

移动侧向压力法测量高圆双折射光纤*

董小鹏 钱景仁

(中国科技大学无线电电子学系, 合肥 230027)

摘 要 对扭转高圆双折射光纤中光的偏振态变化作了分析, 提出用移动侧向变压力法测量高圆双折射光纤中的圆双折射, 并在实验上用这种方法对扭转光纤首次作了测量。得到的测量结果与计算值(在已知光纤扭转率下)相对误差在 2.4% 之内。这一方法为高圆双折射光纤的无损检测提供了另一途径。

关键词 双折射, 偏振, 光学纤维, 光纤测量。

1 引 言

在众多的特种光纤中, 高圆双折射光纤有其独特的性能和应用背景。所谓高圆双折射光纤是指圆双折射占主导地位的光纤。光纤中的圆双折射可通过扭转^[1]、在光纤轴向加磁场、制作螺旋纤芯结构^[2]等几种方法获得。而加纵向磁场法要求的磁场强度大, 很少采用。实际中圆双折射光纤可用扭转法或使纤芯为螺旋结构法制作。这两种方法各有其优、缺点。螺旋芯光纤的圆双折射一般比扭转光纤的圆双折射大。不足之处是由于纤芯离光纤中心轴线有一定距离(约几十微米), 且与光纤端面成一定夹角, 光耦合困难。另外, 光纤制作工艺要求高, 不易制作。为此本文选择用扭转法制作高圆双折射光纤。

高圆双折射光纤制成后, 其中圆双折射量的大小以及其沿长度方向的均匀性, 需要通过测量得到。已往有大量关于光纤线双折射测量的报道^[3~6], 但测量高圆双折射光纤中的圆双折射, 还未有报道。为解决这一问题, 作者通过分析偏振光在光纤中传输过程偏振态变化的情况, 提出用移动侧向压力法测量光纤中的圆双折射, 测量结果证明了这一方法的可行性。

2 各向异性光纤中偏振态的演化

如果光纤中存在双折射, 输入光的偏振态沿光纤传输时会发生变化。设一根具有均匀线双折射 $\Delta\beta$ 的单模光纤, 其快、慢轴分别对应固定坐标系的 Y, X 轴, 以速率 τ 发生扭转, 如图 1 所示。图中 (X', Y') 是随线双折射轴旋转的坐标系, 在 $Z = 0$ 端与 (X, Y) 坐标系重合。这时输入、输出这根光纤的偏振态可由以下矩阵表示^[8]:

* 国家自然科学基金委青年科学基金资助项目。

收稿日期: 1993年12月16日

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ -B & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(0) \\ E_y(0) \end{bmatrix} \quad (1)$$

注意上式是在旋转坐标系中表示的, 其矩阵系数为:

$$\begin{aligned} A &= \cos(PL) - j(\Delta\beta/2P) \sin(PL), \\ B &= [(2\tau - g\tau)/2P] \sin(PL), \\ P &= [(\Delta\beta/2)^2 + (\tau - g\tau/2)^2]^{1/2}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 L 为光纤长度, g 为一个常数, 与光纤材料有关, 反映扭转引入的圆双折射量^[1]。 g 可由实验测得。

对普通的单模光纤(非高双折射光纤), 线双折射对应的拍长一般在几十厘米至十几米(或更高), 因此对光纤一定程度的扭转可使扭转率 τ 满足:

$$2\tau \gg \Delta\beta \quad (3)$$

例如, 一般光纤可承受小于 50 c/m 的扭转(某些高强度光纤可承受大于 100 c/m 的扭转), 对于拍长为 20 cm 的单模光纤, $\Delta\beta = 10\pi$ rad/m, 30 c/m 的扭转率(对应 $2\tau = 120\pi$ rad/m)已基本能满足(3)式。这时(1)式可简化为:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\tau - g\tau/2)L & \sin(\tau - g\tau/2)L \\ -\sin(\tau - g\tau/2)L & \cos(\tau - g\tau/2)L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(0) \\ E_y(0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

在固定坐标系(X, Y)中表示, 即是:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(g\tau/2)L & -\sin(g\tau/2)L \\ \sin(g\tau/2)L & \cos(g\tau/2)L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(0) \\ E_y(0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 $E_x(0) = E_x(0)$, $E_y(0) = E_y(0)$ 。(5)式表明, 光纤中的线双折射对偏振态已几乎没有影响, 光纤呈圆双折射特性, 它能使输入线偏振光的偏振方向在固定坐标系中旋转 $g\tau L/2$ 角度。其中

$$\Delta\beta_c = g\tau \quad (6)$$

是扭转引入的圆双折射。由于光纤中线双折射对偏振态的影响被抑制, 当光纤输入线偏振光时沿光纤各点偏振态的消光比将基本保持不变, 但偏振方向随传输距离旋转。偏振方向旋转 180° 经过的光纤长度便是光纤圆双折射对应的拍长 L_c , 它等于:

