

光纤几何路径引起的圆双折射*

李 劬 叶 军 彭哨青 陈英礼

(上海交通大学 应用物理系)

提 要

本文对单模光纤中线偏振面的旋转与光纤几何路径的关系进行了研究。首次报道了在光纤入射端和出射端不平行的情况下的数值计算和实验测量结果。

关键词: 单模光纤, 双折射。

光纤一般都具有或多或少的固有线性双折射和圆双折射, 同时各种应力也会在光纤中产生感生双折射, 所以光纤中导波的偏振态是变化的。值得注意的是, 即使不存在本征或应力双折射, 光纤仍可能由于沿非平面曲线缠绕时会引入附加的圆双折射。Papp 等人^[1]首先报道了单模液芯光纤中线偏振模偏振面旋转与光纤几何路径的关系, 之后其他人又相继发表了多篇从不同角度研究这一问题的文章^[2~8]。这些文章从理论和实验方面对光纤几何路径导致的圆双折射进行了研究。在实验方面, 迄今所报道的研究结果^[1~3, 5]有一个共同特点, 即都是在光纤入射端和出射端平行的情况下测量偏振面旋转角的。本文首次报道了在光纤入射端和出射端非平行的情况下对偏振面转动角的计算和测量结果, 两者符合得相当好。

一、数值计算

设一段单模光纤沿一空间曲线延伸, 如图 1 所示。这时即使忽略光纤的本征双折射及各种应力双折射, 光纤仍表现出与几何路径有关的圆双折射, 即若在光纤入射端激发一线偏振模, 则其偏振面到达出射端时将转过一角度, 此角度与光纤的几何路径密切相关, 一些文章从不同角度对此进行了理论处理^[1, 2, 4, 6~8], 本文不准备对这些不同的方法进行评论, 而仅从 Haldane 的结果出发, 针对所要处理的实验问题进行数值计算, 并将其结果与实验进行比较。本文之所以选择 Haldane 的处理方法是因为该方法从一个简单的公理出发**, 由纯几何方法导出了比较简明的结果, 另一方面还因为其结果适用于光纤出、入射端非平行的情形, 故具有普遍性。

当光波在单模光纤中传播时, 其波矢 k 将处处近似地沿着光纤几何路径的切线。若将波矢的始端固定在波矢空间的原点, 则当光波从入射端传播到出射端时, 其各点处波矢方向的单位矢量 K 的末端将在波矢空间中以原点 O 为球心的单位球面上划出一曲线。若光纤的出射端与入射端平行, 则两端处 K 重合, 因而划出的曲线是闭合的。这时出射端处的偏振面

收稿日期: 1989年10月24日; 收到修改稿日期: 1990年1月5日

* 本课题由上海交通大学科学基金资助。

** 该公理已在文献[8]中证明为合理的。

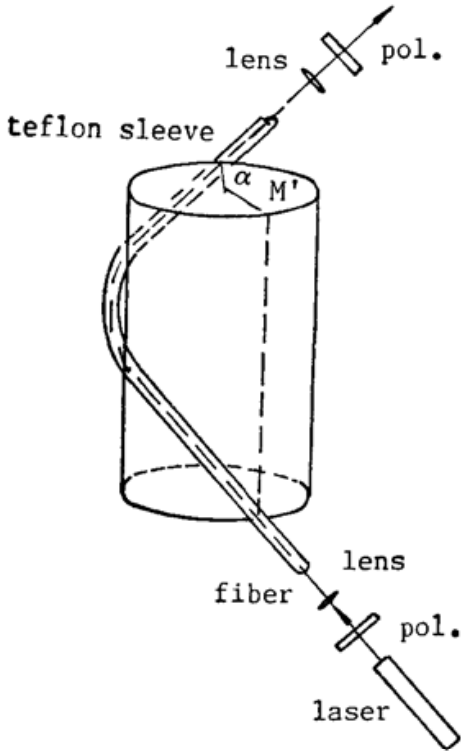


Fig. 1 Experimental Setup

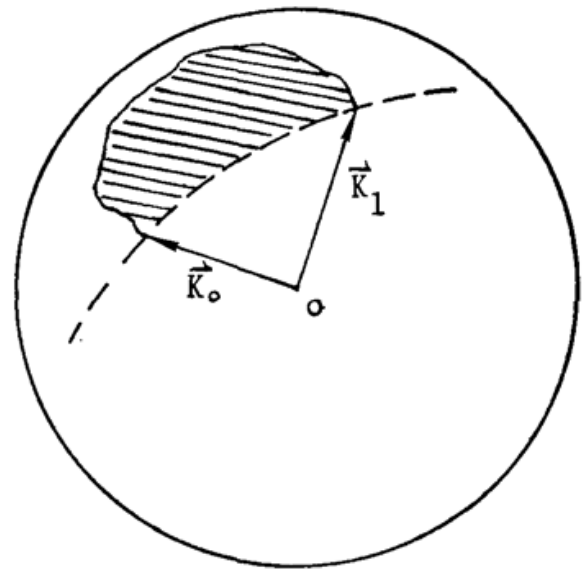


Fig. 2 Closed curve on unit spherical surface in K space

Solid line—locus of end points of K vector of optical wave along the single-mode fiber
 Dashed line—a great circle to close the curve

