

# 单模光纤双折射率测试的解析方法

廖延彪 潘安培 吕 玫 秦小蓉  
(清华大学无线电系)

## 提 要

本文报道利用 $\lambda/4$ 波板和偏振分析器测量单模光纤双折射率的一种方法。与已有方法比较我们选择了较方便的可测量,并推导了双折射相位延迟与可测量之间的解析公式。本方法也可用于类似条件的光学测试中。

## 一、引 言

随着光纤技术的发展,单模光纤的偏振特性越来越受到人们的重视。无论是光纤制造过程还是许多实际应用,如光纤电流传感器,光纤干涉仪都需要了解光纤的双折射性能。因此测量光纤的双折射相位延迟成为十分重要的技术。与传统的光学测试技术比较,光纤的双折射率测试有它的特殊性,它的芯径较细,双折射主轴难以预先准确测定,双折射特性容易受外界环境的干扰。已有文献报道了一些测试方法<sup>[1]</sup>。基本原理是利用偏振元件和 $\frac{\lambda}{4}$ 波板分析光纤出射端的椭圆偏振光,求解双折射相位延迟 $\delta$ 。该方法中,测试程序和数据处理比较复杂。本文报道一种更为简单、并适用于多种情况的方法。它无需预先确定光纤双折射主轴,选择了较为合理的可测量,推导了 $\delta$ 与可测量之间的解析公式,使测试过程和数据处理大为简化。根据解析公式,可以较方便地分析测量误差。本方法也适用于类似条件的光学测量。

## 二、测量装置和公式推导

### 1. 测量装置

实验装置如图1所示。He-Ne激光经起偏器 $P_1$ 后变为线偏振光,再经显微物镜耦合到光纤中去。一般情况下光纤另一端的出射光将是椭圆偏振光。利用 $\frac{\lambda}{4}$ 波板可将椭圆偏振光变为线偏振光。检偏器 $P_2$ ,光电接收器用来分析椭圆偏振光并测量线偏振光的偏振方位。

### 2. 公式推导

一般情况下,光纤中存在着不同的双折射,但是其中线双折射占主导地位;圆双折射(即旋光效应)比较弱,本文将略去它。我们确定以下直角坐标系: $OZ$ 为光束传播方向, $OX$ 、 $OY$

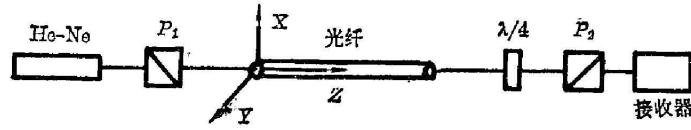


图1 实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus

为光纤双折射主轴,  $\theta$  为入射光的偏振方位与  $OX$  轴的夹角,  $E_0$  为入射光的振幅, 则出射光可用 Jones 矩阵表示为:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{i\frac{\delta}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\delta}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} E_{00} \quad (1)$$

上式中时间因子被略去, 这对以下分析无关紧要。假如出射椭圆偏振光的长短轴电场分量分别为  $E_1$  和  $E_2$ , 长轴与  $OX$  轴夹角为  $\phi$ , 则

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

定义以下偏振参量:

$$P = \frac{E_1^2 - E_2^2}{E_1^2 + E_2^2} \quad (3)$$

经过适当的数学运算后, 可以获得以下两式<sup>[1, 2]</sup>

$$\operatorname{tg} 2\phi = \operatorname{tg} 2\theta \cos \delta, \quad (4)$$

$$P = (\cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cos^2 \delta)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

当  $\frac{\lambda}{4}$  波板光轴与椭圆长轴平行时, 椭圆偏振光变为线偏振光。设偏振方位与椭圆长轴夹角为  $\xi$ , 则

$$E_1 = E_0 \cos \xi, \quad (6)$$

$$E_2 = E_0 \sin \xi, \quad (7)$$

$$P = \cos 2\xi \quad (8)$$

现在我们获得以下方程组:

$$\begin{cases} \operatorname{tg} 2\phi = \operatorname{tg} 2\theta \cos \delta, \\ P^2 = \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cos^2 \delta, \\ P = \cos 2\xi. \end{cases} \quad (9)$$

对于任意一根待测光纤,  $\theta$  和  $\phi$  都是难以直接测量的量, 尤其对于低双折射光纤, 因为我们难以预先精确地确定光纤的双折射主轴。因此我们必须寻找其它较方便的可测量以及它们与  $\delta$  的关系。

