

# 反射相移色散对 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单层保偏反射膜反射相移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. 由于反射膜上产生的反射相移的色散特性, 会使光学电流传感器的灵敏度随光源波长的变化而改变. 研究结果表明, 反射相移的色散特性会对输出曲线的尺度因子产生明显的影响. 因此, 光源的恒温控制与光源驱动电流的恒流控制是必要的. 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; 反射相移; 色散

**中图分类号** TP212.14 **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多进展. 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<sup>[1-6]</sup>. 但在以往的光学电流传感器(OCS)的研究与设计, 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. 本文仅报告光源中心波长在 1290 nm 附近变化时, 保偏反射膜反射相移的色散特性对光学电流传感系统灵敏度影响的理论研究结果. 其它光学元件色散特性对光学电流传感系统影响的研究结果将随着研究工作的进展陆续报道. 在我们已知的资料中, 尚未发现类似的研究报告或报道, 故希望本文研究结果对光学电流传感系统的研究设计有一定的参考价值.

## 1 光源中心波长特性实验结果

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 ~ 1315 nm 范围之内.

## 2 反射相移的色散特性

单层介质保偏反射膜反射相移是光学玻璃折射率  $n_g$ 、反射膜折射率  $n_f$ 、反射膜厚  $d$  和入射角  $\alpha_0$  的函数<sup>[7]</sup>

$$\Delta = G(n_g, n_f, d, \alpha_0) \quad (1)$$

式中, 光学玻璃折射率  $n_g$  和反射膜折射率均  $n_f$  为入射波长  $\lambda$  的函数. 对于确定膜厚的反射膜而言, 膜厚波长比也将随波长改变而变. 因此, 反射相移的大小必定会随入射波长  $\lambda$  的改变而变化

$$\Delta = K(\lambda) \quad (2)$$

式(2)所反映的特性通常被称为反射相移的色散特性.

对反射相移特性研究的先期工作结果表明<sup>[8]</sup>, 式(2)的具体函数形式为

$$\Delta = \arg(r_p/r_s) \quad (3)$$

式中,  $r_p$ 、 $r_s$  分别是入射光的  $p$ -分量与  $s$ -分量在反射膜上的复反射系数, 它们可用下式求出

$$r_{p,s} = \frac{r_t + r_b \exp(-2i\beta)}{1 + r_t r_b \exp(-2i\beta)} \quad (4)$$

式中,  $r_t$ 、 $r_b$  分别是光束在反射膜上表面和下表面的复反射系数, 针对  $p$ -分量或  $s$ -分量的情况可分别用菲涅尔公式中的反射公式算出

$$r_p = \frac{n_2 \cos \alpha_1 - n_1 \cos \alpha_2}{n_2 \cos \alpha_1 + n_1 \cos \alpha_2} \quad (5)$$

$$r_s = \frac{n_1 \cos \alpha_1 - n_2 \cos \alpha_2}{n_1 \cos \alpha_1 + n_2 \cos \alpha_2} \quad (6)$$

式(4)中的  $\beta$  可用下式算出

$$\beta = \frac{2\pi d}{\lambda_0} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha_1} \quad (7)$$

\*黑龙江省自然科学基金资助(项目编号:F01-02)

Email: zpwang@hubeu.edu.cn

收稿日期: 2003-08-13

式(5)、(6)、(7)中的脚标 1 代表入射媒质,脚标 2 代表折射媒质; $n$  代表折射率; $\alpha$  代表入射角或折射角, $\lambda_0$  是光波在真空中的波长.

利用式(3)~(7),及对光源波长特性实验结果,使用软件 MathCAD7.0 进行计算机仿真,计算出反射相移的色散曲线如图 1(a)、(b)所示.由图 1(a)可知,当光源中心波长从 1290 nm 变化到 1315 nm 时,保偏膜的反射相移从  $0^\circ$  增加到了  $-2.8^\circ$ .其中用到的参数在供货商提供的光源中心波长 1290 nm 波长下分别为:保偏反射膜(零相移)厚  $d = 1676$  nm, ZF-7 光学玻璃折射率  $n_g = 1.7701$ , 介质膜折射率  $n_f = 1.353$ . 后面两个参数都是先从资料中查到它们在其它波长下的折射率,再用科希(Cauchy)色散公式算得到的<sup>[9-11]</sup>. 用到的入射角  $\alpha_0 = 45^\circ$ .

