

圆双折射光纤的几何判别原理

钱景仁

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽 合肥 230026)

摘要 基于耦合模理论, 提出一种判别圆双折射光纤的简易方法。首先指出在单模工作条件下的线双折射光纤中, 一对互相正交的线偏振模间耦合系数为虚数, 而在圆双折射光纤中, 耦合系数为实数。从上述事实出发并根据单模光纤横截面上折射率分布的对称性, 确定了光纤轴向倒置后几何形状不变是圆双折射光纤的三个必要条件之一。利用这种判别方法, 可以确定对互易光纤而言, 只有扭转圆光纤和熔融状态下制作的螺旋光纤才是真的圆双折射光纤。

关键词 光纤光学; 圆双折射; 耦合模理论; 双折射光纤; 扭转光纤

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092904.0884

Principles for Geometrically Distinguishing Circular-Birefringence Fibers

Qian Jingren

(Department of Electronics Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract Based on the coupled-mode theory, a simple method to distinguish circular-birefringence fibers is presented. It is indicated that in a linear-birefringence single-mode fiber the coupling coefficient between two orthogonal linearly polarized modes is a imaginary number, and the coupling coefficient will be real while in a circular-birefringence fiber. From this fact and the symmetry of the refractive index profile of the fiber cross-sections, we conclude that fiber structure is kept unchanged in case of opposite location of fiber axes is one of the three necessary conditions for a circular birefringent fiber. According to this rule, only twisted fibers and helical fibers (drawn in viscous state at a high temperature) are really circular birefringent fibers.

Key words fiber optics; circular-birefringence; coupled-mode theory; birefringent fiber; twisted fiber

1 引言

由于光纤电流传感器在高压电网中应用的迫切性^[1], 人们一直在找寻像线保偏光纤那样容易实现的圆保偏光纤^[2], 即圆双折射光纤。本文就是提出一种单模圆双折射光纤的几何判别法。

首先从耦合模理论出发, 推出在单模工作条件下的线双折射光纤中, 一对互相正交的线偏振模间耦合系数为虚数, 而在圆双折射光纤中, 耦合系数为实数。其次, 我们发现存在两类单模光纤结构, 一类在横截面上几何结构或内应力呈现方向性, 如弯曲光纤、横向受压光纤、椭圆芯光纤、熊猫光纤等, 其一

对正交偏振模间耦合系数为虚数^[3]; 另一类单模光纤结构, 如扭转光纤和螺旋光纤, 具有光纤倒置后几何形状(包括结构参数)不变的特点, 偏振模间的耦合系数可证明为实数^[4,5]。这样就可以从光纤的几何结构来判别光纤具有何种双折射特性。

2 单模光纤中双折射的耦合模描述

单模光纤中常用一对正交偏振模 (LP_{01}^x 和 LP_{01}^y) 的耦合模方程来描述该光纤的传输特性。

对于线双折射光纤, 当光的两个偏振方向 (x 和 y) 恰好与双折射的两个互相垂直的主轴 (x' 和

收稿日期: 2008-08-15; 收到修改稿日期: 2008-10-26

基金项目: 安徽省光电子科学与技术重点实验室资助课题。

作者简介: 钱景仁(1935—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤及其器件的理论和技術等方面的研究。

E-mail: jrqian@ustc.edu.cn

y')分别重合时,该方程很显然可以表示为

$$\begin{aligned} \frac{dA_x}{dz} &= -j(\beta - c)A_x, \\ \frac{dA_y}{dz} &= -j(\beta + c)A_y, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 A_x 和 A_y 分别为 LP_{01}^x 和 LP_{01}^y 模的归一化幅度, $\beta - c$ 和 $\beta + c$ 分别为它们的相位常数。显然 $2c$ 就是线双折射,是个实数。若两光偏振方向 x 和 y 逆时针方向偏转 θ 角,则

$$\begin{aligned} A_x &= A'_x \cos \theta + A'_y \sin \theta, \\ A_y &= -A'_x \sin \theta + A'_y \cos \theta, \end{aligned}$$

其中 A'_x 和 A'_y 为偏转后 LP_{01}^x 和 LP_{01}^y 的振幅。将上式代入(1)式即得

$$\begin{aligned} \frac{dA'_x}{dz} &= -j(\beta - c \cos 2\theta)A'_x + j c \sin 2\theta A'_y, \\ \frac{dA'_y}{dz} &= -j(\beta + c \cos 2\theta)A'_y + j c \sin 2\theta A'_x. \end{aligned} \quad (2)$$

