

双折射单模光纤的保圆耦合

范海宁 黄勇* 李英

(上海科技大学无线电系, 上海 201800)

提要 提出了一种利用双折射单模光纤扭转时产生的圆双折射性获得保圆偏振的新方法, 该法应用于光纤耦合器的基本思想是通过有效地改变扭转光纤在耦合区域的单位扭转度, 从而达到光纤之间实现保圆耦合的目的。同时, 用耦合模方程分析了利用该法构成的 2×2 单模光纤耦合器的耦合行为, 结果表明光纤耦合器达到了较好的保圆耦合。

关键词 单位扭转度, 保圆耦合

1 引 言

线偏振的特性对单模光纤耦合器的主轴平行精度和光纤连接时的主轴准直精度具有很高的要求, 稍一偏离就会导致耦合系数的急剧下降, 这给实际工作带来了不少的困难。早在八十年代初, 大越孝敬^[1]、Ulrich R.^[2]和 D. N. Payne^[3] 等许多学者对双折射单模光纤扭转时的圆双折射性进行了研究报道, 但他们都只考虑了光纤的单位扭转度 φ (rad/m) 为常数的情况。本文试图在光纤扭转时, 将单位扭转度 φ 加以控制变化, 从而使线偏振光输入扭转光纤时, 在单位扭转度 φ 变化的一段距离里能保持圆偏振传输。并用耦合模方程分析了 φ 为变量的双折射单模光纤耦合器的耦合特性, 其结果表明当线偏振光从耦合器的一端输入时, 在耦合区实现了圆偏振耦合, 并且当输出端的 φ 很大时, 偏振光仍以线偏振状态从两输出端输出。

2 理论分析

2.1 双折射单模光纤在变单位扭转度时的 HE_{11} 模的偏振状态

假定由于扭转引起的挠动在 z 轴的分布是均匀的, 故只需考虑二维情况。如图 1 所示, 虚线坐标 $x' y'$ 表示光纤未扭转前的静止坐标系, 实线坐标 xy 表示追随扭转的旋转坐标系。图 1 中,

$$\varphi_0 = \varphi \Delta z \quad (1)$$

其中, φ 为光纤的单位扭转度 (rad/m), Δz 为光纤扭转段的长度。根据图 1, 得到静止坐标系与旋转坐标系的关系为

$$\begin{pmatrix} E_{x'} \\ E_{y'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi z & -\sin \varphi z \\ \sin \varphi z & \cos \varphi z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

* 上海交通大学电子光纤所。

收稿日期: 1993 年 10 月 4 日; 收到修改稿日期: 1993 年 12 月 27 日

其中, E_x 和 E_y 分别表示静止坐标系中 x' 方向与 y' 方向的电场, E_x 和 E_y 分别表示旋转坐标系中 x 方向与 y 方向的电场。

对于 HE_{11} 模, 光纤在扭转的情况下对偏振面的影响包括了由于扭转引起的 HE_x 和 HE_y 两个模的本征方向发生的旋转以及由扭转所产生的内应力在光纤内产生的旋光性。考虑了上述两种情况, 可得如下微分方程组

$$\frac{d}{dz} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -j\beta_x & \varphi(1-\alpha) \\ -j\beta_y & -\varphi(1-\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, β_x , β_y 分别为单模光纤固有的折射率分布非轴对称引起的波导结构双折射在主轴方向 (x 轴与 y 轴) 的传输系数。 α 称为旋光本领, 它表征电介质的旋光性的能力。在扭转光纤中, 它是光纤材料的旋光度 (rad/m) 和光纤扭转度 (rad/m) 的比例系数, 是由材料固有特性决定的。根据光弹性理论, 它可由下式给定^[4]

$$\alpha = n_0^2(P_{11} - P_{12}) \quad (4)$$

其中, P_{11} , P_{12} 为石英的光弹性张量的分量, n_0 为纤芯折射率。将石英的 P_{11} , P_{12} 代入, 则可得出 α 的理论值约为 0.08。另一方面, 根据光纤扭转产生旋光性的偏振态分析及实验证明 α 值约为 0.07^[4]。

解方程组(3)可得

$$\left. \begin{aligned} E_x(z) &= \exp(-j\bar{\beta}z) \left[E_x(0)\cos\gamma z - j\frac{\beta}{\gamma}E_x(0)\sin\gamma z + \frac{\varphi}{\gamma}E_y(0)\sin\gamma z \right] \\ E_y(z) &= \exp(-j\bar{\beta}z) \left[E_y(0)\cos\gamma z + j\frac{\beta}{\gamma}E_y(0)\sin\gamma z - \frac{\varphi}{\gamma}E_x(0)\sin\gamma z \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