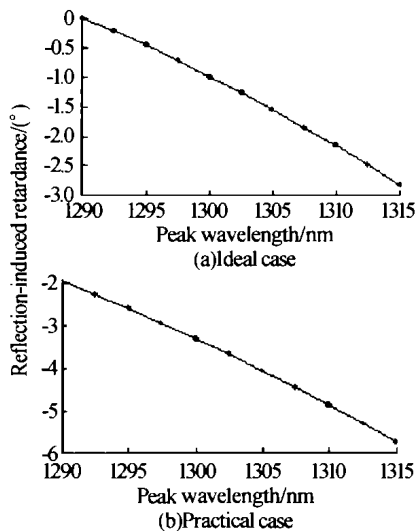


图 1 反射相移色散曲线

Fig. 1 Dispersion of reflection-induced retardance

工程实际中镀制的保偏膜的反射相移只能控制在  $-2^\circ$  以内.若考察具有  $-2^\circ$  反射相移的反射膜情形,则膜厚  $d = 1654$  nm. 此情形下计算所得的反射相移色散曲线如图 1(b)所示.从该图可知,在此情形下,保偏膜的反射相移可从  $-2^\circ$  增加到约  $-5.7^\circ$ . 此情形下发生的反射过程已不再是严格意义下的保偏反射了.

### 3 色散特性对保偏反射式 OCS 灵敏度的影响

保偏反射式光学电流互感器传感头的模型细节可见文献[4].传感头中的光学过程可用琼斯矩阵表示,即

$$E_{\text{out}} = F_4 R_3 F_3 R_2 F_2 R_1 F_1 E_{\text{in}} \quad (8)$$

式中  $E_{\text{out}}$  是输出电矢量,  $F_i$  是表示第  $i$  条光路的传输矩阵( $i = 1, 2, 3, 4$ ), 此处假定传感头内的双折射足够小可忽略,因此只计算引入的法拉第旋转; $R_i$

是表示第  $i$  个反射面上发生的反射效应的反射矩阵( $i = 1, 2, 3$ ),  $E_{\text{in}}$  为输入线偏光的电矢量.

传输矩阵  $F_i$  的形式为

$$F_i = \begin{bmatrix} \cos(\phi_i) & -\sin(\phi_i) \\ \sin(\phi_i) & \cos(\phi_i) \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (9)$$

式中  $\phi_i$  是第  $i$  条光路引入的法拉第旋转角,可用下式算出

$$d\phi_i = VHdl = \frac{VI}{2\pi} \frac{xj - yi}{x^2 + y^2} (dxi + dyj) = \frac{VI}{2\pi} \frac{xdy - ydx}{x^2 + y^2} \quad (10)$$

$$\phi_i = \int d\phi_i \quad (11)$$

式中  $V$  是传感材料的 Verdet 常数,  $I$  是被测电流.

反射矩阵  $R_i$  形式如下

$$R_i = \begin{bmatrix} e^{i\Delta_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (12)$$

式中,  $\Delta_i = \delta_{pi} - \delta_{si}$  是第  $i$  个反射面上的反射相移.

当以  $p$ -分量和  $s$ -分量描述输出电矢量时,式(8)成为

$$E_{\text{out}} = \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \end{bmatrix} \quad (13)$$

因此输出电矢的  $p$ -分量和  $s$ -分量的光强分别为

$$J_p = E_p^* E_p \quad (14)$$

$$J_s = E_s^* E_s \quad (15)$$

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

$$U_{\text{out}} = \frac{J_s - J_p}{J_s + J_p} = U_{\text{out}}(\Delta_i) \quad (16)$$

不失一般性,设三个反射面上的反射膜厚相同,则三个面上的反射相移大小相同,记为  $\Delta$ . 此时输出信号可表示为

$$U_{\text{out}} = U_{\text{out}}(\Delta) \quad (17)$$

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(2)可知反射相移是波长  $\lambda$  的函数,所以由式(17)及尺度因子定义知尺度因子也是波长  $\lambda$  的函数,即

$$S = H(\lambda) \quad (18)$$

对于理想化的零相移保偏反射膜,根据式(8)~(18),使用软件 MathCAD7.0 进行计算机仿真,可计算出归一化尺度因子色散曲线如图 2(a)所示.在计算中,用到依光学玻璃供货商提供的数据及 Verdet 常数色散公式<sup>[12]</sup>,算得 Verdet 常数在各个波长计算点的相应波长值.例如在 1290 nm 波长时的 Verdet 常数为:  $V = 7.222 \times 10^{-6}$  rad/A.

从图 2(a)可知,对于理想化的、针对 1290 nm 波长的零相移保偏反射膜,当光源波长从 1290 nm

变化到 1315 nm 时, 归一化尺度因子由 1 降到了 0.99575. 降低了 0.425%.

