

# 全反射对混合型光纤电流传感器 检测灵敏度的影响\*

宗伟勇

陈锡坤

(镇江船舶学院 物理系, 镇江 212001)

(上海科学技术大学 物理系, 上海 201800)

## 提 要

在利用法拉第(Faraday)效应的混合型光纤传感器中, 通常用全反射改变光的传递方向, 以增加有效光程, 并使结构紧凑。反射将改变光的偏振状态, 从而影响传感器的灵敏度。本文用琼斯(Jones)矩阵方法推导了有反射时传感头的传光特性, 分析了反射对检测灵敏度的影响, 获得了与实验一致的结果。

关键词: 混合型光纤电流传感器, 全反射, 琼斯矩阵。

## 一、导 言

用光纤传光、块状光学元件作敏感元件的混合型法拉第效应电流传感器, 由于其优越的温度稳定性已进入实际应用<sup>[1, 2]</sup>。在这类传感器中, 为提高灵敏度及使探头结构紧凑, 通常采用全反射改变光的传播方向<sup>[2, 3]</sup>。一种可能的结构如图1所示。由于全反射, 光在磁场中的路程为直通形式的两倍。由于不同偏振方向的光反射时产生的相位改变不同, 反射会改变光的偏振状态, 这个效应叠加在法拉第效应产生的旋转双折射上, 对传感器的灵敏度产生影响。本文从理论上分析了这种影响, 取得了与实验结果相一致的结论。

## 二、理论推导

以图1所示传感头为例。假定反射面的衰减与偏振方向无关, 则全反射的结果可看作平行入射面的偏振光与垂直入射面的偏振光之间出现一个相对的位相差 $\delta$ 。该反射性质可用琼斯(Jones)矩阵表示为

$$J_R = R \begin{pmatrix} \exp(i\delta/2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\delta/2) \end{pmatrix}, \quad \delta = \delta_{\parallel} - \delta_{\perp}, \quad (1)$$

式中 $R$ 为反射系数,  $\delta_{\parallel}$ 、 $\delta_{\perp}$ 分别为平行与垂直入射面的偏振光因二次反射导致的位相改变。由于法拉第效应, 导致图1中 $a \rightarrow b$ 及 $c \rightarrow d$ 传光特性的琼斯矩阵可表示为

$$J_F = \begin{pmatrix} \cos F & \sin F \\ -\sin F & \cos F \end{pmatrix}, \quad (2)$$

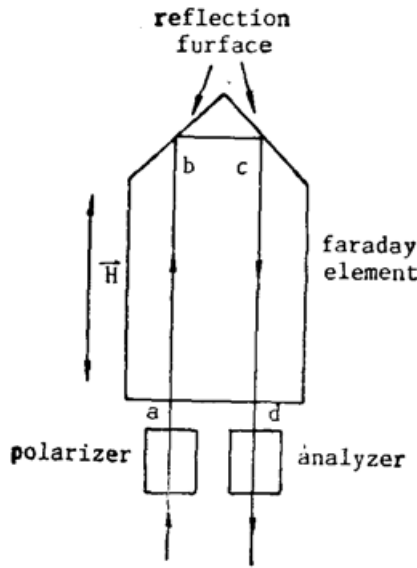


Fig. 1 Structure of a reflective sensor probe

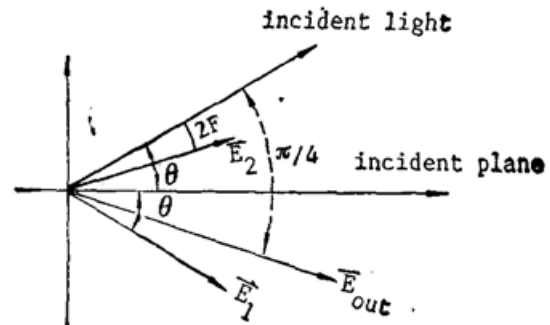


Fig. 2 Schematic diagram of the polarizing directions of the light

式中  $F = VHI$  为法拉第旋转角,  $V$  为材料的维特 (Verdet) 常数,  $l$  为  $a \rightarrow b$  及  $c \rightarrow d$  的光程。因为  $b \rightarrow c$  与  $H$  垂直, 不产生法拉第效应, 可将  $b, c$  两点的反射用一个反射矩阵 (1) 式表示, 其总相对位相差为  $\delta = 2\Delta$ ,  $\Delta$  为一次反射的相对位相差。于是探头从  $a \rightarrow d$  的总传光矩阵为

$$J = J_F J_R J_F \quad (3)$$

因为所考虑的是全反射, 所以  $R = 1$ 。这样

$$J = \begin{pmatrix} \cos F & \sin F \\ -\sin F & \cos F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \exp(i\delta/2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\delta/2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos F & \sin F \\ -\sin F & \cos F \end{pmatrix} \\ = i \sin \frac{\delta}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} + \cos \frac{\delta}{2} \begin{pmatrix} \cos 2F & \sin 2F \\ -\sin 2F & \cos 2F \end{pmatrix}, \quad (4)$$