实验中, 比较容易直接确定的量有入射光的偏振方位  $\alpha_1$ , 经光纤后椭圆偏振光的长轴方位  $\alpha_2$  和经  $\frac{\lambda}{4}$  波片后出射线偏光的偏振方位  $\alpha_3$ 。从这三个方位角可以立即得到  $\xi$  及  $\phi - \theta$ :

$$\xi = \alpha_3 - \alpha_2, \quad (10)$$

$$\phi - \theta = \alpha_2 - \alpha_1 \quad (11)$$

以下将证明,待测量  $\delta$  和可测量  $\xi$ ,  $\phi - \theta$  之间存在着解析关系。

$$\text{设} \quad x = \operatorname{tg} 2\theta, \quad (12)$$

$$y = \operatorname{tg} 2\phi, \quad (13)$$

$$c = \operatorname{tg} 2(\phi - \theta). \quad (14)$$

利用三角函数变换可将方程组化为以下代数方程:

$$(1+x^2)P^2 = 1+x^2 \cos^2 \delta, \quad (15)$$

$$y = x \cos \delta, \quad (16)$$

$$c + cxy = y - x. \quad (17)$$

以上三个独立的代数方程中,只有  $\cos \delta$ ,  $x$ ,  $y$  三个未知量,可以解得:

$$\cos \delta = \frac{P \cos 2(\phi - \theta) - P^2}{1 - P \cos 2(\phi - \theta)}. \quad (18)$$

上式就是我们要求的可测量  $\phi - \theta$ ,  $\xi$  与待测量  $\delta$  之间的解析关系。

多数情况下,我们对光纤双折射主轴的精确方位不必求出,也不必指出那一个轴是快轴或慢轴。因而总有  $\theta \leq 45^\circ$ 。公式(18)原则上适用任意  $\delta$  角的测试。

### 3. $\delta$ 的多值问题及误差分析

$\cos \delta$  的值确定后,我们只能得到  $\arccos$  函数的主值。然而  $\delta' = \delta \pm 2n\pi$  都是可能的解。判断  $n$  值较为方便的方法是测量不同长度的光纤  $l_1$ 、 $l_2$ , 并考虑到合理化条件。同一条件下生产出的单模光纤长度应大致成线性关系,即  $\delta'_1/\delta'_2 = l_1/l_2$ 。作为样品测试,我们可以从样品类型获取合理的样品长度,这样  $\delta$  的多值问题可以较快地解决。

利用(18)式可对  $\delta$  进行误差分析。对(18)式两边微分可得:

$$\Delta \delta = \Delta \delta_1 + \Delta \delta_2, \quad (19)$$

其中

$$\Delta \delta_1 = \frac{2P \sin 2(\phi - \theta) (1 + \cos \delta)}{[1 - P \cos 2(\phi - \theta)] \sin \delta} \Delta(\phi - \theta), \quad (20)$$

$$\Delta \delta_2 = \frac{2[2P - \cos 2(\phi - \theta)] \cdot (1 + \cos \delta) \sin 2\xi}{[1 - P \cos 2(\phi - \theta)] \cdot \sin \delta} \Delta \xi. \quad (21)$$

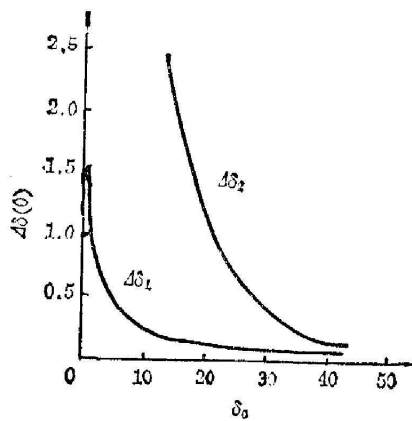


图2 当  $\theta = 30^\circ$ ,  $\Delta(\phi - \theta) = \Delta \xi = 1'$  时,  $\Delta \delta_1$ 、 $\Delta \delta_2$  随  $\delta$  小变化

Fig. 2 Error versus  $\delta$  when  $\theta = 30^\circ$ ,  $\Delta(\phi - \theta) = \Delta \xi = 1'$