由(2)式可见光偏振方向偏转后, LP_{01}^x 和 LP_{01}^y 发生耦合,其耦合系数为虚数,且随偏转角偏转方向不同而改变符号。

对于圆双折射光纤,两个相互正交的圆偏振模幅度满足

$$\begin{aligned} \frac{dA_r}{dz} &= -j(\beta - k)A_r, \\ \frac{dA_l}{dz} &= -j(\beta + k)A_l, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 A_r 和 A_l 分别为右旋和左旋圆偏振模的幅度, $2k$ 是圆双折射大小,是个实数。

圆偏振光和线偏振光有如下关系:

$$\begin{aligned} A_r &= \frac{1}{\sqrt{2}}(A_x - jA_y), \\ A_l &= \frac{1}{\sqrt{2}}(A_x + jA_y), \end{aligned}$$

将上述关系代入(3)式,得

$$\begin{aligned} \frac{dA_x}{dz} &= -j\beta A_x + kA_y, \\ \frac{dA_y}{dz} &= -j\beta A_y - kA_x. \end{aligned} \quad (4)$$

可见,圆双折射光纤中,耦合系数是个实数。由于(4)式和(3)式是完全等价的,因此若在一单模光纤结构中,一对正交线偏振模满足条件:1)相位常数一致;2)模间存在耦合;3)耦合系数为实数,则该单模光纤为圆双折射光纤。

若是两正交线偏振模相位常数不一致,或耦合系数为复数,则得不到圆双折射特性而成为椭圆双折射光纤^[5]。

如果上述单模双折射光纤中存在其他不规则性,同样可以方便地用耦合模方程来描述。只要 k 和 c 远大于那些不规则性引起的耦合系数,(2)式和(4)式仍然近似成立。在单一偏振光输入时,光纤中传输的偏振态保持近似不变,这也就是说只要 k 和 c 足够大,双折射光纤就是保偏光纤。

3 几何判别原理

上面述及,要在单模光纤实现圆双折射有三个条件。其中第三个条件规定(4)式中耦合系数为实数。对于无耗互易光纤结构,如果光纤轴向坐标倒置,不会改变光纤的结构,即在两个轴向相反的右手坐标系中,光纤的坐标参数不变时,则耦合系数一定为实数。这样,光纤具有圆双折射的第三个条件就变为光纤轴向坐标倒置时的不变性。

第三个条件是纯粹的几何形状的要求。螺旋光纤、扭转光纤是满足这一条件的光纤结构。下面用耦合模理论来证明这种结构的光纤耦合系数是实数。

若一单模光纤满足第一和第二条件和上述结构倒置的不变性,其在 z 向传输的两正交线偏振模的振幅 A_x^\pm 和 A_y^\pm 满足如下耦合模方程:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} A_x^\pm &= \mp j\beta A_x^\pm + k_{xy}^{\pm\pm} A_y^\pm, \\ \frac{d}{dz} A_y^\pm &= \mp j\beta A_y^\pm + k_{yx}^{\pm\pm} A_x^\pm. \end{aligned} \quad (5)$$

(5)式实际上是两组方程,分别描述 z 和 $-z$ 方向传输模间的耦合;另外这里的 $k_{xy}^{\pm\pm}$ 和 $k_{yx}^{\pm\pm}$ 为同向传输模式间的耦合系数,反向传输模间无耦合。

由于该光纤结构满足轴倒置不变性,即光纤结构参数在 z 轴倒置时不变,因此

$$k_{xy}^{++} = k_{xy}^{--}, \quad k_{yx}^{++} = k_{yx}^{--}. \quad (6)$$

再来看弯曲光纤、椭圆光纤等一类光纤是否满足倒置不变性。对这一类光纤,由于被弯或几何变形,在光纤截面上出现了互相正交的两个主轴(x' 和 y' 方向)。为了满足第二个条件,由(2)式可知两个正交偏振光的方向必须偏离主轴才有耦合,如图1(a)所示。

这是对于 z 方向传输光的情况。若对 $-z$ 方向传输的光,情况就不一样了。原来对于 z 方向光来说, θ 是逆时针方向的转角,但对 $-z$ 方向的光来说,则是顺时针方向的转角[见图1(b)], θ 变符号。因此由(2)式可知,耦合系数 k 也要变符号,即

