

文章编号: 0258-7025(2004)08-0993-04

基于偏振光干涉的一种新型的 光纤光栅解调系统

毕卫红, 李 卫

(燕山大学光电子工程系, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 提出一种先进的基于偏振光干涉的光纤光栅解调实现方法, 偏振光干涉仪也是一种能将布拉格波长移动转化为干涉相位变化的非平衡干涉仪。与传统的非平衡干涉仪不同, 偏振光干涉仪是利用折射率 n_e 和 n_o 的差而不是利用光路长短的差来实现非平衡干涉的。另外, 由于偏振光干涉是发生在有着优良双折射特性的钽酸钇 (YVO_4) 晶体中而不是在石英光纤中, 这样就可避免石英光纤引入的干涉噪声。通过分析钽酸钇晶体的性质指出, 利用这种方法来实现光纤光栅温度检测, 其最小温度测量精度可达 $\pm 0.4^\circ\text{C}$ 。

关键词 集成光学; 光纤光栅; 干涉解调; 偏振光干涉; 钽酸钇晶体; 温度检测

中图分类号 TN 253 文献标识码 A

A Novel Approach to Fiber Grating Demodulation System Based on the Principle of Polarized-Light Interference

BI Wei-hong, LI Wei

(Department of Optoelectronics Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract The article introduces an advanced approach to fiber grating wavelength demodulation based on the principle of polarized-light interference. The polarized-light interferometer is also a kind of unbalanced interferometer which can convert the Bragg wavelength shifts into interferometer phase shifts. Different from the conventional unbalance interferometer, this polarization interferometer is based on the unequal refractive index n_e and n_o rather than the unbalanced paths. In addition, the polarized-light interference is generated in the yttrium vanadate (YVO_4) crystal with superior birefringence characteristic rather than in the optical fiber by which the interferometer bias is unavoidable. This article points out that through analyzing the properties of YVO_4 crystal, $\pm 0.4^\circ\text{C}$ temperature accuracy can be reached in temperature measurement by this method.

Key words integrated optics; fiber grating; interferometric demodulation; polarized-light interference; yttrium vanadate crystal; temperature detection

1 引 言

光纤光栅(FBG)是在光敏光纤的纤芯上利用紫外曝光技术形成的相位光栅器件, 在光传感中扮演越来越重要的角色。温度和应力是直接影响光纤光栅反射波长的物理量, $1.55\ \mu\text{m}$ 时两者引起的光纤光栅波长移动的典型值分别为: $13\ \text{pm}/^\circ\text{C}$, $1.15\ \text{pm}/\mu\epsilon^{[1]}$, 可见要体现该类传感器高灵敏度的特点,

必须要发展高分辨率解调技术。基于非平衡 M-Z 干涉仪光纤光栅解调, 其测量分辨率一般能够达到一个微应变甚至以下的数量级。这种方法测量动态应变时有很高的灵敏度, 但在进行准静态测量时却要遇到很多问题^[2]。目前主要方法有参考光栅法、傅里叶变换分析法、参考干涉图法以及可调光源法^[3~6], 但这几种方法对环境要求高, 且难以稳定操作。本文在光路中引入单光轴的双折射晶体, 利用

收稿日期: 2003-04-17; 收到修改稿日期: 2003-06-25

作者简介: 毕卫红(1960—), 女, 河北卢龙人, 燕山大学光电子工程系教授, 主要从事光纤传感技术和电路理论 CAD 方面的研究。E-mail: herbicade@163.com

快轴和慢轴的折射率不同来实现非平衡干涉。与光纤构成的非平衡 M-Z 干涉光路相比较,块状晶体受外界干扰小,能得到更高的测量精度。

2 基本原理

偏振光干涉光纤光栅解调的基本思想,是利用双折射晶体快轴、慢轴的折射率差 $n_e - n_o$ 来构成干涉光路。与 A. D. Kersey 等^[1~3]发展的非平衡 M-Z 干涉仪光纤光栅解调法相比本方案有下述主要特点:1) 不是利用光路长度差而是利用光路折射率差来构成干涉光路;2) 利用偏振光的干涉原理来实现干涉;3) 基本不受外界干扰的影响,因而能实现高的测量精度。

