

# 单模光纤双折射特性测量研究

肖克波 · 周佐平

(华南理工大学物理系, 广东, 广州)

**摘要**——提出一种能测量单模光纤双折射参量的方法, 它的测量范围大、精度高、方法简便。建立了相应的测量系统, 在近红外波段进行了测量。

**关键词**——光纤, 双折射。

## 1. 引 言

单模光纤双折射特性参量主要包括线双折射系数、园双折射系数、偏振色散系数、双折射轴方位、光纤扭转率等, 这些参量的测量和研究对改进光纤特性, 促进光纤相干通信及传感器的发展有很重要的意义<sup>[1]</sup>。

测量这些参量的方法有好几种<sup>[2,3]</sup>, 但大部分方法只能测量线双折射系数, 而且没有考虑园双折射的影响, 误差较大, 测量范围有限, 而且设备和测量过程都比较复杂。本文提出一种方法, 它能测量上述几个参量, 而且测量范围大, 精度高、方法简便、特别是能测出线双折射系数及偏振色散与波长的关系。

## 2. 基本 原 理

对于单模光纤存在两个相互垂直的方向, 当单色线偏振光沿这两个方向入射时, 出射光也为线偏振光, 称这两个方向为固有极化方向(由于存在园双折射, 固有极化方向一般不平行于光纤的双折射轴)。引入一个  $X \sim Y$  坐标系, 它的坐标轴平行于光纤输入出口处两个固有极化方向, 由于一般单模光纤是衰减与极化无关的线性介质, 它的传输矩阵应为<sup>[4]</sup>:

$$T = \begin{pmatrix} \exp(i\gamma) \cos \theta & -\exp(-i\gamma) \sin \theta \\ \exp(i\gamma) \sin \theta & \exp(-i\gamma) \cos \theta \end{pmatrix}; \quad (1)$$

其中,  $2\gamma$  为两固有极化的相位延迟,  $\theta$  为输入出口处固有极化方向与输出出口处固有极化方向的夹角, 称为极化扭转角。

对人工双折射光纤, 它的谱线双折射和控制过程中产生的扭转引起园的双折射一般沿光纤是均匀的<sup>[5]</sup>, 根据这条件, 由光纤中的传输方程可推得光纤的传输矩阵<sup>[6]</sup>(它所对应的坐

标轴是固定在双折射轴上):

$$A = \begin{bmatrix} \cos \frac{\Delta\beta_{+-}L}{2} + i \frac{\eta}{c} \sin \frac{\Delta\beta_{+-}L}{2} & \frac{\Omega}{|\Omega|} \frac{1}{c} \sin \frac{\Delta\beta_{+-}L}{2} \\ -\frac{|\Omega|}{\Omega} \frac{1}{c} \sin \frac{\Delta\beta_{+-}L}{2} & \cos \frac{\Delta\beta_{+-}L}{2} - i \frac{\eta}{c} \sin \frac{\Delta\beta_{+-}L}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $\Omega$  为园双折射系数;

$$c = (1 + \eta^2)^{1/2}; \quad \eta = \frac{\Delta\beta}{2|\Omega|}; \quad \Delta\beta = \beta_e - \beta_o;$$

为线双折射系数,  $\beta_e$ 、 $\beta_o$  分别为没有园双折射时两个本征模的传输系数; 而

$$\Delta\beta_{+-} = \beta_+ - \beta_- = 2|\Omega|c,$$

$\beta_+$ 、 $\beta_-$  分别为有园双折射时两个本征模的传输系数;  $L$  为光纤长度.

式(1)、(2)分别是在两个不同坐标中推得的光纤传输矩阵.  $T$  是由固有极化参量描述的, 这些参量可直接测量, 而且测量方法简单, 所以本文采取先测量固有极化参量, 然后利用矩阵  $A$  和  $T$  推出的双折射与固有极化参量关系式来求得双折射参量. 但由这些关系式只能求出相对值, 所以本文再采用波长扫描的方法来确定其绝对值.