$$L_c = 2\pi/\Delta\beta_c \quad (7)$$

因此从定义出发, 可通过测量线偏振光偏振方向在高圆双折射光纤中经过一定距离旋转过的角度, 来得到光纤中的圆双折射。测量线偏振光偏振方向在光纤中的变化, 从非破坏性检测角度出发, 本文提出用移动侧向压力法, 即沿光纤移动一个可变的侧向压力, 同时观察、记录输出端偏振态的变化, 来测量光纤中的圆双折射。移动侧向压力法在光纤中的线双折射测量中有过应用^[4], 但测量原理与本文不同。本文所用测量原理如下: 在光纤的输入端输入一个任意方向的线偏振光, 然后沿光纤在侧向施加压力。当光纤受到足够大的侧向压力时, 将引起线双折射, 线双折射轴分别与加压方向平行或垂直。若进入加压段光纤的偏振方向与线双折射轴有一夹角, 则经过该段光纤后光的偏振态将发生变化。若进入该段光纤光的偏振方向恰好与线双折射轴方向一致, 压力的变化对偏振态的影响将很小(设光纤受压段很小, 实际实验中光纤受压段小于 0.5 mm)。这样可以通过测量沿光纤各点加压时, 输出端偏振态随

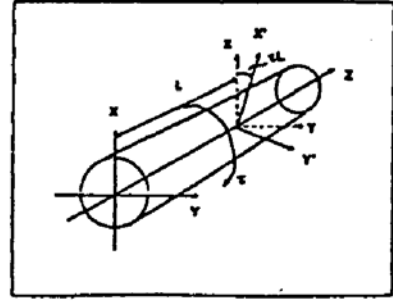


Fig. 1 The rotation coordinate and laboratory coordinate of the twisted fibre

压力的变化情况，得到相邻压力最不敏感两点(对应光纤中光的偏振方向相差 90°)间的距离，从而计算出光纤的拍长和圆双折射。

3 测量装置与结果

实验装置如图 2 所示。所用的光源是 632.8 nm 波长的 He-Ne 激光。光经起偏器 P 起偏后，透镜 L₁ 将偏振光耦合到被测光纤中。光纤的两端分别用胶固定在微调架 M 及转盘 R 上，转盘的作用是对光纤施加扭转。安装时要尽量避免对光纤引入线双折射。光纤输出的光经透镜 L₂ 准直后通过检偏器 A，然后进入 Si-PIN 探测器 D，功率计 PM 可读出探测器接收到的光功率值。起偏器 P 与检偏器 A 都安装在有角刻度的转盘上，以便读出棱镜旋转的角度。实验中使用的光纤芯径 ≈ 4 μm，λ_c = 0.55 μm。光纤总长 85.5 cm，扭转部分长度 81 cm。

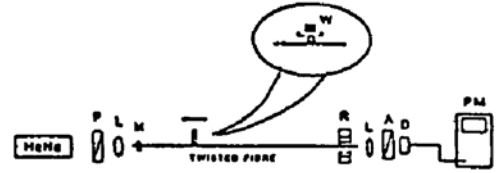


Fig. 2 Schematic of the measurement system for the circular birefringence in the twisted fibre, using the moving lateral force method

图 3 是光纤扭转前平直放置时输出端偏振光的消光比随输入端线偏振光偏振方向变化的曲线。消光比的定义为：

$$\eta(\text{dB}) = -10 \log (P_{\min} / P_{\max}) \tag{8}$$

其中 P_{max}、P_{min} 分别为旋转检偏器时探测器接收到的最大和最小光功率。从图 3 中曲线可以看出，扭转前光纤存在固有的线双折射，它对入射线偏振光偏振态的影响还是比较明显的。图 4 是用旋转装置 R 将这一长度的光纤旋转 8 圈(对应 τ = 62.1 rad/m)后，再测量得到的输出光消光比与检偏器最小点 P_{min} 位置 θ₂ 随输入线偏振光偏振方向 θ₁ 变化的曲线。起偏器(θ₁) 在空间旋转了 90°。图中 θ₂ 的角度值是直接从转盘上的刻度读出的。与图 3 相比，62.1 rad/m 的扭转率已大大抑制了光纤原有线双折射对偏振态的影响。在任意线偏振方向输入时，输出光的消光比均大于 20 dB。另外，检偏器最小点位置 θ₂ 随 θ₁ 变化的一致性，也表明光纤扭转后呈现良好的圆双折射特性。