上式中

$$\bar{\beta} = \frac{\beta_x + \beta_y}{2} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\beta_x - \beta_y}{2} \quad (7)$$

$$\gamma = \sqrt{\beta^2 + (1-\alpha)^2\varphi^2} \quad (8)$$

$E_x(0)$, $E_y(0)$ 分别表示相应的初始值。现在, 考虑了在 $z=0$ 时, 只激励 E_x , 则由式(5)得

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_x(0)(\cos\gamma z - j(\beta/\gamma)\sin\gamma z)\exp(-j\bar{\beta}z) \\ E_y &= -E_x(0)(\varphi/\gamma)\sin\gamma z\exp(-j\bar{\beta}z) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

应用式(9), 可得光纤出射端的偏振波椭圆率 ($|E_y/E_x|$) 及相位角之差 ($\angle E_y - \angle E_x$) 分别为

$$\left| \frac{E_y}{E_x} \right| = \left[\frac{(\varphi/\gamma)^2 \sin^2 \gamma z}{\cos^2 \gamma z + (\beta/\gamma)^2 \sin^2 \gamma z} \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$\angle E_y - \angle E_x = \tan^{-1}[(\beta/\gamma)\tan\gamma z] \quad (11)$$

我们的目的是要在空间某一点 z 处, 使 E_x , E_y 合成为圆偏振光, 即得如下相位角差

$$\angle E_y - \angle E_x = \pm \frac{\pi}{2} + 2m\pi, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (12)$$

式(12)右端前部的“+”、“-”号分别表示右旋偏振和左旋偏振, 下面的分析将表明, 偏振面的旋转方向并不是影响本文所关心的结果, 故而, 可代表性地选取

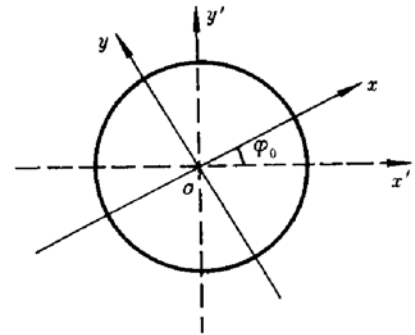


Fig. 1 Stationary coordinate and rotatory coordinate

$$\angle E_y - \angle E_x = \pi/2 \quad (13)$$

因此,由式(11)、(13)得

$$\gamma z = k(\pi/2), k = 1, 3, 5, \dots \quad (14)$$

在式(14)条件下,式(10)简化为

$$\left| \frac{E_y}{E_x} \right| = \frac{\varphi}{\beta} \quad (15)$$

要获得圆偏振,必使偏振波椭圆率

$$|E_y/E_x| = 1 \quad (16)$$

即

$$\varphi = \beta \quad (17)$$

式(14)、(17)保证了获得圆偏振波的条件。现在来研究式(14),结合式(8)、(17)可得

$$\varphi z = \frac{k\pi}{2a}, \quad k = 1, 3, 5, \dots \quad (18)$$

其中

$$a = \sqrt{1 + (1 - \alpha)^2} \quad (19)$$

式(18)表明,在偏振波沿 z 轴方向传输的一段距离里,只要保持 φz 值为某一恒定的常数,则在该段距离中能保持圆偏振传输。换句话说,当某线偏振波进入扭转的双折射单模光纤传输时,由于其扭转的双折射特性,线偏振波分裂为椭圆偏振波在光纤中传输,且该椭圆偏振波的椭圆率[式(10)]和相位角差[式(11)]随 z 的变化而变化。因此,当在空间某点 z 处,其椭圆率达到1而其相位角差为 $\pi/2$ 时[式(10)~(18)证明了这种点的存在],我们通过随着 z 的继续增长而降低光纤的单位扭转度(φ)的方法,来阻碍此刻的圆偏振波随 z 的增长而重新向椭圆偏振波的转化,从而在一段距离内保持着圆偏振传输。

