

四角状 ZF-7 玻璃双层光路电流传感头研究

陈锡坤 邱静和 戴来发 朱绮彪

(上海科学技术大学物理系, 上海 201800)

提 要

利用线偏振光在 ZF-7 玻璃中多次全反射构成块状四角双层光路电流传感头. 本文分析了入射面相互垂直的相邻二次全反射的 P 与 S 分量之间的位相及其相互抵消. 对该传感头进行了实验测试.

关键词 全反射, 电流传感器, 法拉第效应.

1 引 言

基于法拉第(Faraday)效应的电流传感器是线偏振光在置于磁场 H 中的光介质内部传播时偏振面旋转了角度 ϕ

$$\phi = V \int_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}, \quad (1)$$

式中 V 为材料的 Verdet 常数, l 为光介质的长度. 用低双折射的单模光纤构成电流传感器的研究已有很多报道^[1~4]. 把单模光纤绕在电流载体周围测量电流, 制作方便, 而且增加绕圈, 可把传感器的灵敏度做得很高. 但由于单模光纤易受环境(温度和应力)的影响, 使电流传感器不能长期稳定地工作, 所以尚不能实用化. 用单块条形 SF-6 玻璃, ZnSe, (YTb)IG 单晶材料构成的电传感头^[5], 不易受环境的影响, 从而克服了单模光纤传感器的缺点. 但这种电流感头的输出随它离开载流导体的距离而变, 这给实际测量电流造成不便, 而且易受另外二相电流产生的磁场影响, 降低整个电流传感器的精度. 为了测量(1)式描述的等场强线积分, 最好使法拉第介质内部的光束在被测电流周围取闭环, 这要求光束环绕导体必须经过几个全内反射.

2 原 理

光在玻璃内传播, 当入射角大于临界角 θ_c 时发生全内反射, 其平行于入射面的分量(简称 p 分量)和垂直于入射面的分量(简称 s 分量)经历不同的位相变化. 设 $\Delta\phi_{//}$ 和 $\Delta\phi_{\perp}$ 分别为全反射时 p 分量和 s 分量所经历的相移, 它们分别由下式确定

$$\operatorname{tg} \frac{\Delta\phi_{//}}{2} = \frac{\sqrt{\sin^2\theta_i - n_n^2}}{n_n^2 \cos\theta_i}, \quad \operatorname{tg} \frac{\Delta\phi_{\perp}}{2} = \frac{\sqrt{\sin^2\theta_i - n_n^2}}{\cos\theta_i}, \quad (2)$$

而 p 分量与 s 分量之间的位相差为

$$\operatorname{tg} \frac{\Delta\phi_{//} - \Delta\phi_{\perp}}{2} = \frac{\cos\theta_i \sqrt{\sin^2\theta_i - n_n^2}}{\sin^2\theta_i}. \quad (3)$$

由(2)和(3)式可以看出,只有入射角等于 θ_c 时,全反射的 p 分量和 s 分量之间才没有位相差,这时入射线偏振光经全反射后出射的光也是线偏振的,Chu等^[6]用这个原理构成块状三角形电流传感头.在其它入射角全反射时均有位相差,即入射的线偏振光经全反射后出射成椭圆偏振光.若入射角为 45° 构成二次全反射的反射式传感头,其灵敏度降至通过式的 40% ^[7].

本文介绍用 ZF-7 玻璃构成的双层光路四角块状电流传感头.首先把 ZF-7 玻璃退火到 10 nm/cm 以下的应力,忽略由内应力引起的线双折射.然后加工成如图 1 所示的块状中空方形电流传感头.光在该传感头中分上下二层路径传播,下层为 I 和 III 臂,上层为 II 和 IV 臂.在 a, b, c 角处,光分别经历了上下二次入射都为 45° 的全反射($\lambda = 656\text{ nm}$ 时, $\theta_c = 33.8^\circ$).由于每个角中上、下二次全反射处的入射面相互垂直,所以光在下反射面中的 p 分量到上反射面中成 s 分量下反射面中的 s 分量到上反射面中成 p 分量,反之亦然.这样在每个角中由全反射引起的 p 分量与 s 分量之间位相差相互抵消.