由耦合模理论可知,光纤光栅反射的光的波长漂移与应力和温度有关,当无应力作用时波长相对漂移量 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与轴向光纤光栅上的温度变化 ΔT 成正比,即

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (1)$$

式中 α 为热膨胀系数, ζ 为热光系数。采用图 1 所示

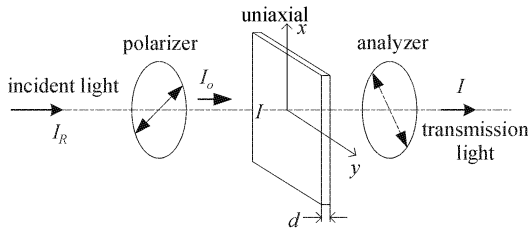


图 1 基于偏振光干涉的光纤光栅波长解调示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber Bragg grating wavelength demodulation based on polarization interferometer

的光路实现波长移动 $\Delta\lambda_B$ 解调。在图 1 中,入射光经起偏器后入射到光轴与偏振方向成 45° 夹角的单轴晶体上,晶体的光轴与其表面平行,设 y 为光轴方向, d 为晶体厚度。这时入射的线偏振光分解为 o 光和 e 光,它们的光矢量方向分别 x 轴和 y 轴,由于这两束光在晶体中的传播速度不同,经过晶体后产生一定的光程差。根据晶体光学^[7],两者的光程差 δ 为

$$\delta = (n_o - n_e)d \quad (2)$$

检偏器的出射光强 I 为

$$I = I_o \sin^2(\pi\delta/\lambda) = \frac{I_o}{2}[1 - \cos(2\pi\delta/\lambda)] \quad (3)$$

式中 I_o 为起偏器的出射光强, $2\pi\delta/\lambda$ 表示反映干涉的相位 φ ,即

$$\varphi = 2\pi\delta/\lambda \quad (4)$$

入射光 I_R 为光纤光栅所反射的光强,令其为自然光,有

$$I_o = \frac{1}{2}I_R \quad (5)$$

根据式(2)和式(4)有

$$\varphi = 2\pi(n_o - n_e)d/\lambda \quad (6)$$

将上式写成微分形式

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}[(\Delta n_o - \Delta n_e)d + (n_o - n_e)\Delta d + (n_o - n_e)d\Delta\lambda/\lambda] \quad (7)$$

(7) 式中, $(n_o - n_e)d\Delta\lambda/\lambda$ 项反映了待测信号, $(\Delta n_o - \Delta n_e)d$, $(n_o - n_e)\Delta d$ 项反映了外界环境的干扰而引入的噪声。这些干扰主要来自晶体外界环境温度的变化 $\Delta T'$ 。将晶体材料的折射率温度系数 $\frac{\partial n_o}{\partial T} =$

$\frac{\Delta n_o}{\Delta T'}$, $\frac{\partial n_e}{\partial T} = \frac{\Delta n_e}{\Delta T'}$, 热膨胀系数 $\sigma = \frac{\Delta d}{d\Delta T'}$, 以及公式

(1) 代入(7)式,则

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\left(\frac{\partial n_o}{\partial T} - \frac{\partial n_e}{\partial T} \right) d \Delta T' + (n_o - n_e) \sigma d \Delta T' + d(n_o - n_e)(\alpha + \zeta)\Delta T \right] \quad (8)$$