根据式(15),取

$$\varphi = p\beta \quad (20)$$

其中, $p = 0.9 \sim 1.1$, 此时,结合式(8)、(14)及(17)可知,偏振波仍能保持较好的圆偏振状态,再由式(8)、(14)及(20)得

$$z = \frac{k\pi}{2\beta \sqrt{1 + (1 - \alpha)^2 p^2}} \quad (21)$$

式(21)表明,若 φ 在 $p = 0.9 \sim 1.1$ 段上,按式(21)作式(20)的变化,此时,取 $k = 5$,则在 $z = (0.9 \sim 1.1)(5\pi/2a\beta)$ 段上能实现较好的保圆偏振(如图2中粗线所示)。

根据文献[5]提供的资料,对式(21)取 $\beta = 10 \text{ rad/m}$,并结合式(4)、(19)可得出,在 $z = (0.517 \sim 0.632) \text{ m}$ 段上实现保圆偏振,其长度对实际应用中所需的耦合区域是足够的。同时,式(18)和(20)表明, k 值不能取得过大,否则将在实际应用中造成耦合器尾纤过长的后患。

2.2 变单位扭转度的 2×2 双折射单模光纤耦合器

对图3所示的耦合器,现在来研究其在变单位扭转度情况下的 HE_{11} 模的耦合行为。

容易得到图3的耦合模方程为

$$\frac{d}{dz} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = j \begin{pmatrix} k_{11} & K_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} \quad (22)$$

其中

$$k_{11} = \beta_x \quad (23)$$

$$k_{22} = \beta_y \quad (24)$$

$$k_{12} = k_{21} = (1 - \alpha)\varphi \quad (25)$$

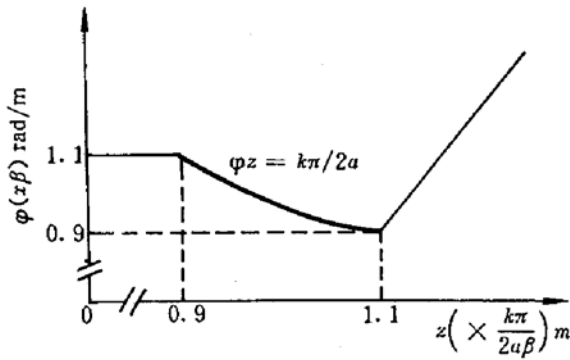
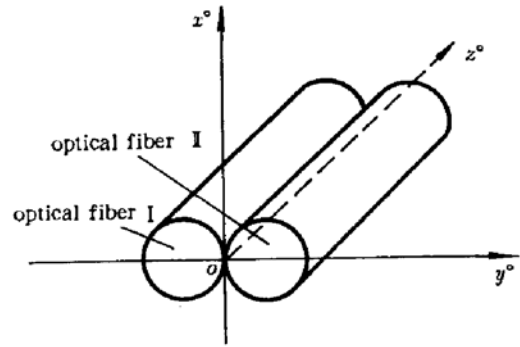
Fig. 2 The curve of φ versus z 

Fig. 3 The diagram of coupler

E_1 , E_2 分别为光纤 I、光纤 II 中的电场。

需要说明的是,在图 3 所示的坐标中,其 z^0 轴是以图 2 中的 $z = 0.9(5\pi/2a\beta)$ 为坐标原点的,并且约定光纤 II 中的初始激励为 0,而光纤 I 中的初始激励则由式(9)及(14)得到:

$$\left. \begin{aligned} E_{1x^0}(0) &= (\beta/\gamma)E_x(0) \\ E_{1y^0}(0) &= j(\varphi/\gamma)E_x(0) \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

分别考虑 x^0 偏振方向耦合与 y 方向的耦合,解方程组(22),并联系式(26)可得

$$\left. \begin{aligned} E_{1x^0} &= (\beta/\gamma\gamma^0)E_x(0)[\gamma^0\cos\gamma^0z^0 + j\beta\sin\gamma^0z^0]\exp(j\beta z^0) \\ E_{1y^0} &= j(\varphi/\gamma\gamma^0)E_x(0)[\gamma^0\cos\gamma^0z^0 + j\beta\sin\gamma^0z^0]\exp(j\beta z^0) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

$$\left. \begin{aligned} E_{2x^0} &= \frac{\beta\varphi(1-\alpha)}{\gamma\gamma^0}E_x(0)\sin\gamma^0z^0\exp(j\beta z^0) \\ E_{2y^0} &= j\frac{\beta\varphi(1-\alpha)}{\gamma\gamma^0}E_x(0)\sin\gamma^0z^0\exp(j\beta z^0) \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

$$\text{其中} \quad \gamma^0 = \sqrt{\beta^2 - (1-\alpha)^2\varphi^2} \quad (29)$$

式(27)~(28)表明,在式(20)条件下,光纤 I 和光纤 II 实现了较好的保圆耦合,并且可以看出,当输出端的 φ 很大时(如图 2 曲线的后部),即 $\varphi \gg \beta$ 时,偏振波将仍以线偏振状态从输出端输出。因此,从总体上实现了从线偏振输入到圆偏振耦合,再到线偏振输出的设想。