由 (4) 式可以看到, 当一个偏振方向与入射面的夹角为  $\theta$  的单位强度线偏振光  $\begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}$  入射到探头时, 出射光由两部分组成。一部分为

$$E_1 = \begin{pmatrix} \cos \theta \\ -\sin \theta \end{pmatrix} i \sin \frac{\delta}{2}, \quad (5)$$

其偏振方向的改变为定值  $2\theta$ , 幅度为入射光的  $\sin(\delta/2)$ 。这部分不包含磁场的信息。另一部分为

$$E_2 = \cos \frac{\delta}{2} \begin{pmatrix} \cos(\theta - 2F) \\ \sin(\theta - 2F) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

偏振方向转过了  $2F$  角度, 幅度为入射光的  $\cos(\delta/2)$  这部分包含有磁场大小的信息。  $E_1$  与  $E_2$  之间有  $\pi/2$  的位相差。各部分的偏振方向之间的关系如图 2 所示。

在传感器中, 为使出射光强与  $F$  成线性关系及提高灵敏度, 检偏器的透射轴与入射线偏振光的偏振方向之间有  $\pi/4$  的夹角以提供偏置<sup>[3]</sup>, 故出射光矢量为

$$E_{out} = |E_1| \cos\left(2\theta - \frac{\pi}{4}\right) + |E_2| \cos\left(\frac{\pi}{4} - 2F\right)$$

$$= i \sin \frac{\delta}{2} \cos\left(2\theta - \frac{\pi}{4}\right) + \cos \frac{\delta}{2} \cos\left(\frac{\pi}{4} - 2F\right), \quad (7)$$

一般情况下,  $F$  很小, 于是得到出射光强  $P_{out}$  为

$$|P_{out}| = |E_{out}|^2 = \frac{1}{2} \left( 1 + \sin^2 \frac{\delta}{2} \sin 4\theta + \cos^2 \frac{\delta}{2} 4VlH \right). \quad (8)$$

由(8)式可以得到如下结论

(1) 当  $\cos^2(\delta/2) = 1$  即线偏振光的平行分量与垂直分量之间经反射后, 没有引入位相差, 这时灵敏度最高,  $(\Delta P/\Delta H) = 2Vl$ , 相当于有效光程增至  $2l$ ;

(2) 若反射时有相对位相差  $\delta$ , 灵敏度  $(\Delta P/\Delta H) = 2Vl \cos^2 \frac{\delta}{2}$  为最大灵敏度的  $\cos^2(\delta/2)$  倍, 其降低的程度由反射的特性决定。

(3) 改变入射光偏振方向与入射面的夹角  $\theta$  仅仅改变(不包含磁场信息的)本底光强。调节  $\theta$  可改变输出光中与  $H$  有关的光强的比例, 但不改变探头的绝对灵敏度。

### 三、理论与实验结果的比较

实验装置如图 3 所示。A、B 为两个用相同火石玻璃制成的法拉第元件, A 为反射式, 长度  $l' = 18 \text{ mm}$ , B 为直通式长度  $l = 34 \text{ mm}$ 。A 的一端磨成  $90^\circ$  角以提供全反射面。光发射二极管 LED 发出波长为  $0.85 \mu\text{m}$  光通过汤普逊(Thompson)棱镜  $P_1$  成为线偏振光, 分别入射到 A、B, 出射光经汤普逊棱镜  $P_2$  检偏后, 由光纤送入光电检测器。  $P_1$  与  $P_2$  的透射轴夹角为  $\pi/4$ , A、B 均置于螺线管产生的交变磁场中, 磁场方向如图 3 中所示。改变激励磁电流强度, 分别测出直通式和反射式输出交流电压值(正比于  $P_{out}$ ), 结果如图 4 所示。由图 4 可知, 直通式的灵敏度  $S_B = (\Delta u/\Delta I) = 0.86$ ; 反射式的灵敏度  $S_A = (\Delta u/\Delta I) = 0.37$ 。