为了把矩阵  $T$  和  $A$  统一表示在一个坐标系中, 引入一个新坐标系  $X' \sim Y'$ , 它的坐标轴平行于入口处光纤的双折射轴, 则在  $X' \sim Y'$  中传输矩阵  $A$  变为

$$A' = \begin{bmatrix} \cos \tau L & -\sin \tau L \\ \sin \tau L & \cos \tau L \end{bmatrix} A; \quad (3)$$

其中,  $\tau$  为光纤扭转率. 设  $X' \sim Y'$  与固有坐标系  $X \sim Y$  有夹角  $\psi$ , 则矩阵  $A'$  与矩阵  $T$  有下列关系:

$$A' = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} T \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}; \quad (4)$$

把式(1)、(3)代入式(4), 并比较等式两边各项得:

$$|\sin \gamma| = \frac{\eta}{c} \left| \sin \frac{\Delta\beta_{+-}L}{2} \right|, \quad (5)$$

$$\frac{1}{|\eta|} = |\cot \gamma| |\sin(\theta_0 - \theta)|; \quad (6)$$

$$\tan \tau L = \tan(2\psi + \theta); \quad (7)$$

由此有:

$$\tau L = 2\psi + \theta \pm k\pi; \quad (8)$$

当  $\gamma = k\pi$  时, 有

$$\tan \tau L = \tan \theta; \quad (9)$$

即

$$\tau L = k\pi + \theta. \quad (10)$$

利用上面几个关系式可以得到要测量的几个量的规律:

(1) 光纤扭转率

由式(9)得知, 当  $\gamma = k\pi$  时,

$$\tau L = k\pi + \theta;$$

令  $\theta$  为  $\theta_0$ , 则有

$$\tau L = \pm k\pi + \theta_0.$$

把光纤切去一小段  $\Delta L$  (约几 cm), 再测一次得  $\theta'_0$ , 则有

$$\tau \Delta L = \theta_0 - \theta'_0;$$

这时扭转率

$$\tau = \frac{\theta_0 - \theta'_0}{\Delta L}. \quad (11)$$

$\theta_0$  及  $\theta'_0$  的测量是通过改变入射光的波长来获得, 则本征相位延迟也随之变化, 当相位延迟为  $2k\pi$  时, 即  $\gamma = k\pi$  时, 所测为  $\theta_0$ .

(2) 在入射处光纤双折射轴方位角  $\phi$

设在输入处测得的固有极化的方位角为  $\varphi$  (相对实验室坐标) 时, 测出相应极化扭转角为  $\theta$ , 则

$$\phi = \varphi - \frac{\theta_0 - \theta}{2}. \quad (12)$$

(3) 线双折射系数  $\Delta\beta$  和圆双折射系数  $\Omega$

把各系数  $c$ 、 $\eta$ 、 $\Delta\beta_{+-}$  的表达式代入式(5)可得

$$|\sin\gamma| = \frac{\left| \frac{\Delta\beta}{2\Omega} \right|}{\sqrt{1 + \frac{\Delta\beta^2}{4\Omega^2}}} \left| \sin \frac{\sqrt{\Delta\beta^2 + 4\Omega^2}}{2} L \right|; \quad (13)$$

(i) 当  $\Delta\beta \gg \Omega$  时 (即高双折射时)

有  $|\eta/c| \simeq 1$ , 因而  $\Delta\beta_{+-} \simeq \Delta\beta$ ;

所以,

$$\Delta\beta \simeq \frac{2(k_1\pi \pm \gamma)}{L} = \frac{2k_1\pi \pm 2\gamma}{L}. \quad (14)$$

$\gamma$  可用补偿法测得<sup>[7]</sup>, 设消光时补偿器的补偿量为  $\delta$ , 则应有

$$2\gamma = 2k_2\pi \pm \delta.$$

所以,

$$\Delta\beta = \frac{2k\pi \pm \delta}{L} \quad (15)$$

由于随波长增大  $\Delta\beta$  应减少, 所以, 当  $\delta$  随波长增大而减少时上式中取正号, 反之取负号.

