

线性双折射色散对 OCS 灵敏度影响的理论研究*

王政平 李庆波 齐 异 黄宗军 史金辉

(哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001)

摘 要 以琼斯矩阵为数学工具, 利用理论分析和计算机仿真的方法研究了线性双折射的色散特性及其对光学电流传感器灵敏度的影响. 在光学电流传感器系统中, 光源的驱动电流与环境温度改变, 都会造成光源峰值波长移动. 由于光学玻璃材料线性双折射的色散特性, 会使光学电流传感器的灵敏度随光源波长的变化而改变. 研究表明, 线性双折射的色散特性会对输出曲线的尺度因子产生影响, 但是影响很小可以忽略. 本研究结果可为光学电流传感器的研究设计人员提供有用的参考.

关键词 光学电流传感器; 法拉第效应; 线性双折射; 色散

中图分类号 TN929 **文献标识码** A

0 引言

自 1983 年 Sato 的光学玻璃电流传感器获得欧洲专利以来, 光学玻璃电流传感器的研究取得了很大进展. 为了克服反射相移对光学电流传感器的不利影响, 研究者们先后提出了互补反射棱镜对、临界角反射、保偏膜反射等传感头设计方案^[1~4]. 但在以往的光学电流传感器(OCS)的研究与设计中, 大多数研究者都假定光源输出波长恒定不变, 因此很少讨论系统中各个光学元件色散特性可能会对系统产生的影响. 但真实的情况是, 当光源驱动电流发生变化或光源周围温度发生变化时, 光源输出的波长就会发生改变, 进而通过各光学元件的色散特性影响系统的性能, 其中包括保偏反射膜反射相移的色散特性、光学玻璃 Verdet 常数的色散特性、光学玻璃内线性双折射的色散特性、光学玻璃自身的色散特性等. 本文报告光源中心波长在 1290 nm 附近变化时, 玻璃材料线性双折射的色散特性对光学电流传感系统灵敏度的影响的理论研究结果. 在我们已知的资料中, 尚未发现类似的研究报告或报道, 对于真实的系统而言, 由于保偏反射膜直接镀于玻璃传感头的三个反射面上, 用实验的方法分别考察光学玻璃电流传感头内线性双折射与保偏反射膜的色散特性对系统性能的影响几乎是不可能的. 因此本文只能提供理论研究结果而无法提供实验验证.

1 光源中心波长特性实验结果

本文作者对武汉电信器件公司生产的 LED3S403 光源中心波长随驱动电流及环境温度变

化的规律进行了实验. 结果表明: 在 16℃ 环境下, 驱动电流由 15 mA 变化到 80 mA 时, 光源输出光中心波长从 1290 nm 变化到 1315 nm; 在 60 mA 驱动电流下, 环境温度由 10℃ 变化到 30℃ 时, 光源输出光中心波长从 1292 nm 变化到 1302 nm. 因此, 本文研究内容针对的波长变化选定在 1290 nm 到 1315 nm 范围之内.

2 线性双折射的色散特性

本来是各向同性的介质, 在应力的作用下会表现出各向异性的光学性质. 光学玻璃在制造与加工过程中, 由于冷却不均匀或其它原因而存在一定的残余内应力, 会使玻璃产生应力双折射效应.

线性双折射使在两个双折射轴方向上振动的光在光学玻璃中传播速度不同, 从而产生相位延迟 δ . 本文作者早期实验结果已认定两个双折射轴分别处于坐标系(见下文)的 x, y 方向上^[5], 其可表示如下

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_x - n_y)d \quad (1)$$

式中 λ 为入射光波长, n_x 为 x 方向上的折射率, n_y 为 y 方向上的折射率, d 为光在光学玻璃中传播的距离. 由光弹理论^[6]可知在某一方向上的折射率由于应力产生的变化为

$$\Delta n_i = -\frac{n_0^3}{2}\sum p_{ij}\epsilon_j \quad (2)$$

式中 n_0 为无应力情况下的折射率, p_{ij} 为弹光系数, ϵ_j 为应力产生的应变分量. 依式(2)有

$$n_x = n_0 + \Delta n_x = n_0 - \frac{n_0^3}{2}\sum p_{xj}\epsilon_j \quad (3)$$

$$n_y = n_0 + \Delta n_y = n_0 - \frac{n_0^3}{2}\sum p_{yj}\epsilon_j \quad (4)$$

所以 x, y 方向上折射率的差为

*黑龙江省自然科学基金资助项目(项目编号:F01-02)

Email: zpwang@hrbeu.edu.cn

收稿日期: 2003-11-03

$$n_x - n_y = -\frac{n_0^3}{2}(\sum p_{xj}\epsilon_j - \sum p_{yj}\epsilon_j) \quad (5)$$