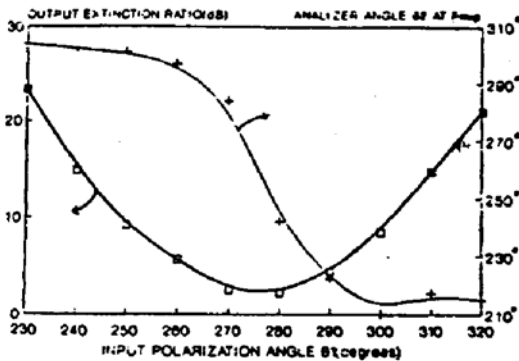


Fig. 3 The output extinction ratio and θ₂ versus the orientation of the input linearly polarized light before the fibre is twisted

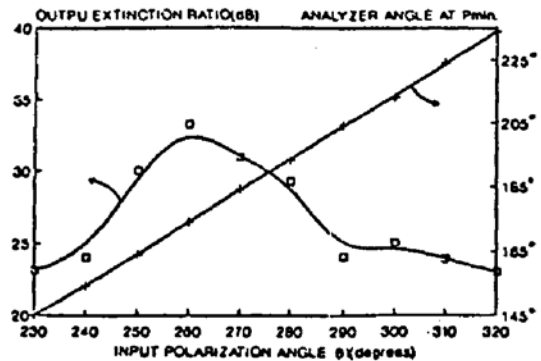


Fig. 4 The output extinction ratio and θ₂ versus the orientation of the input linearly polarized light after the fibre in Fig. 3 is twisted by 8 turns

将扭转后的光纤平放在表面光滑的钢板上，垂直光纤放置一根直径 2.0 mm 的玻璃圆

棒,其中圆棒已用胶粘在一块薄板上,如图2中的插图所示。对光纤的侧向加压就可通过在板上加重物实现。压力的变化是通过逐次在板上增加(最多可加至5块)每块重65g的金属块实现的。在光纤轴向不同点加压并改变加载压力,输出光的消光比将随压力变化。如图5即是保持输入偏振方向不变,在离光纤输入端不同点改变加载压力,输出光消光比与不加压时(33.2 dB)相比变化的曲线。从图中可以看出在离光纤输入端24.1 cm处消光比随压力的变化最小。从上一部分的分析可知,此点光纤中偏振光的偏振方向与压力施加方向基本平行(或垂直)。相比之下,在光纤其它位置压力的变化对输出光消光比的影响则十分明显。

沿光纤逐点移动加压装置,在输入线偏振光不变的情况下,可以得到输出光消光比随加压点位置变化的曲线,或输出光偏振态对压力的敏感度沿光纤长度的分布情况。图6即是光纤在 $\tau = 62.1 \text{ rad/m}$ 的扭转率下,将固定压力沿光纤移动,输出光消光比随加压点所在位置变化的曲线。图中光纤未加压时输出光的消光比为33.2 dB。从曲线上可以得到两相邻消光比变化最小点之间的距离是34.9 cm。在这两点上加260g重物输出光消光比仍达到20 dB以上。若增加压力装置沿光纤移动的长度,应能观察到消光比变化的更多周期。

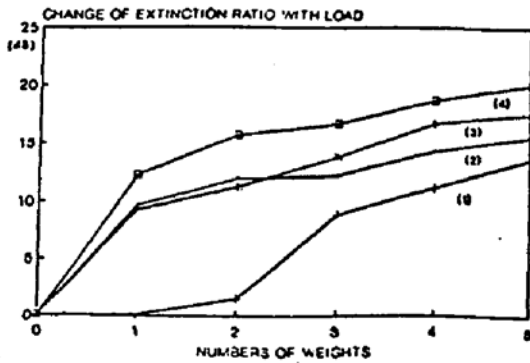


Fig. 5 Amounts of change between the output extinction ratio before and after the lateral force is applied to the twisted fibre. The curves (1) ~ (4) correspond the situation when the lateral force is applied at position (measured from the fibre input end) of: (1) 24.1 cm (2) 23.1 cm (3) 25 cm (4) 30 cm. The figures at X-axis represent the number of applied weight

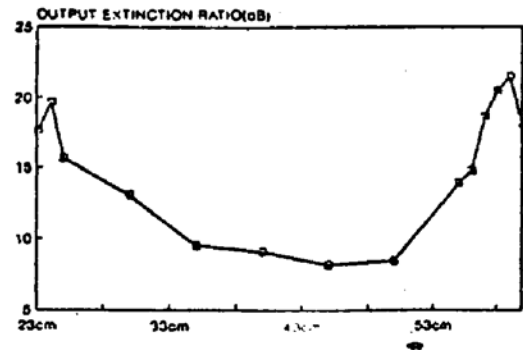


Fig. 6 Variation of the output extinction ratio versus the constant force applying position. The maximum extinction ratio obtained at position of 24.1 cm and 59 cm