到此为止只能测出  $\Delta\beta$  的相对值. 由于  $k$  是未知的, 本文采取波长扫描的方法, 在相邻两波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  下测出对应补偿量  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ , 由

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\Delta n}{\lambda}$$

及式(15), 考虑到两波长相差很小, 折射率差  $\Delta n$ , 可看作常数, 得:

$$k = \left| \frac{\delta_1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \delta_2}{2\pi \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} - 1 \right)} \right| = \left| \frac{\delta_1 \lambda_1 - \delta_2 \lambda_2}{2\pi \Delta \lambda} \right|; \quad (16)$$

这样, 通过波长扫描的方法可测出  $\Delta\beta \sim \lambda$  的关系.

(ii) 当  $\Omega$  并不比  $\Delta\beta$  小很多时, 须由式(6)求出

$$\eta = \frac{\Delta\beta}{2|\Omega|},$$

然后由式(5)求得

$$\Delta\beta_{\pm}L = 2k\pi \pm 2\arcsin\left[\frac{c}{\eta} \sin\gamma\right],$$

令

$$\phi' = \arcsin\left[\frac{c}{\eta} \sin\gamma\right];$$

则

$$\Delta\beta_{\pm}L = 2k\pi \pm 2\phi',$$

$$\Delta\beta \sqrt{1 + \frac{1}{\eta^2}} \cdot L = 2k\pi \pm 2\phi';$$

即

$$\Delta\beta = \frac{2k\pi \pm 2\phi'}{\sqrt{1 + \frac{1}{\eta^2}} \cdot L}, \quad (17)$$

同理, 正负号的选择由波长变化情况来确定, 确定  $k$  的波长扫描法和上述相同。

由上面结果, 圆双折射系数也可求得,

$$\Omega = \frac{\Delta\beta}{2|\eta|}. \quad (18)$$

(4) 偏振色散系数  $\tau_g$

$$\tau_g = \frac{1}{c} \frac{d(\Delta\beta)}{dk} = \frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d(\Delta\beta)}{d\lambda} \quad (19)$$

根据上述方法先测得  $\Delta\beta$  与波长  $\lambda$  的关系, 然后由式(19)即可求得偏振色散。

### 3. 测量系统与实验结果

测量系统如图 1 所示。

根据波长扫描的要求, 光源在一定范围内连续可调, 而且精度高, 单色性好。因而本系

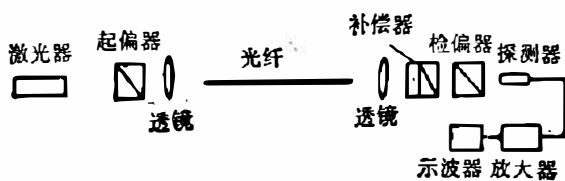


图 1 测量系统

Fig. 1 Measurement system

统选用 YAG 作泵浦的色心脉冲激光器, 它在近红外波长  $1.1 \sim 1.12 \mu\text{m}$  范围内连续可调, 最小刻度为  $0.4 \text{ nm}$ , 带宽为  $0.2 \text{ nm}$ , 重复频率有 1 次/秒、2 次/秒、5 次/秒三档, 脉宽  $20 \text{ ns}$ , 脉冲能量约  $2 \text{ mJ}$ . 探测器采用 GDB-204 型光电倍增管, 用示波器显示。先取去补偿器, 转动起偏器和检偏器的偏振方向直至消光,

