。光外差位移测量灵敏度极高,优于 0.1 nm。本文采用一种外差探测新技术来测量 Bragg 波长的变化,通过一种折叠式 M-Z 干涉仪形式,在干涉仪 2 臂贴上相同的 Bragg 光栅,探测由 FBG 反射回的光波长的变化,从而得到被测温度的信息。

1 原理和实验

Bragg 光纤光栅是指单模掺锗光纤经紫外光照射成栅技术处理后形成的全新光纤光栅。成栅后的光纤纤芯折射率呈现周期性分布条纹并产生 Bragg 光栅效应。这种光栅的基本光学特性就是以共振波长为中心的窄带光学滤波器,当入射光满足

$$\lambda_b = 2n\Lambda \quad (1)$$

被 Bragg 光栅反射。式中, λ_b 为 Bragg 波长,即后向反射波长; n 为光纤光栅的有效折射率; Λ 为光栅栅距或光栅周期。由(1)式可见,与光栅波长有关的 2 个变量是有效折射率 n 和光栅周期 Λ ,被测温度或应变发生变化都会调制 Bragg 波长 λ_b 。

本文设计的温度传感系统如图 1 所示。其结构我们称为折叠式 M-Z 干涉仪,它是在单模光纤上刻制 2 个相同的 Bragg 光栅构成。一个贴在传感臂上,另一个附着在参考臂上。当宽带光源的入射光注入单模光纤时,被一个耦合器分成 2 束,并分别注入到 M-Z 干涉仪的 2 臂。满足 Bragg 中心波长的光波被反射,2 个光栅的反射光经过耦合器 C_1 和 C_2 耦合后输出。利用外差探测能够测量 2 个输出光波的相位差:温度的变化引起传感臂上光栅 Bragg 波长的变化,从而相位也发生变化。

假设忽略应变的影响,当作用在传感光栅的温度提高 ΔT 时, Bragg 波长变化可以表示为

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = \left(\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda_b} \frac{\partial \Lambda_b}{\partial T} \right) \Delta T = \left(\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} + \alpha_T \right) \Delta T \quad (2)$$

式中, ΔT 为温度的变化量; α_T 是光纤的热膨胀系数; $\Delta\lambda_b$ 是波长的变化量。由此可见, FBG 的热光效应包括 2 部分,即光纤材料本身的热膨胀系数和温度变化引起的有效折射率的变化。

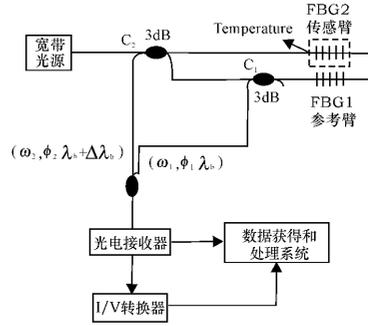


图 1 基于折叠式 M-Z 干涉仪的 FBG 温度传感器系统

Fig. 1 FBG temperature sensing system based on a folded M-Z interferometer

Bragg 波长的变化量 $\Delta\lambda_b$ 与温度变化 ΔT 的关系如图 2 所示。其变化呈线性变化,变化率为 0.007 8 nm/°C。

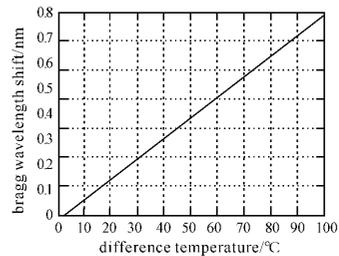


图 2 $\Delta\lambda_b$ 与温度变化 ΔT 的响应图

Fig. 2 Wavelength variance $\Delta\lambda_b$ versus temperature change ΔT

一束光波的相位与光程的关系式为

$$\varphi = \frac{2\pi nL}{\lambda_b} \quad (3)$$

式中, L 为光纤长度。

当温度变化时,相位 φ 发生变化, Bragg 波长变化 $\Delta\lambda_b$ 和相位变化 $\Delta\varphi$ 之间的关系为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi nL\Delta\lambda_b}{\lambda_b^2} \quad (4)$$

式中 ΔL 为 FBG 变化引起的干涉仪 2 臂的光程差。

折叠式 M-Z 干涉仪输出的光波可以转换为电场信号进行处理,这 2 束光波可分别表示为

$$\Psi_1 = A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \tag{5a}$$

$$\Psi_2 = A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \tag{5b}$$

式中, ω_1 和 ω_2 分别是干涉仪的参考臂和传感臂反射信号的角频率; φ_1 和 φ_2 是 2 个信号的相位,当不考虑温度效应时, $\varphi_1 = \varphi_2$, $\omega_1 = \omega_2$; A_1 和 A_2 是 2 束光波的幅值。