$$k_{xy}^{++} = -k_{xy}^{--}, \quad k_{yx}^{++} = -k_{yx}^{--}. \quad (7)$$

可见光纤结构参数在两个倒置的右手坐标系中是不

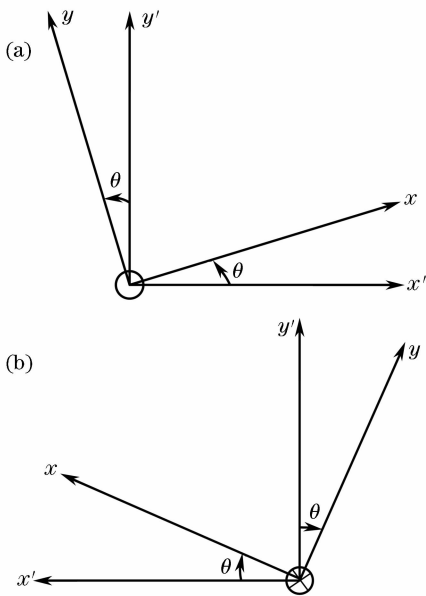


图 1 从两个方向看光纤截面。(a) 逆 z 方向看；
(b) 顺 z 方向看

Fig.1 Fiber cross sections seen from two opposite directions. (a) seen oppositely to the z -direction;
(b) seen along the z -direction

同的,造成了符号的差别。

下面研究无耗互易光纤系统中耦合系数间的一个普遍关系。在一段同向传输模间有耦合的非理想单模光纤中存在两种独立的电磁场(见图 2),即 $\mathbf{E}^a, \mathbf{H}^a$ 和 $\mathbf{E}^b, \mathbf{H}^b$:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^a(x, y, z) &= A_x^+(z)\mathbf{e}_{01}^x(x, y) + A_y^+(z)\mathbf{e}_{01}^y(x, y), \\ \mathbf{H}^a(x, y, z) &= A_x^+(z)\mathbf{h}_{01}^x(x, y) + A_y^+(z)\mathbf{h}_{01}^y(x, y), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^b(x, y, z) &= A_x^-(z)\mathbf{e}_{01}^x(x, y) + A_y^-(z)\mathbf{e}_{01}^y(x, y), \\ \mathbf{H}^b(x, y, z) &= -A_x^-(z)\mathbf{h}_{01}^x(x, y) - A_y^-(z)\mathbf{h}_{01}^y(x, y). \end{aligned} \quad (9)$$

(8) 式, (9) 式中, $\mathbf{E}^a, \mathbf{H}^a$ 和 $\mathbf{E}^b, \mathbf{H}^b$ 分别为在 z 方向和 $-z$ 方向传输的两种任意场; $\mathbf{e}_{01}^x, \mathbf{h}_{01}^x$ 和 $\mathbf{e}_{01}^y, \mathbf{h}_{01}^y$ 分别为该光纤中 x 方向和 y 方向 LP_{01} 模的模函数。将 (8) 式和 (9) 式代入互易定理

$$\oiint (\mathbf{E}^a \times \mathbf{H}^b - \mathbf{E}^b \times \mathbf{H}^a) \cdot \mathbf{n} ds = 0, \quad (10)$$

式中环面积分为图 2 中 $z=0$ 和 $z=\Delta z$ 两无限大面

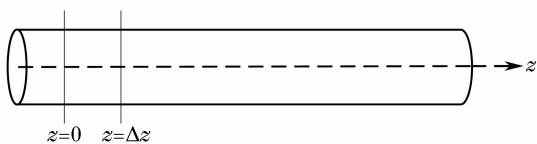


图 2 一段非理想光纤

Fig. 2 A section of a non-ideal optical fiber

积分(这里忽略了在无限远处的环积分), \mathbf{n} 为外法线方向。再利用正交归一化关系

$$\int \mathbf{e}_{01}^i \times \mathbf{h}_{01}^j \cdot \mathbf{i}_z = \delta_{ij}, \quad (i, j = x, y), \quad (11)$$

即可得

$$\begin{aligned} A_x^+(0)\Delta A_x^-(0) + A_x^-(0)\Delta A_x^+(0) + \\ A_y^+(0)\Delta A_y^-(0) + A_y^-(0)\Delta A_y^+(0) = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

这里 $\Delta A_i^\pm(0)$ 代表在 $z = \Delta z$ 处 A_i^\pm 的增量 ($i = x, y$)。

将(12)式除以 Δz 并取 $\Delta z \rightarrow 0$ 的极限, 即得

$$\frac{d}{dz}(A_x^+A_x^- + A_y^+A_y^-) = 0. \quad (13)$$

将(5)式代入(13)式, 并注意到 A_x^\pm 和 A_y^\pm 有一定的任意性, 因此

$$k_{xy}^{\pm\pm} = -k_{yx}^{\pm\pm}. \quad (14)$$

可见(14)式的关系是由场的互易性得来的; 对非互易性的光纤, (12)式就不满足了。

已知在无耗情况下, 耦合系数满足负共轭的关系^[6], 即

$$k_{xy}^{\pm\pm} = -k_{yx}^{\pm\pm*}. \quad (15)$$

由(14)式和(15)式可得

$$k_{yx}^{\pm\pm} = (k_{xy}^{\mp\mp})^*, \quad k_{xy}^{\pm\pm} = (k_{yx}^{\pm\pm})^*. \quad (16)$$