因为弹光系数 p_{ij} 和应力产生的应变 ϵ_j 是与入射波长无关的常数,所以可以设常数 Q

$$Q = -\frac{1}{2}(\sum p_{xj}\epsilon_j - \sum p_{yj}\epsilon_j) \quad (6)$$

将式(6)带入式(5),则可得

$$n_x - n_y = Qn_0^3 \quad (7)$$

再将式(7)带入式(1),可得

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} Q n_0^3 d \quad (8)$$

由于光学玻璃的折射率是波长的函数,所以由式(8)可知,当入射光波长 λ 改变时,相位延迟 δ 也会随之改变. 我们称这种特性为线性双折射的色散特性. 利用式(8)及对光源波长特性实验结果,以 MathCAD7.0 软件为工具进行计算机仿真,计算出线性双折射的色散曲线如图 1 所示. 具体的仿真过程如下:利用科希(Cauchy)色散公式^[7]和《光学技术手册》上的数据^[8]可计算出 ZF-7 玻璃在任何波长下的折射率. 由本文作者以前的工作结果知:在 632.8 nm 波长,ZF-7 光学玻璃单位长度线性双折射为 $0.5^\circ/\text{cm}$ ^[5]. 将 632.8 nm 和两个数据带入式(8),可求出 Q 的值为 1.507×10^{-8} . 在光源中心波长特性实验中,已确定波长变化范围是从 1290 nm 到 1315 nm. 利用科希色散公式确定在此波长范围内的数个计算点的 n_0 值,再将 Q 值和波长变化范围内已选定的各个波长值代入式(8),即可计算出在 1290 nm 到 1315 nm 波长变化范围内线性双折射的变化范围是由 $0.2333^\circ/\text{cm}$ 变化到 $0.2287^\circ/\text{cm}$.

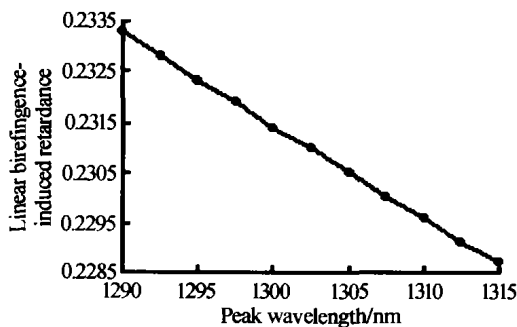


图 1 线性双折射相移的色散

Fig. 1 Dispersion of linear birefringence

3 线性双折射色散对 OCS 灵敏度的影响

作为研究对象的块状玻璃光学电流互感器的模型及其细节见文献[4,9,10]. 传感头中的光学过程可用琼斯矩阵表示为

$$E_{\text{out}} = F_4 R_3 F_3 R_2 F_2 R_1 F_1 E_{\text{in}} \quad (9)$$

当以 p -分量和 s -分量描述输出电矢量时,式

(9)可表示成

$$E_{\text{out}} = \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \end{bmatrix} \quad (10)$$

因此输出电矢的 p -分量和 s -分量的光强分别为

$$J_p = E_p^* E_p \quad (11)$$

$$J_s = E_s^* E_s \quad (12)$$

式中 E_p^* 和 E_s^* 分别是与 E_p 和 E_s 对应的复共轭函数. 经信号处理后的输出结果为

$$U_{\text{out}} = \frac{J_s - J_p}{J_s + J_p} \quad (13)$$

尺度因子是表征系统灵敏度的参数,其定义为 $S = U_{\text{out}}/I$,即输出曲线的斜率. 由式(8)可知线性双折射是波长的函数,所以由式(9)~(13)及尺度因子定义可知,尺度因子也是波长 λ 的函数,即

$$S = H(\lambda) \quad (14)$$

根据式(9)~(14),利用 MathCAD7.0 软件可计算出归一化尺度因子色散曲线如图 2 所示.

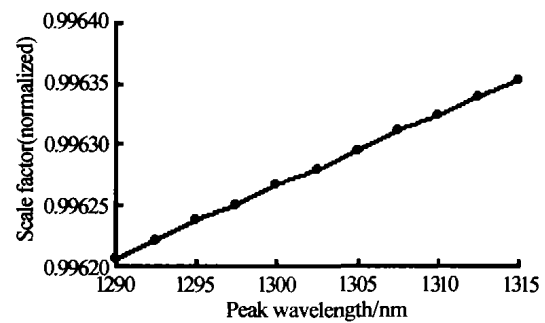


图 2 尺度因子(归一化)色散曲线

Fig. 2 Dispersion of the scale factor (normalized)

从图 2 可知,将线性双折射为零、工作波长 1290 nm 条件下的理想系统的尺度因子规定为 1,当线性双折射不为零且光源波长从 1290 nm 变化到 1315 nm 时,实验所得归一化尺度因子由 0.996206 升高到了 0.996352,变化了 0.0146%. 这表明在光学电流互感器中线性双折射效应的色散特性对总体影响并不大.