输出光波被光电二极管探测,光电二极管相当于一个平方律探测器,产生的光电流表达式为

$$I(t, T) = |A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2)|^2 \tag{6}$$

在(6)式中我们忽略了光电二极管的功率系数。光电二极管起到了光频率低通滤波器的作用,所以输出光电流的信号只包含比光信号低的频率信号,其输出电流表达式为

$$I = A \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi) \tag{7}$$

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 \tag{8}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \tag{9}$$

式中,幅值 A 与 A_1 和 A_2 ,以及光电二极管的响应系数有关。当温度发生变化时,频率 $\Delta\omega$ 和相位 $\Delta\varphi$ 也相应发生变化。

把(2)式代入(4)式得

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi n \Delta L}{\lambda_b} \right) \left(\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} + \alpha_T \right) \Delta T \tag{10}$$

$$\Delta\omega = \left(\frac{2\pi C}{\lambda_b} \right) \left(\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} + \alpha_T \right) \Delta T \tag{11}$$

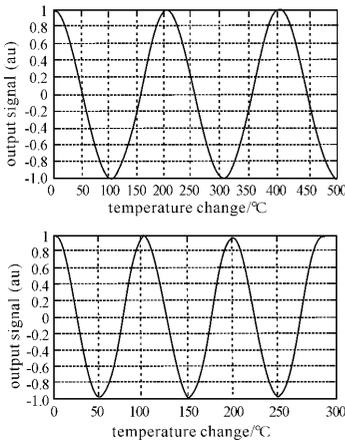


图3 输出的探测信号与温度变化响应图

Fig. 3 Output detection signal vs temperature change

由(6)式给出的瞬时输出电流与温度变化的关系如图3所示。图3(a)中 $\Delta L = 1$ mm,图3(b)中 ΔL

$= 2$ mm。从图3可以看出,曲线随FBG光程差的不同而变化,传感器的动态范围与 ΔL 有关(当 ΔL 增大时,用这种传感器精确测量的温度范围下降)。当 $\Delta L = 1$ mm 时,动态范围是 100 C;当 $\Delta L = 2$ mm 时,动态范围只有 50 C。因此,要想获得一个更广的动态范围,则需要 ΔL 的值更小。显而易见,其测量灵敏度也随动态范围的增大而减小。

许多应用领域都需要稳定的温度测量值。本文采用均方根值作为测量值,因此(7)式的输出电流值可以写成:

$$I = A [\cos(\Delta\omega t) \cos\Delta\varphi - \sin(\Delta\omega t) \sin\Delta\varphi] \tag{12}$$

因为 $\Delta\varphi \ll 2\pi$,则

$$I \approx A [\cos(\Delta\omega t) - \Delta\varphi \sin(\Delta\omega t)] \tag{13}$$

输出电流的均方根值为

$$I_{\text{rms}} = \frac{A}{2} \sqrt{1 + \Delta\varphi^2} \tag{14}$$

式中 $\Delta\varphi$ 随温度变化而变化。 I_{rms} 与温度变化关系曲线如图4所示。从图4可以看出,输出电流均方根与

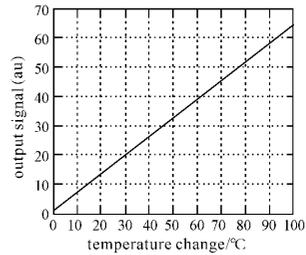


图4 输出电流均方根与温度变化关系

Fig. 4 Output current root-mean-square versus temperature change

温度变化呈线性关系。我们通过测量电流的变化量即可测得温度的变化 ΔT 。在该系统方案中,光电二极管探测器连接到一个电流电压转换器上,这样,可以通过读出电压值来反映温度的变化。其输出电压与温度变化关系如图5所示。

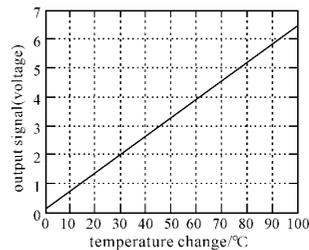


图5 输出电压与温度变化关系图

Fig. 5 Output voltage versus temperature change