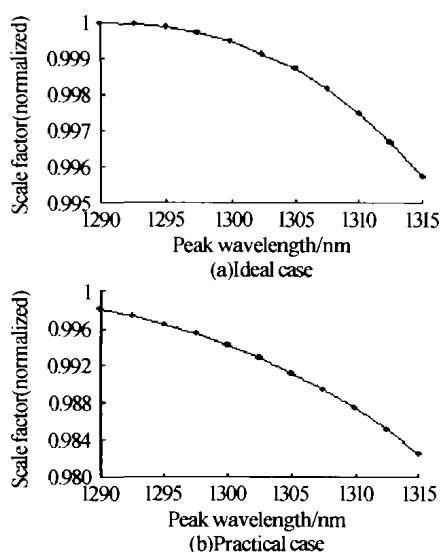


图 2 归一化尺度因子色散曲线

Fig. 2 Dispersion of the scale factor (normalized)

对于比较接近工程实际的具有  $-2^\circ$  反射相移的反射膜情形, 其归一化尺度因子色散曲线如图 2(b) 所示. 在上述情形下, 归一化尺度因子由 0.99795 降到了 0.98249. 降低了 1.55%.

由上可知: 仅保偏膜反射相移色散引起的测量误差就已经不能满足电流互感器国家标准 0.2 级准确级的规定. 因此, 在光学电流互感器设计中, 必须对光源采取恒温、恒流控制的技术措施, 以保证光源波长的稳定性, 从而保证系统灵敏度的稳定性.

## 4 结论

本文对单层保偏反射膜反射相移的色散特性对保偏膜式光学电流传感器输出灵敏度的影响进行了理论分析和计算机仿真. 研究表明, 由于光源的驱动电流或光源所处的环境温度发生变化所造成的光束峰值波长移动, 会由于反射相移的色散特性而对保偏膜式光学电流传感器输出曲线的尺度因子造成明显影响. 这意味着在实际系统中, 必须对光源采取恒流和恒温措施, 以保证光学电流传感器达到国家标准所要求的准确度.

## 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 李红斌, 刘延冰, 汪本进. 偏振分束器对光学电流传感器稳定性的影响. *光子学报*, 2003, **32**(2): 159 ~ 161  
Li H B, Liu Y B, Wang B J. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 159 ~ 161
- 6 王政平, 李庆波, 冯瑞颖, 等. 起偏器参量对光学电流传感器性能的影响. *光子学报*, 2003, **32**(4): 444 ~ 447  
Wang Z P, Li Q B, Feng R Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 444 ~ 447
- 7 Wang Z P, Sun W M, Ruan S L, et al. Polarization-preserving totally reflecting prisms with a single medium layer. *Appl Opt*, 1997, **36**(13): 2802 ~ 2806
- 8 Wang Z P, Ruan S L, Sun W M, et al. Reflecting prism-retarders with a single medium layer. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(6): 555 ~ 560
- 9 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
- 10 麦克劳德 H A 著, 周九环, 尹树百译. 光学薄膜技术. 北京: 国防工业出版社, 1974. 455  
McLORD H A. Optical Film Technology. Translated by Zhou Jiu-huan, and Yin Shu-bai, Beijing: National Defence Industry Press, 1974. 455
- 11 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
- 12 Schott Glaswerke. The wavelength dependence of the Verdet constant. *Technical Information-Optical Glass*, 1985, (17): 2 ~ 4

## Theoretical Study of the Effect of the Reflection-induced Retardance Dispersion 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: 2003-08-13

**Abstract** The dispersion properties of the reflection-induced retardance of the polarization-preserving reflecting medium layer and its effect upon the sensitivity of an optical current sensor are theoretically analyzed taking the Jones' Matrix as a mathematical tool and simulated with a computer. In an optical current sensing system, when the fluctuations of the driving current or the ambient temperature of the optical source happens, the peak wavelength of the source will change. This will result in the fluctuation of the sensitivity of the system because of the existing of the dispersion of the reflection-induced retardance. The investigation results show that the dispersion will obviously affect the scale factor of the system. Therefore, it is necessary to stabilize the driving current and the ambient temperature of the optical source by some technical means. These results might be useful for the researchers and designers working in the optical current sensing techniques area.

**Keywords** Optical current sensor; Faraday effect; Reflection-induced retardance; Dispersion



**Wang Zhengping** a professor and supervisor of the students for Ph. D. at Harbin Engineering University (HEU), was born in 1949, in Heilongjiang Province of China, 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 13 have been embodied by SCI, 15 by EI and 5 by ISTP.