以上三式中  $\Delta \delta_1$  是由  $\Delta(\phi - \theta)$  引起的误差,  $\Delta \delta_2$  是  $\Delta \xi$  引起的误差。图2表示入射光偏振方位角  $\theta$  固定,  $\Delta(\phi - \theta) = \Delta \xi = 1'$  时  $\Delta \delta_1$ ,  $\Delta \delta_2$  随  $\delta$  的变化, 结果表明  $\delta$  较小时, 尤其是  $\Delta \delta < 10^\circ$  时误差较大。图3是  $\delta$  值固定,  $\Delta(\phi - \theta) = \Delta \xi = 1'$  时  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  随  $\theta$  的变化关系。结果表明, 当  $\theta$  较小时误差较大。在极端条件下,  $\theta = 0^\circ$  时双折射测试将无法进行, 因为这时出射光仍是线偏振光。图3还表明, 当  $\theta = 45^\circ$  时  $\Delta \delta_1$ ,  $\Delta \delta_2$  都处于极小位置。可以认为通常情况下这是最佳测试位置, 但是当  $\delta = \frac{\pi}{2}$  时是例外。图4是  $\delta = 45^\circ$ ,  $\theta = 30^\circ$

时,  $\Delta \delta$  与  $\Delta(\phi - \theta)$  和  $\Delta \xi$  (假定  $\Delta(\phi - \theta) = \Delta \xi$ ) 的关系。它告诉我们, 一定的  $\Delta \delta$  所允许的最大测角误差。

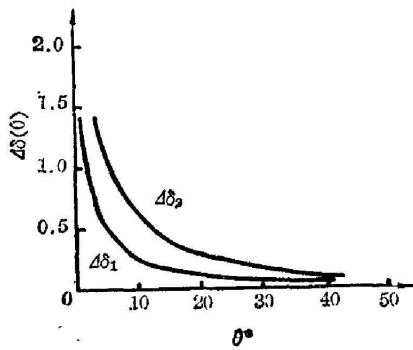


图 3 当  $\delta=45^\circ$ ,  $\Delta(\phi-\theta)=\Delta\xi=1'$  时,  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  随  $\theta$  的变化

Fig. 3 Error versus  $\theta$  when  $\delta=45^\circ$ ,  $\Delta(\phi-\theta)=\Delta\xi=1'$

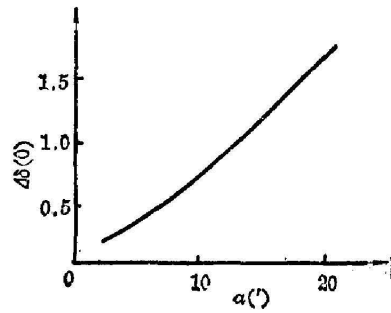


图 4 当  $\theta=45^\circ$ ,  $\delta$  为定值时,  $\Delta\delta$  与  $\Delta(\phi-\theta)$  和  $\Delta\xi$  的关系

Fig. 4  $\Delta\delta$  versus  $\Delta\alpha$  when  $\delta=45^\circ$ ,  $\theta=30^\circ$  ( $\Delta\alpha$  represents  $\Delta(\phi-\theta)$  and  $\Delta\xi$ )

### 三、实验结果

利用图 1 所示装置我们对一些光纤样品进行测试, 测试前需对光纤样品的端面进行仔细的处理并使光纤处于自由状态, 以防止应力引起的双折射干扰测试。测出三个方位角  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  后, 将三个数据输入到一个袖珍可编程序计算器, 数秒钟内即可获得结果。以下是一组低双折射光纤的测试结果:

光纤长度(cm)	双折射相位延迟( $^\circ$ )	每米双折射相位延迟( $^\circ$ )
27.5	11.4	41.4
40.0	18.6	46.5
55.5	25.1	45.3

实验表明,  $\delta$  与光纤长度基本上成线性关系。当光纤较短,  $\delta < 10^\circ$  时, 测量数据的重复性比较差, 当  $\delta > 20^\circ$  时, 测量数据的重复性很好, 这些实验现象与理论分析基本一致。

参加本工作的还有吴庚生等同志。

### 参 考 文 献

- [1] A. M. Smith; *J. Phys. E: Sci, Instrum.*, 1979, 12, No. 10, 927.  
 [2] M. Born, E. Wolf; *«Principles of Optics»*, (Pergamon Press, 1975 Fifth Edition), 25.

## **An analytical method for measuring birefringence properties of single mode fiber**

LIAO YANBIAS PAN ANPEI LEE MEI AND QIN XIAORONG

*(Department of Radio Electronics, Qinghua University)*

(Received 14 May 1984; revised 20 July 1984)

### **Abstract**

A simple method for polarization measurement using a quarter-wave plate and an analyzer has been described in this paper. In the experiments a more convenient set of measurable quantities was chosen and an analytical solution from a set of equations which are for determining linear retardation in fiber was obtained. Using this solution the measurements and calculations become quite simple. The measurement errors can be determined from this explicit formula also.