对给定的 $\lambda = \lambda_B$, 选择合适的晶体厚度 d 和温度 T' 使公式(6) 满足: $\varphi = 2k\pi + \pi/2$ (将干涉仪调整到正交工作状态)。根据公式(8), 对于某种原因而引起相位发生变化 $\Delta\varphi$ 时, 公式(3) 可写为

$$I = \frac{I_R}{4} \left\{ 1 - \cos \left\{ 2k\pi + \pi/2 + \frac{2\pi}{\lambda_B} \Delta T' \times \left[\left(\frac{\partial n_o}{\partial T} - \frac{\partial n_e}{\partial T} \right) d + (n_o - n_e) \sigma d \right] + \frac{2\pi}{\lambda_B} (\alpha + \zeta) (n_o - n_e) d \Delta T \right\} \right\} \quad (9)$$

当满足条件 $\left| \frac{2\pi}{\lambda_B} \Delta T' d \left[\left(\frac{\partial n_o}{\partial T} - \frac{\partial n_e}{\partial T} \right) + (n_o - n_e) \sigma \right] \right| \ll \left| \frac{2\pi}{\lambda_B} d \Delta T (n_o - n_e) (\alpha + \zeta) \right| \ll 1$ 时, 可略去噪声项并将上式写为线性形式

$$I = \frac{I_R}{4} [1 - \Delta T 2\pi(n_o - n_e)d(\alpha + \zeta)/\lambda_B] \quad (10)$$

公式(10) 中的系数 $2\pi(n_o - n_e)d(\alpha + \zeta)/\lambda_B$ 反映了系统测量灵敏度。由以上分析知, 单轴双折射晶体的 $n_o - n_e$ 越大系统的灵敏度越高; 折射率的温度系数 $\frac{\partial n_o}{\partial T}$, $\frac{\partial n_e}{\partial T}$ 越小系统的分辨力越高。广泛应用于光通信领域里的双折射钒酸钇晶体(YVO_4) 具备这样的优良特性。表 1^[8] 的数据反映了这种晶体的性质。

表 1 20~140℃ 温度范围内修正了的 Sellmeier 色散方程常数
Table 1 Constants of modified Sellmeier's dispersion equations in temperature range of 20~140℃

Temperature / °C	n_o				n_e			
	A	B	C	D	A	B	C	D
20	3.778790	0.070479	0.045731	0.009701	4.607200	0.108087	0.052495	0.014305
50	3.780527	0.070594	0.046270	0.009625	4.608590	0.107970	0.053254	0.014313
80	3.782355	0.070636	0.046955	0.009580	4.610330	0.107681	0.054187	0.014464
110	3.784201	0.070662	0.047693	0.009539	4.611804	0.107499	0.055024	0.014498

表 1 反映了不同温度下 YVO₄ 晶体折射率的 Sellmeier 方程中的常数, Sellmeier 方程如下式

$$n_i^2 = A_i + \frac{B_i}{\lambda^2 - C_i} - D_i \lambda^2$$

($i = o$ 或 e, λ 以 μm 为单位) (11)

结合 Sellmeier 方程根据表 1 中的数据可计算得波长 $\lambda_B = 1299.404 \text{ nm}$ 时不同温度下的折射率 (见表 2 和图 2)。

表 2 波长为 1299.404 nm 时 YVO₄ 晶体的折射率
Table 2 Values of refractive indices of YVO₄
($\lambda = 1299.404 \text{ nm}$)

Temperature / °C	n_o	n_e	$n_e - n_o$
20	1.952489	2.158626	0.206137
50	1.952988	2.158935	0.205947
80	1.953486	2.159250	0.205764
110	1.953985	2.159561	0.205576

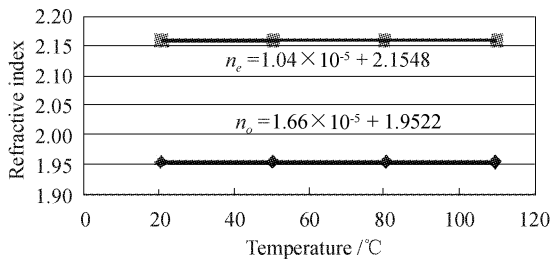


图 2 波长为 1299.404 nm 时 YVO₄ 晶体的折射率与温度 T 的关系曲线

Fig. 2 Plot of refractive index coefficients of YVO₄ crystal versus temperature ($\lambda = 1299.404 \text{ nm}$)