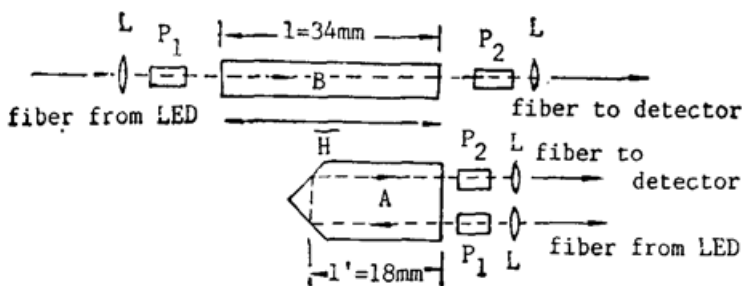


Fig. 3 Configuration of the experimental set-up.  $P_1, P_2$ —polarizers,  $L$ —lens, A, B—flints

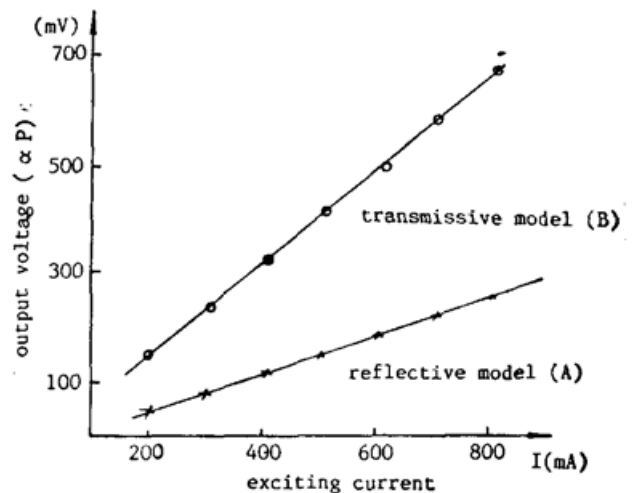


Fig. 4 Measured  $V/I$  character of the sensing probes

由于 A 探头的有效光程为  $2l' = 36 \text{ mm}$ , 而 B 探头长为  $34 \text{ mm}$ , 若 B 探头也以长度为  $36 \text{ mm}$  计算, 其灵敏度应为

$$S'_B = 0.86 \times \frac{36}{34} = 0.91, \quad (9)$$

所以反射式与直通式的灵敏度之比

$$S_A/S'_B = 0.37/0.91 = 0.40. \quad (10)$$

回到公式(8),  $(\Delta P/\Delta H) = 2Vl \cos^2(\delta/2)$ 。对于全内反射, 平行与垂直入射面的线偏振光一次反射后的相对位相差  $\Delta$  由下式给出<sup>[4]</sup>

$$\tan\left(\frac{\Delta}{2}\right) = \frac{\cos\phi \sqrt{\sin^2\phi - n_{21}^2}}{\sin^2\phi}. \quad (11)$$

(11)式中  $\phi$  为入射角,  $n_{21}$  为相对折射率, 实验所用的火石玻璃折射率约为 1.61( $\lambda=0.85 \mu\text{m}$ ), 与空气组成的全反射面  $n_{21} = (1/1.61)$ , 当入射角  $\phi = 45^\circ$  时, 由(11)式解得  $\Delta \approx 51^\circ$ 。两次全反射的总相对位相差为  $\delta = 2\Delta$ , 故有

$$\cos^2(\delta/2) = \cos^2\Delta = \cos^2 51^\circ = 0.39. \quad (12)$$

与实验结果(18)式基本一致。理论结果偏小可能是折射率不够精确所致。

### 参 考 文 献

- [1] Kazuo Kyama *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**, No. 10 (Oct), 1619~1623.
- [2] 谷内哲夫等; *Natioal Technical Report*, 1983, **29**, No. 5 (Oct), 716~726.
- [3] 陈锡坤等;《光学学报》, 1989, **9**, No. 9 (Oct), 860~864.
- [4] G. R. 福尔斯;《现代光学导论》, (上海科学技术出版社, 1980), 51~52.

## The effect of total reflection on sensitivity of hybrid current fiber sensors

ZONG WEIYONG

(Zhenjiang College of Ship Building, Zhenjiang 212001)

CHEN XIKUN

(Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201300)

(Received 13 July 1990; revised 19 September 1990)

### Abstract

In hybrid current fiber sensors operating on the Faraday effect, reflection is often used for changing the propagating direction of light to increase the effective optical path and to make the structure of the sensors compact. But the reflection changes the polarization of light, and consequently have an effect on the sensor's sensitivity. In this paper, Jones matrix method is used to derive the propagating characteristics of the sensor. The effect of reflection on sensor's sensitivity has been analysed and the results obtained agree with experimental data.

**Key words:** hybrid fiber current sensor. total internal reflection Jones matrix.