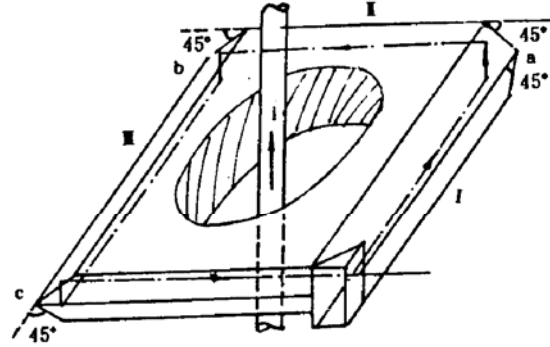


Fig. 1 Cubical diagram of quadrangle bulk current sensing probe

用琼斯(Jones)矩阵分析如下,在 a 角中设下表面全反射的反射矩阵为 $R_1 =$

$$\begin{bmatrix} e^{i\phi_{\parallel}} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_{\perp}} \end{bmatrix},$$

则上表面全反射的反射矩阵为 $R_2 = \begin{bmatrix} e^{i\phi_{\perp}} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_{\parallel}} \end{bmatrix}$,这样总的全反射琼斯矩阵为 $R_1 R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,这与光在均匀媒质中无损耗直线传播的情形一样,对 b, c 角处类似.当电流在传感头中心通过时,入射的线偏振光经 a, b, c 角的6次全反射,出射的仍是线偏振光,仅仅由于法拉第效应引起偏振面旋转.这正是构成电流传感头的理想情况.传感头的输出方程为

$$E_t = F(\phi_4)R_6R_5F(\phi_3)R_4R_3F(\phi_2)R_2R_1F(\phi_1)E_i \quad (4)$$

(4)式中 $F(\phi_n) = \begin{bmatrix} \cos\phi_n & \sin\phi_n \\ -\sin\phi_n & \cos\phi_n \end{bmatrix}$ 为第 n 个臂的法拉第旋转的琼斯矩阵, ϕ_n 为第 n 个臂的法拉第效应引起的偏振面旋转角.若把入射线偏振光的偏振方向取为 y 轴,其归一化的琼斯矢量 $E_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, (4)式可写成

$$\begin{bmatrix} E_{tx} \\ E_{ty} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi_4 & \sin\phi_4 \\ -\sin\phi_4 & \cos\phi_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi_3 & \sin\phi_3 \\ -\sin\phi_3 & \cos\phi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi_2 & \sin\phi_2 \\ -\sin\phi_2 & \cos\phi_2 \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi_1 & \sin\phi_1 \\ -\sin\phi_1 & \cos\phi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\phi \\ \cos\phi \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4. \quad (6)$$

当检偏器与起偏器的透射轴成 45° 时,检偏器的输出电场和光强分别为

$$E = \frac{E_{tx} + E_{ty}}{\sqrt{2}} = \frac{\sin\phi + \cos\phi}{\sqrt{2}}, \quad I = \frac{1}{2}(1 + \sin 2\phi). \quad (7)$$

由于 a 角中上下面全反射时 s 分量和 p 分量互换,使光在 I 臂中的线偏振方向相对于 I 臂中的线偏振方向旋转了 90° ,同例 III 臂相对于 II 臂,IV 臂相对于 III 臂光的线偏振方向都旋

转了 90°, 但 b 角中引起光的线偏振旋转方向与 a, c 角引起的旋转方向正好相反, 所以 IV 臂出射光的线偏振方向相对于入射到 I 臂中的线偏振方向旋转了 90°, 而且这个旋转不随入射光的偏振方向的变化而改变, 也与法拉第效应引起的偏振面旋转无关. 当起偏器与检偏器的透射轴成 45°角时, 检偏器输出光强为

$$I = \cos^2(90^\circ - 45^\circ + \phi) = \frac{1}{2}(1 + \sin 2\phi), \quad (8)$$

与(8)式相同. 其矢量关系如图 2 所示.

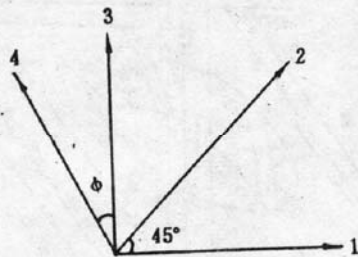


Fig. 2 Schematic diagram of the polarizing directions of the light

- 1— transmission direction of polarizer
- 2— transmission direction of analyzer
- 3 — polarization direction before Faraday rotated
- 4— polarization direction after Faraday rotated

3 实 验

实验系统如图 3 所示. 根据(8)式, 通过正比于光信号的光电探测器接收, 放大、交直流分离放大和除法器运算, 系统输出信号为

$$S = \sin 2\phi \approx 2\phi \quad (9)$$

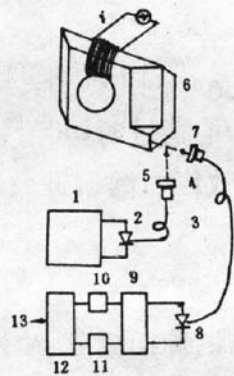


Fig. 3 Experimental setup for current sensor

- 1— LED driver, 2— LED, 3— fiber, 4— lens, 5 — polarizer, 6 — current sensor probe, 7 — analyser, 8 — PIN, 9 — preamplifier, 10 — AC amplifier, 11— DC amplifier, 12— divider, 13— output S