从图 2 中可以得到当波长 $\lambda = 1299.404 \text{ nm}$ 时, 对于 YVO₄ 晶体其折射率温度系数为 $\frac{\partial n_o}{\partial T} = 1.66 \times 10^{-5}, \frac{\partial n_e}{\partial T} = 1.04 \times 10^{-5}$ 。这样, 反映噪声的部分 $\frac{2\pi}{\lambda_B} \Delta T' d \left[\left(\frac{\partial n_o}{\partial T} - \frac{\partial n_e}{\partial T} \right) + (n_o - n_e) \sigma \right]$ 与反映信号的部分 $\frac{2\pi}{\lambda_B} d (n_o - n_e) (\alpha + \zeta) \Delta T$ 可以写为

$$\frac{2\pi}{\lambda_B} \Delta T' d \left[\left(\frac{\partial n_o}{\partial T} - \frac{\partial n_e}{\partial T} \right) + (n_o - n_e) \sigma \right] = 5.3 \times 10^{-6} \frac{2\pi}{\lambda_B} d \Delta T' \quad (12)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_B} d (n_o - n_e) (\alpha + \zeta) \Delta T = -1.34 \times 10^{-6} \frac{2\pi}{\lambda_B} d \Delta T \quad (13)$$

式中 $\sigma = 4.4 \times 10^{-6}$ [9], $\alpha + \zeta = 6.7 \times 10^{-6}$ [10], 分析式(12)与式(13)可知只要控制 YVO₄ 晶体的温度变化 $\Delta T'$ 就能提高光纤光栅测温精度 ΔT , 并且 $\Delta T'$ 与 ΔT 有相同的数量级。当 $\Delta T' = \pm 0.1^\circ\text{C}$ 时, 系统的最小可分辨温度 $\Delta T = \pm 0.4^\circ\text{C}$ 。

3 实验结果与讨论

实验装置如图 3 所示, 传感光栅长 1 cm, 带宽 $\Delta\lambda_{1/2} = 0.2 \text{ nm}$, 20℃ 时的中心波长 $\lambda_B = 1299.404 \text{ nm}$ 。光源为有致冷超辐射发光管 LED3S44-3, 其功率为 150 μW , 波长范围为 1270~1330 nm。双折射晶体为厚度 $d = 1 \text{ mm}$ 的 YVO₄ 晶体。光纤准直器的作用是将光纤出射的光变为平行光并使其垂直入射到起偏器上。温度控制器 1 的作用是控制 YVO₄ 晶体的温度变化 $\Delta T'$, 并调整干涉仪的正交状态。温度控制器 2 的作用是给光纤光栅产生被测温度。

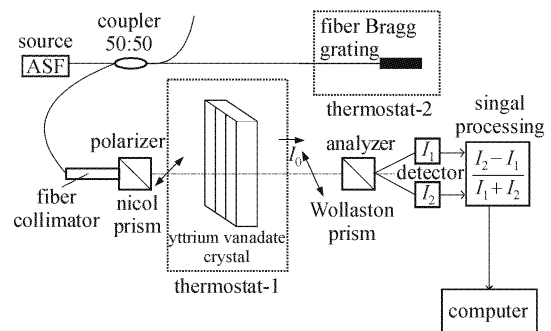


图 3 光纤光栅解调实验装置

Fig. 3 Experimental setup used for FBG demodulation

与图1不同,为了抵消光强变化的影响,检偏器渥拉斯顿棱镜输出的两路光 I_1, I_2 都要被用作信号处理。其中 I_2 由公式(10)确定,即 $I_2 = \frac{I_R}{4}[1 - \Delta T 2\pi(n_o - n_e)d(\alpha + \zeta)/\lambda_B]$, I_1 可根据能量守恒定律确定,即 $I_1 = \frac{I_R}{4}[1 + \Delta T 2\pi(n_o - n_e)d(\alpha + \zeta)/\lambda_B]$ 。这样通过信号处理就能测出 $\Delta\phi$

$$\Delta\phi = -\Delta T 2\pi(n_o - n_e)d(\sigma + \zeta)/\lambda_B = \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} \quad (14)$$