4 结论

本文报告了线性双折射色散特性对光学玻璃光学电流传感器输出灵敏度影响的理论分析. 研究结果表明,由于光源的驱动电流发生变化,或者光源所处的环境温度发生变化所造成的输出光束峰值波长移动,会通过存在于玻璃传感头中是线性双折射的色散特性影响光学电流传感器的灵敏度,但是总体来说影响并不大. 所以在光学玻璃光学电流互感器的设计中,对线性双折射色散特性对光学玻璃光学电流传感器输出灵敏度影响可不必过多考虑.

参考文献

- 1 Sato T, Takahashi G, Inul Y. Method and apparatus for

- optically measuring a current. European Patent Application, Appl. No: 831022.10. B, Publication No: 0 088 419 A1, 1983
- 2 Ning Y N, Chu B C B, Jackson D A. Miniature Faraday current sensor based on multiple critical angle reflections in a bulk-optic ring. *Opt Lett*, 1991, **16** (24): 1996 ~ 1998
 - 3 Rochford K B, Rose A H, Deeter M N, *et al.* Faraday effect current sensor with improved sensitivity-bandwidth product. *Opt Lett*, 1994, **19**(22): 1903 ~ 1905
 - 4 Wang Z P, Huang Z J, Kang C, *et al.* Optical current sensing element with single medium layers for high voltage applications. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**: 455 ~ 458
 - 5 王政平, 李庆波, 欧阳春梅, 等. 延迟片法测量光学玻璃电流传感头线性双折射. *光子学报*, 2004, **33**(6): 716 ~ 720
Wang Z P, Li Q B, Ouyang C M, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 716 ~ 720
 - 6 Ulrich R, Rashleigh S C, Eickhoff W. Bending-induced birefringence in single-mode fibers. *Optics Letters*, 1980, **5** (6): 273 ~ 275
 - 7 梁铨廷. 物理光学. 北京: 机械工业出版社, 1987. 43
Liang Q T. *Physical Optics*. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987. 43
 - 8 王之江, 陈杏蒲, 陆汉民, 等. 光学技术手册. 北京: 机械工业出版社, 1987. 724
Wang Z J, Chen X P, Lu H M, *et al.* *Handbook of Optical Technology*. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987. 724
 - 9 王政平, 李庆波, 王慧丽, 等. 光学玻璃电流传感头线性双折射的一种测量方法. *光子学报*, 2003, **32**(5): 612 ~ 614
Wang Z P, Li Q B, Wang H L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 612 ~ 614
 - 10 王政平, 李庆波, 刘晓瑜, 等. 线性双折射对光学玻璃电流传感器输出特性影响的理论分析. *光子学报*, 2004, **33**(7): 818 ~ 822
Wang Z P, Li Q B, Liu X Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 818 ~ 822

Theoretical Study of the Dispersion Effect of Linear Birefringence upon the Sensitivity of an Optical Current Sensor

Wang Zhengping, Li Qingbo, Qi Yi, Huang Zongjun, Shi Jinhui
Science School, Harbin Engineering University, Harbin 150001

Received date: 2003-11-03

Abstract The dispersion properties of linear birefringence and its effect upon the sensitivity of a bulk-glass optical current sensor are theoretically analyzed taking the Jones' Matrix as a mathematical tool and simulated with a computer. The peak wavelength of the optical source used in an optical current sensing system will be changed by the fluctuations of the driving current or its ambient temperature. This will result in the fluctuation of the sensitivity of the system because of the dispersion of the linear birefringence existing inside the sensing head. The investigation results show that the dispersion will affect the scale factor of the system. But the effect is so small that can be omitted. These results might be useful for the researchers and designers working in the optical current sensing techniques area.

Keywords Optical current sensor; Faraday effect; Linear birefringence; Dispersion



Wang Zhengping professor and supervisor of the students for Ph. D. at Harbin Engineering University (HEU), was born in Heilongjiang Province of China in 1949, received his B. Sc. and M. Eng. degrees at the Dept. of Physics and the Dept. of Electronic Engineering of the HEU in 1982 and 1989, respectively. He was the member of AAAS, NYAS, and OSA. He is the member of SPIE now. His primary areas of research include fiber-optic sensing technology, thin film optics, and optical metrology. More than fifty papers reflecting the research work of him/his group have been published, among which 9 have been embodied by SCI, 12 by EI and 2 by ISTP.