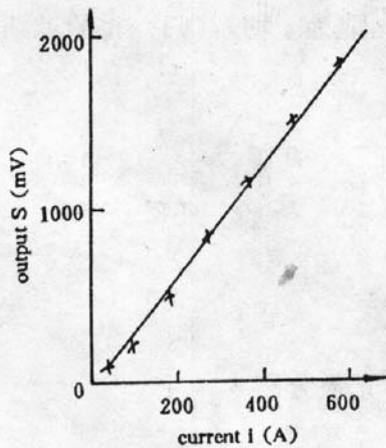


Fig. 4 Output character of current sensor

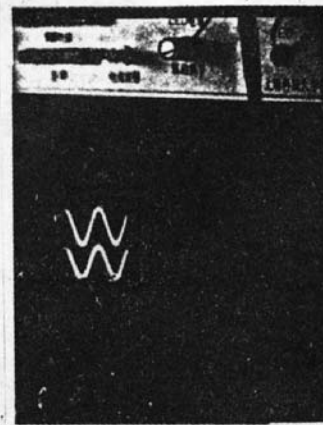


Fig. 5 Wave-shape of current sensor

实验在 II 臂上绕 42 匝通电导线, 通过传感头中心的等效电流与系统输出之间的关系如

图 4 所示,由除法器输出的信号用数字电压表读出该电流传感器的灵敏度为 3.25 mV/A,本实验仅在光路一臂上构成螺线管模拟测量其法拉第效应,若在传感头中心通过大电流的汇流排,该传感器一定具有更高的灵敏度,并用(1)式来计算旋转角.由图 4 还可以看出,本电流传感器具有很好的线性,输出波形亦无可见畸变,如图 5 所示,上面的波形为被测电流,下面的波形为传感器输出.

4 结 论

用块状四角 ZF-7 玻璃构成的双层光路电流传感头,既可以消除由于全反射引起的 p 分量和 s 分量之间的位相差,又可形成围绕载流导体的闭环光路,是构成实用化电流传感器的理想结构.但光学加工要求较高,光路长,光强损耗约 65%,制作传感器在技术上有一定难度.

参 考 文 献

- [1] B. J. Neyer, J. Chang, L. E. Ruggles, Calibrated faraday current and magnetic field sensor. *Proc. SPIE*, 1985, 566:201~205
- [2] M. Berwick, J. D. C Jones, D. A. Jackson, Alternating-current measurement and noninvasive date ring utilizing the Faraday effect in a closed-loop fiber magnetometer. *Opt. Lett.*, 1987, 12(4):293~295
- [3] H. S. Lassing, W. J. Mastop, A. F. G. Vander meer *et al.*, Plasma current measurement by Faraday rotation in a single-mode fiber. *Appl. Opt.*, 1987, 26(12):2456~2460
- [4] Peter R. Forman, Franz C. Jahoda, Linear birefringence effects on fiber-optic current sensor. *Appl. Opt.*, 1988, 27(15):3088~3096
- [5] 谷哲夫等, 光ファイバ电流,电压计. *National Technical Report*, 1983, 29(5):716~726
- [6] B. C. B. Chu, Y. N. Ning, D. A. Jackson, Triangular-shaped bulk optic glass Faraday current sensor. *Proc. SPIE International Symposium OE/Fibers '92 Fiber Optic Sensor*, Sep. 1992 P:19 (In Hynes convention center Boston, Massachusetts USA)
- [7] 宗伟勇,陈锡坤, 全反射对混合型光纤电流传感器测量灵敏度的影响. *光学学报*, 1991, 11(3):260~263

Study of the quadranglar bulk ZF-7 glass double layer optical path current sensor

CHEN Xikum QIU Jinghe DAI Laifa ZHU Qibiao

(Department of Physics, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201800)

(Received 4 February 1993; revised 29 March 1993)

Abstract

A bulk quadranglar double layer optical path current sensor is structured. It employed total internal reflection of linear polarized light in ZF-7 glass. This paper analysed the phase difference between p -component and s -component in total reflection. When two closer incident planes are perpendicular each other, the p -component and s -component of two total reflections exchange and their phase shifts are compensated each other. Her we also presented some experimental results.

Key words total reflection, current sensor, Faraday effect