在实验方面,我们试图将单模光纤的一端固定夹住,另一端夹在一个可以旋转进动的微型电机上,然后,用单板机根据式(20),(21)的要求控制电机的进动速度和旋转速度,使之达到设计的要求。可以预料,用单板机控制电机在精度要求方面是有困难的,但我们可通过重复的实验来校正单板机对电机的实际控制设计要求。

参 考 文 献

- 1 大越孝敬,菊地和郎,江村克己. 单一モード光ファイバの偏波面回轉特性. 信学会光量エレ研究会, 1980, OQE80(62): 125~128
- 2 Ulrich R, Simon A. Polarization optics of twisted single-mode fibers. *Opt. Lett.*, 1980, 5(5): 173~175
- 3 Payne D. N., Barlow A. J., Hansen J. R.. Development of Low and High-birefringence Optical Fibers. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1982, MTT-30(4): 323~334
- 4 大越孝敬,岡本胜就,保立和夫. 光ファイバ: オーム社, 1983. 194~195
- 5 Okoshi T., Ryu S., Emura K.. Measurement of Polarization Parameters of a Single-moder Fiber. *J. Opt. Commn.*, 1981, 2(4): 46~53

Circular Polarization Maintaining Coupling between Birefringence Single-mode Optical Fibers

Fan Haining Huang Yong Li Ying

(Department of Electronics Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201800)

Abstract A novel method for maintaining circular polarization propagation in twisted birefringence single-mode optical fibre by using altering the twisting unit of fibre is presented. The results of investigating for a 2×2 twisted birefringence single-mode optical fibre coupler designed by this method shows that there is satisfactory circular polarization maintaining coupling between the two fibres.

Key words twisted unit, circular polarization maintaining coupling

庆祝《中国激光》创刊廿周年学术研讨会在无锡举行

《中国激光》创刊廿周年了。廿年来,在有关单位,特别是主办单位和编委会的领导下,在广大作者和读者的支持下,《中国激光》从季刊(1974~1975)、双月刊(1976~1978)到月刊(1979年起),已出版了 210 期,近几年又增设了英文版,以众多的栏目发表了 4000 多篇文章。

廿年来,《中国激光》在交流和推动我国激光科学技术向前发展、开拓和促进激光技术的广泛应用和渗透方面起到了积极的作用,并享有一定的国际声誉,在国、内外广大读者中树立了自己的形象和信誉。



与会代表聚精会神地聆听学术报告

为庆祝《中国激光》创刊廿周年,有关部门于 1994 年 5 月 31 日~6 月 2 日在江苏省无锡市召开了学术研讨会。第五届编委会的部分编委、编辑部全体工作人员及部分特邀代表共 30 多人参加了会议。会上,主编汤星里教授汇报了本届编委会的工作;常务副主编雷仕湛教授汇报了编辑部在历届编委会,特别是第五届编委会领导下以及中国科学院上海光机所的大力支持下,《中国激光》取得的成绩以及尚存在的一些问题;各地区编委的代表在发言中对编辑部的工作表示满意,对《中国激光》目前所处的地位和享有的声誉表示由衷的高兴,并对今后的工作提出了很好的建议和希望;中国科学院上海光机所副所长、《中国激光》副主编楼祺洪教授代表主办单位感

谢编委和广大作者、读者对《中国激光》的大力支持,并勉励编辑部人员为办好《中国激光》更加努力地工作。

在学术研讨会上,魏光辉、庄婉如、许祖彦、楼祺洪、钟景昌、杨正名、丘军林、过巴吉等教授作了专题学术报告,对 CO_2 激光器、半导体激光器、光参量激光器、准分子激光器、聚合物光折变、无源相位共轭等激光科学领域前沿的研究现状和发展前景作了综合分析,学术交流气氛浓厚,与会者感到收益很大,并希望今后能多开几次这样的研讨会。

研讨会后,出席会议的全体编委举行了座谈,对《中国激光》今后的办刊方针、编审队伍、办刊经费等问题提出了建设性的意见。

(周德现)