由上一节的分析,图6中两个消光比变化最小点所在位置对应的光偏振方向相差 $\pi/2$ 角度。由此可以算出这根扭转光纤的圆双折射为:

$$\Delta\beta_c = \pi/34.9 \text{ cm} = 9.0 \text{ rad/m} \quad (9)$$

为判别这一结果的准确性,可以测量(4)式中的 g 值,并在已知光纤扭转率的情况下,用(6)式计算出光纤的圆双折射,将结果与(9)式比较。

g 值的测量可通过测量光纤每增加扭转一周后,输出光偏振方向角度变化的数值来获得。用图2实验装置,在 $\tau = 62.1 \text{ rad/m}$ 扭转的基础上,将光纤继续扭转。每扭转一圈记下输出光偏振方向的新角度,所得的结果在图7中给出。实验测得每扭转光纤一周输出光的偏振方向变化 $24 \sim 27^\circ$ 。由这些数据并利用(6)式可以算出不同扭转率下 g 值的变化范围,它在 $0.133 \sim 0.15$ 之间波动。这一结果与文献[3]中给出的 g 值(0.13 ~ 0.16)符合得很好。取 g 的

平均值 0.1415, 可以算出实验中 62.1 rad/m 扭转的光纤圆双折射为:

$$\Delta\beta_c = g\tau = 8.787 \text{ rad/m} \quad (10)$$

与(9)式结果相比, 两者之间相对误差在 2.4% 之内。由此可见移动压力法测量高圆双折射光纤中的圆双折射是可行的, 并且具有良好的准确性。

结 论 移动横向压力法能较好地测量高圆双折射光纤中的圆双折射。测量结果与计算值(6)式相对误差在 2.4% 以内。这种测量方法为非破坏性测量已成品的高圆双折射光纤提供了一种简便可行的途径, 具有较大的应用价值。增大压力移动距离还可以测量光纤中圆双折射沿长度方向分布的均匀性, 是检验高圆双折射光纤质量的有效方法, 在实际测量中能得到较大的应用。

参 考 文 献

- [1] R. Ulrich, A. Simon, Polarization optics of twisted single-mode fibres. *Appl. Opt.*, 1979, 18(13): 2241~2251
- [2] M. P. Varnham, R. D. Birch, D. N. Payne *et al.*, Design of helical-core circularly birefringent fibres. *Proc. Optical Fiber Communication, '86, Technical Digest Paper TUL20*, IGWO, 1986, Atlanta
- [3] R. Calvani, R. Caponi, F. Cisternino, Polarization measurement on single-mode fibres. *J. Light. Technol.*, 1989, 7() : 1187~1196
- [4] K. Takada, J. Noda, R. Ulrich, Precision measurement of modal birefringence of highly birefringent fibres by periodic lateral force. *Appl. Opt.*, 1985, 24(24): 4387~4391
- [5] K. Kikuch, T. Okoshi, Wavelength-sweeping technique for measuring the beat length of linearly birefringent optical fibres. *Opt. Lett.*, 1983, 8(2): 122~123
- [6] X. P. Dong, H. Hao, J. R. Qian, Measurement of fibre Verdet constant with twist method. *Proc. SPIE*, 1991, 1572: 56~58

Measurement of Circular Birefringence in Highly Circularly Birefringent Fibers Using the Moving Lateral Force Method

Dong Xiaopeng Qian Jingren

(Department of Electronics Engineering and Information Science
University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

(Received 1993; revised 1993)

Abstract Based on the analysis of polarization variation in a highly circularly birefringent(HCB) fibers, we proposed a method of moving lateral force to measure the circular birefringence in the fibers. Using this method the twisted fiber was measured experimentally. The relative error between the results obtained from experiment and calculation(under the condition of a known twist rate) is within 2.4%. This method provides an alternative approach for the measuring of the HCB fiber non-destructively.

Key words birefringence, polarization, optical fiber measurement.

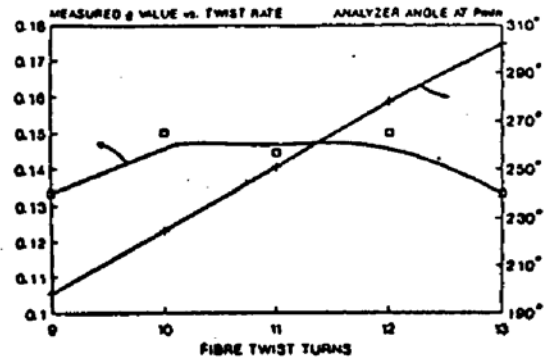


Fig. 7 Variation of the output polarization angle and the g-value versus fibre twist turns