Table 1 Uniform Helices (Nonparallel)

parameters of helices	polarization rotation	
	calculated (rad)	experimental (rad/deg.)
P/R = 12.73 $\alpha=14^\circ$	0.6234	0.6330/36.26°
P/R = 1.084 $\alpha=33^\circ$	4.742	4.673/267.72°
P/R = 1.084 $\alpha=112^\circ$	3.609	3.640/208.57°
P/R = 0.6421 $\alpha=180^\circ$	2.823	2.830/162.18°

Table 2 Uniform Helices (Parallel)

parameters of helices	polarization rotation	
	calculated (rad)	experimental (rad/deg.)
P/R=39.17	0.079	0.179/10.25°
P/R=14.15	0.542	0.583/33.42°
P/R=4.953	2.393	2.453/140.56°
P/R=2.986	3.587	3.590/205.67°
P/R=1.622	4.712	4.713/270.01°
P/R=0.6421	5.646	5.661/323.38°

Table 3 Nonuniform Helices (Parallel)

parameters of helices	polarization rotation	
	calculated (rad)	experimental (rad/deg.)
type (a) C=0.8 P/R=6.452	2.307	2.217/127.02°
type (b) C=0.3 P/R=6.452	1.929	1.871/107.19°
type (c) C=0.3 P/R=3.188	3.562	3.611/206.89°

相对于入射端处的偏振面所转过的角度在数值上等于闭合曲线所围成的球面部分对球心所张的立体角。如果光纤的出、入射端不平行, 则 K 矢量末端所划的曲线不闭合。这时可用一段大弧将两端点闭合起来, 如图 2 所示。这里要注意的是在两端测量偏振面方位时应选择正确的参考方位。当光纤出、入射端不平行时, 设两端处切向矢量分别为 t_{λ} 和 t_{μ} , 则参考方位应与它们的矢积 $V=t_{\lambda} \times t_{\mu}$ 所在方位重合。若出、入射端平行, 则参考方位可在垂直于入射端切线的平面内任意选择。

本文对光纤的几何路径为任意一段简单螺线这一特殊情形推导了具体的计算公式*, 进行了数值计算, 并将计算结果与实验进行了比较, 结果列于表 1。我们也同时对光纤出、入射端平行的情形(包括各种参数的简单螺线和非简单螺线)进行了计算及实验测量, 结果列于表 2、表 3。

二、实 验

实验对多种不同几何路径的单模光纤中光波偏振面的转角进行了测量, 其光路如图 1 所示。在实验过程中注意了以下几方面:

(1) 选择优质单模光纤, 使其本征双折射尽可能地小;

(2) 在把光纤绕成一定的空间曲线形状时, 注意不引入应力双折射。实验采取的措施是把光纤穿在细软管中, 使光纤可在管中自由伸展。将软管绕成给定的空间曲线形状时, 其中的光纤也就沿同样的空间曲线绕行, 同时光纤中又不会因缠绕时人为的扭曲而产生附加的应力双折射。在本文的实验中, 曲线的曲率半径处处都比光纤截面直径大得多, 因而由弯曲产生的双折射也可以忽略;

(3) 在光纤出、入射端非平行的情形下, 应精确地选择参考方位;

(4) 由于检偏器消光方位的判读有一定的误差, 所以对每一个转角值都取 5 次以上读数的平均值, 每一读数又取左、右逼近读数的平均值。

本文对下列各情形进行了测量:

1. 光纤自由伸直

在这种情形下测得的消光方位的转动对应于单模光纤中本征圆双折射的影响。下面诸实验中所用的光纤在绕成各种曲线形状前都在伸直的情形下先进测量。测量结果表明, 在光纤伸直的情形下出、入射端消光方位的变化不超过 2° 。

2. 光纤绕成整一圈简单螺线(出、入射端平行)

简单螺线可由半径 R 和螺距 p 来表示。这时光纤出、入射端偏振面的相对转角可由下式确定

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{p}{s}\right), \quad (\text{弧度}) \quad (1)$$

式中 s 为这段螺线的弧长, 可由 R, p 求出。实验结果列于表 2。

3. 光纤绕成整一圈非简单螺线(出、入射端平行)

众所周知, 若把简单螺线在平面上展开, 则成一直线, 其方程可写为

* 推导具体计算公式实际上是一个球面几何问题, 这里不再赘述。

$$\frac{z}{R} = \left(\frac{p}{2\pi R} \right) \varphi. \quad (2)$$

如果把这方程稍作变形,如

$$\left. \begin{aligned} \frac{z}{R} &= \frac{p}{2\pi R} \varphi + c \sin \varphi, \\ \frac{z}{R} &= \frac{p}{2\pi R} \varphi + c \sin \varphi + c \sin^2 \varphi, \\ \frac{z}{R} &= \frac{p}{2\pi R} \varphi + c \sin^2 \varphi + c \sin^3 \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