(14)式是以增量的形式给出的,由于实验中干涉仪调整到正交工作状态是针对光纤光栅的被测温度为 20°C 时进行的,(14)式可以写为

$$\phi = \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} = -2\pi(n_o - n_e) \times d(\sigma + \zeta)/\lambda_B(T - 20) \quad (15)$$

式中 $-2\pi(n_o - n_e)d(\sigma + \zeta)/\lambda_B = 6.48 \times 10^{-3} \text{ rad}/^\circ\text{C}$ 为系统的理论传感灵敏度。

实验结果为 $6.29 \times 10^{-3} \text{ rad}/^\circ\text{C}$, 如图4所示。实验中两个温度控制器的温控范围为 $0^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$, 控温精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

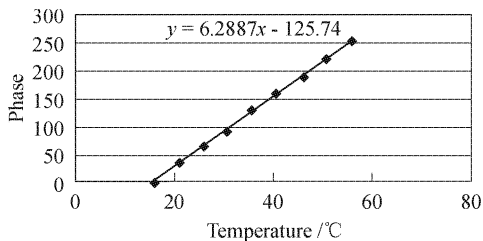


图4 相位和温度关系曲线

Fig. 4 Plot of phase versus temperature

造成理论和实验出现微小差别的原因可能为:

1) 引用的 $\sigma + \zeta$ 以及按照 Sellmeier 方程计算的 $n_o - n_e$ 值与实际的值有出入。2) 实验的各元件的光轴

的夹角关系与理论设定的有偏差。3) 入射光不可能与起偏器、钽酸钪晶体、检偏器严格垂直等。实验结果还表明系统的传感分辨率主要取决于温控器的温控精度。

参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. High-resolution fibre-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(3): 236~238
- 2 A. D. Kersey. A review of recent developments in fiber optic sensor technology [J]. *Optical Fiber Technology*, 1996, **2**(3): 291~317
- 3 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(15):1370~1372
- 4 M. M. Ohn, S. Y. Huang, R. M. Measure *et al.*. Arbitrary strain profile measurement within fibre gratings using interferometric Fourier transform technique [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(14):1242~1243
- 5 D. A. Flavin, R. McBride, J. D. C. Jones. Short optical path scan interferometric interrogation of a fibre Bragg grating embedded in a composite[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(4):319~321
- 6 G. Brady, K. Kalli, D. J. Webb *et al.*. Simultaneous interrogation of interferometric and Bragg grating sensors [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(11):1340~1342
- 7 Xu Jia-hua. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 1988. 327~352
徐家骅. *工程光学* [M]. 北京:机械工业出版社, 1988. 327~352
- 8 Shi Hongsheng, Zhang Ge, Shen Hongyuan. Measurement of principal refractive indices and the thermal refractive index coefficients of yttrium vanadate [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2001, **30**(1):85~88
史宏声,张戈,沈鸿元. 钽酸钪晶体折射率和折射率温度系数的测定[J]. *人工晶体学报*, 2001, **30**(1):85~88
- 9 Zhuang Xinxin, Su Genbo, He Youpin *et al.*. The properties of birefringence crystals used in optical isolator [J]. *Chinese J. Struct. Chem.*, 2001, **20**(4):291~293
庄欣欣,苏根博,贺友平等. 双折射晶体——重要的光功能材料[J]. *结构化学*, 2001, **20**(4):291~293
- 10 Guan Baiou, Liu Zhiguo, Tang Tao *et al.*. Study on multiplexed fiber Bragg grating temperature sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9):1203~1206
关柏鸥,刘志国,唐涛等. 光纤光栅复用温度传感研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9):1203~1206