这是在任一无耗、互易的光纤结构中, 两互相正交的线偏振模间耦合系数所满足的普遍关系。

将(6)式和(16)式对比, 耦合系数必须是实数, 这表明光纤轴坐标倒置, 光纤结构参数不变是圆双折射的必要条件。将(7)式和(16)式对比, 可见耦合系数必须是虚数, 这也就验证了前面(2)式中所表示的, 当光纤截面上出现主轴时, 耦合系数是虚数。

由此可见, 判断一种互易光纤是否是圆双折射光纤, 可以不必进行复杂的光纤内应力与应变的运算和电磁场理论的分析, 而直接根据光纤的几何形状(或变形)就可以确定。光纤轴向坐标倒置, 结构不变是实现圆双折射的必要条件, 其他的两个必要条件即是前面提到的: 1) 两正交线偏振模相位常数一致; 2) 其耦合系数不为零。

满足这三个条件的光纤只有两种, 扭转的圆光纤是指扭转已拉制好的圆光纤。螺旋光纤很类似于扭转光纤, 螺旋形状实际上包括扭和弯曲两种变形。弯曲在光纤截面上要引起主轴, 但如果螺旋光纤是在熔融状态下制作的^[7], 或是退过火的^[1], 则弯曲不会造成内应力, 主轴也就消失, 因此三个条件都满足, 是一种理想的圆双折射光纤。

扭转的或螺旋形的椭圆光纤、熊猫光纤(即双叶

应力区光纤),由于不满足条件(1)和(3),不是圆双折射光纤而是椭圆双折射光纤^[5,8];扭转的四叶应力区和8叶应力区光纤,虽然满足条件(1)和(3),但不满足条件(2),因此也不是圆双折射光纤^[9]。

4 结 论

实现圆双折射光纤的一个必要条件是光纤轴向倒置的不变性。这是一种简便的判别方法。用此方法可见,对互易光纤来说,如前所知,只有扭转的圆光纤和熔融状态下制作的(或是退过火了的)螺旋光纤才是单纯的圆双折射光纤。

参 考 文 献

1 K. Bohner, P. Gabus, H. Brandle. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2): 267~276

- 2 H. C. Huang. Practical circular-polarization-maintaining optical fiber[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(27): 6968~6975
 - 3 Sakai Jun-ich, Kimura Tatsuya. Polarization behavior in multiply perturbed single-mode fibers [J]. *IEEE J. Quant Electron.*, 1982, **QE-18**(1): 59~65
 - 4 R. Ulrich, A. Simon. Polarization optics of twisted single-mode fibers[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(13): 2241~2251
 - 5 Qian Jingren. Coupled-mode theory for helical fibers[J]. *IEE Proceedings, Pt. J.*, 1988, **115**(2): 84~88
 - 6 J. R. Pierce, W. G. Shephend. Reflex oscillation[J]. *BSTJ*, 1947, **26**(7): 460~681
 - 7 M. P. Varnham, R. D. Birch, D. N. Panye *et al.*. Design of helical-core circularly birefringent fibers[C]. Proc. OFC/IGWO, 1986, Atlanta
 - 8 Qian Jingren, Li Luksun. Spun highly linearly birefringent fibers for current sensors[J]. *Sci. China (Ser. A)*, 1990, **33**(1): 99~107
 - 9 Qian Jingren, Wang Xuxu. Coupled-mode theory for spun multi-lobe stress region fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 550~554
- 钱景仁,王许旭. 多叶应力区扭转光纤的耦合模理论[J]. 光学学报, 2007, **27**(3): 550~554

《中国激光》“全固态激光技术”专题征稿启事

全固态激光技术是目前我国在国际上为数不多的从材料源头到激光系统集成拥有整体优势的高技术领域之一,随着全固态激光器件与材料研究的迅速发展,对激光先进制造技术、激光显示技术和激光医疗等领域的发展产生了巨大的推动作用,已取得大量研究成果。《中国激光》计划于2009年6月正刊上推出“全固态激光技术”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“全固态激光技术”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 激光二极管抽运固体激光器
- 光纤激光器
- 半导体激光器及相关技术
- 晶体材料及相关技术
- 光学薄膜技术
- 其他

截稿日期:2009年3月31日

投稿方式以及格式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>)直接上传稿件(主题标明“全固态激光技术”投稿),也可直接将稿件电子版发至邮箱:zhgjg@mail.shnc.ac.cn(主题标明“全固态激光技术”投稿),详情请参见中国光学期刊网:www.opticsjournal.net。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请发邮件至zhgjg@mail.shnc.ac.cn询问。