就能得到几种非简单螺线的展开线方程,如图 3 所示。在实验过程中,先由计算机打印出各非简单螺线的平面展开线,将套有光纤的细软管沿展开线固定在打印纸上,再把打印纸卷在预先设计好的圆筒上。这样就得到所需的非简单螺线。很容易看出这时出、入射端仍是平行的。实验结果列于表 3。

4. 光纤绕成简单螺线的任意一段 (出、入射端一般是不平行的)

这种曲线可由螺线半径 R 、螺距 p 和角 α (如图 1 所示) 来描述。实验结果列于表 3。

由表 1~表 3 可知,实验与数值计算结果符合甚好。唯一的例外是表 2 中的第一行,在这个小角度下产生了较大的误差。作者认为这不是由测量消光方位的误差引起的,因实验中多次测量的误差不超过 0.61° 。如前所述,对出、入射端平行的简单螺线,其偏振面转角可由(1)式求出,其中 s 为螺线弧长即光纤的有效长度。由于在实验中实际光纤长度比绕成简单螺线一圈所需长度要长一些,为的是在两端留出一定部分作耦合调节用。这一段光纤被认为是直的因而对偏振面旋转没有贡献,但实际上光纤的平直部分和螺线部分是较难确定的。在小角度情况下, p 与 s 值很接近,这时 s 的误差会大大影响 Ω 的计算值。由于在表 2 第一行的情况下, $p=23.70$ cm, $s=24.00$ cm, 因此 $\Delta s = \pm 1.5$ mm 能使 Ω 计算值改变一倍,这就是其较大误差产生的原因。

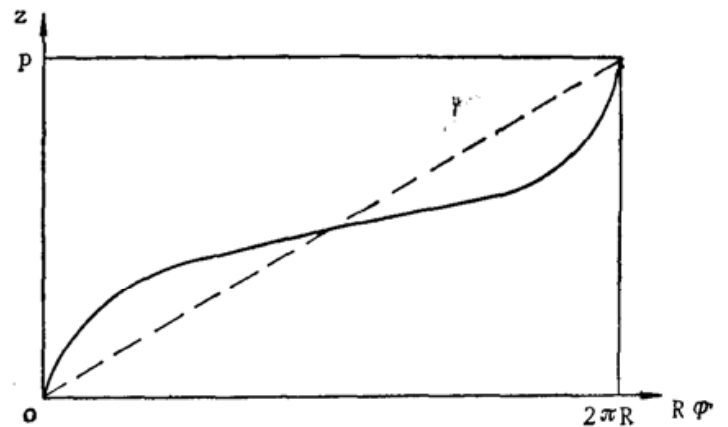


Fig. 3 The unwrapped helices
Solid line—a nonuniform helix
Dashed line—a uniform helix

三、结 论

单模光纤中线偏振面的转动形成圆双折射的表现。这种圆双折射可能由光纤所取的几何路径产生。本文在 Haldane 理论的基础上对不同几何路径所引起的圆双折射进行了数值计算并与实验进行了比较,结果符合得相当好。其中对出、入射端不平行情形的计算和测量是我们首次作出的。光纤的这一特性可能会在某些光纤器件特别是偏振型光纤传感器的设计中得到应用。

参 考 文 献

- [1] A. Papp, H. Harms; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 5 (May), 1315~1319.
- [2] J. N. Ross; *Opt. & Quant. Electron.*, 1984, **16**, No. 6 (Nov), 455~461.
- [3] M. P. Varnham *et al.*; «*In Proceedings of the Fifth International Conference on Integrated Optics & Optical Fiber Communication and the Eleventh European Conference on Optical Communications*» (*Istituto Internazionale delle Communication, Genova, Italy, 1985*), 135.
- [4] R. Y. Chiao, Y. S. Wu; *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**, No. 8 (25 Aug), 933~936.
- [5] A. Tomita, R. Y. Chiao; *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**, No. 8 (25 Aug), 937~940.
- [6] F. D. Haldane; *Opt. Lett.*, 1986, **11**, No. 11 (Nov), 730~732.
- [7] Eang Xisheng, Lin Zongqi; *IEEE Trans Microwave Theory & Tech.*, 1985, **MTT-33**, No. 11 (Nov), 1150~1154.
- [8] Qian Tingren; *IEEE Proc.*, 1988, **135**, No. 2 (Apr), 178~182.

Circular birefringence due to geometri path of optical fibers

LI QU, YE JUN, PENG SHAOQING AND CHEN YINGLI

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiao Tong University)

(Received 24 October 1989; revised 5 January 1990)

Abstract

Polarization rotation due to geometric path of singlemode optical fibers has been investigated. The results of theoretical and experimental studies are reported on such polarization rotation with input and output ends of fibers being non-parallel. This is, to our knowledge, the first time that this kind of research has been done.

Key words: single-mode optical fiber; birefringence.

据乙民报道 第十届全国激光学术报告会(纪念激光器诞生三十周年), 将于一九九〇年七月二十五日至二十八日在内蒙古自治区首府呼和浩特市举行, 由内蒙古大学具体承办。