这时起偏器和检偏器的偏振方向分别为光纤输出口和输入口处固有极化方向。然后放上补偿器使其双折射轴与固有极化方向平行, 把起偏器、检偏器向同一方向转动  $45^\circ$ , 调节补偿器直至重新消光。设这时补偿器的补偿量为  $\delta$ , 则有

$$2\gamma = 2k\pi \pm \delta.$$

我们用上述测量系统对 M9-87-01 号熊猫型光纤进行测量, 光纤的截止波长为  $1.15 \mu\text{m}$ , 测量结果如下。

#### 3.1 光纤输入口双折射轴方位及光纤固有扭转的测量

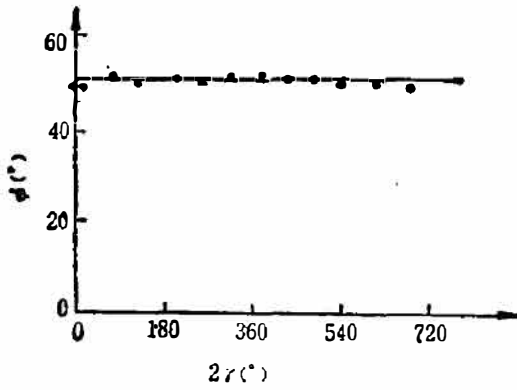


图 2 在不同相位延迟测得的光纤入口双折射轴方位角

Fig. 2 The azimuth of the birefringence axis at input end of the fiber measured at different phase delay.

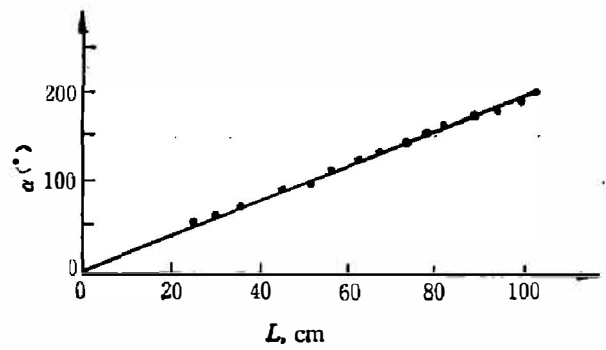


图 3 双折射轴扭转角随长度的变化

Fig. 3 Rotation angle of birefringence axis versus length along the fiber.

图 2 是通过改变波长,在不同固有极化相位延迟下测得的光纤输入处双折射轴方位,由图可见,除  $2\gamma=2k\pi$  附近外所测得的  $\phi$  基本上为恒定值,且与用宽带光源法测得的结果一致<sup>[5]</sup>. 在  $2\gamma=2k\pi$  处产生的误差是因为当  $2\gamma=2k\pi$  时  $\sin \gamma=0$ , 这时式(8)已不成立,当然式(12)也不成立,因此不应在  $2\gamma=2k\pi$  时测量  $\phi$ .

把光纤分段切去,测得沿光纤各处双折射轴扭转角  $\alpha$ , 由图 3 可知扭转沿光纤基本上是均匀的,这结果与文献[5]提出的方法所得结果相同.

**3.2 线双折射系数  $\Delta\beta$  和园双折射系数  $\Omega$  的测量**

图 4 是实验和计算所得线双折射系数随波数的变化, 由图可见  $\Delta\beta$  与  $\gamma$  基本成线性关系. 被测的光纤属压感型光纤, 所以, 这结果和理论及前人的一些测量结果相符<sup>[8]</sup>.

利用上面结果还可得到园双折射系数为  $\Omega=130^\circ/m$ .

本系统对拍长  $L_b$  在  $0.73\text{ mm} < L_b < 0.8\text{ m}$  范围的光纤, 测量误差小于 10%.

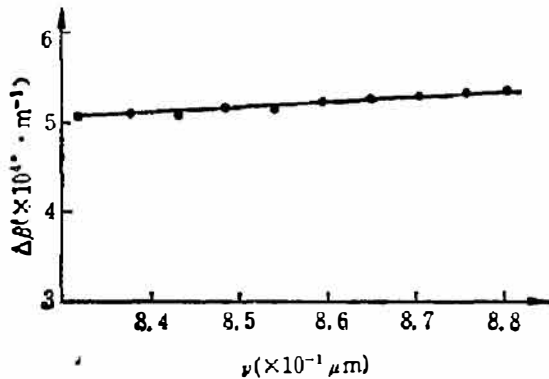


图 4 线双折射系数随波长的变化

Fig. 4 Wavelength dependence of linear birefringence coefficient.

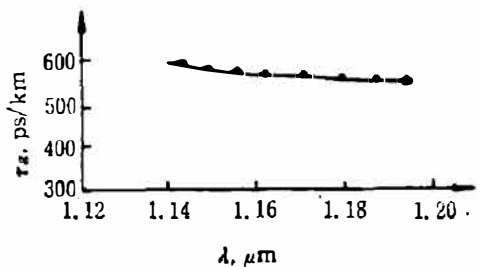


图 5 偏振色散随波长的变化

Fig. 5 Wavelength dependence of polarization dispersion.

**3.3 偏振色散的测量**

测量和计算结果见图 5, 被测光纤是压感型光纤, 偏振色散随波长变化较小, 测量结果与文献[9]的结果基本相符. 偏振色散在  $2.25 \times 10^{-3}\text{ PS/m} < \tau_p < 4.6\text{ PS/m}$  范围内本系统测量误差小于 10%, 可见测量范围是比较大的.

## 4. 结 论

通过对单模光纤偏振特性的研究,本文提出了新的测量方法,它是通过易测的光纤固有极化模的几个特征量,并利用波长扫描的方法,由推得的公式求出输入口处双折射轴的方位,双折射轴的扭转率、圆双折射系数、线双折射系数与波长的关系;并从这关系求取偏振色散系数,能同时测量如此多个参数是本方法的主要特点,它的优点还在于可测出双折射与波长关系以及偏振色散,这是一般双折射测量方法所不能做到的。

由于这一方法要把光纤切去一小段后再进行测量,所以对被测体是带有破坏性的,这是本方法的不足之处,但实验证明对光纤的研制影响不大。根据此方法建立了相应的测量系统,并对实际光纤进行了测量,所得结果与一些文献所得结果相符,这说明本文提出的方法和测量系统是可行的,这对研究单模光纤的偏振特性提供了一个很有用的手段。

## 参 考 文 献

- [1] Ivamp Kaminow, *IEEE Journal of Quantum Electronic* **17** (1981), 15.
- [2] Simon A. and Ulrich K., *Appl. Phys. Lett.* **31** (1977), 517.
- [3] Chinone N. and Ulrich K., *Opt. Lett.*, **6** (1981), 16.
- [4] Shagyuan Huang and Zongqi Lin, *Appl. Opt.*, **24**(1985), 2355.
- [5] Marrone M. J. et al., *Opt. Lett.*, **12** (1987), 60.
- [6] Monerie M. and Jeunhomme L., *Opt. Quant. Elect.*, **12** (1980), **12** (1980), 449.
- [7] 周佐平,章小民, *光学技术*, **57** (1986), 26.
- [8] Reshcish S. C., *Opt. Lett.*, **7** (1982), 294.
- [9] Katsiunari Okamoto et al., *Opt. Lett.*, **7** (1982), 569.

## MEASUREMENT AND INVESTIGATION OF BIREFRINGENCE PROPERTIES OF SINGLE-MODE FIBER

XIAO KEBO, ZHOU ZUOPING

(Department of Physics, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong, China)

### ABSTRACT

A new method to measure the birefringence parameters of the single-mode fiber is proposed. Compared with preceding methods, this one has the following advantages: all the main birefringence parameters of fibers are able to be measured in this system, the range of measurement is large, the result of measurement is accurate, the method is simple. Moreover, a corresponding measurement system is set up and the measurement is made in the near infrared band.