

熔锥型保偏光纤耦合器耦合系数分析*

王金娥,郑煜,吴宇列,李圣怡

(国防科技大学 机电工程与自动化学院 湖南 长沙 410073)

摘要 耦合系数会直接影响到偏振光经过耦合器熔锥区后的光能量分布,从而影响保偏光纤耦合器的耦合性能。基于光波导模式耦合理论,建立了熔锥型保偏光纤耦合器的耦合模型,推导出了适用于纤芯为圆型、偏振主轴非平行时保偏光纤耦合器的耦合系数计算公式,形式简单、应用方便。为耦合模方程的求解以及耦合器的性能分析提供了前提条件,从而为熔锥型保偏光纤耦合器的高性能制造提供了理论指导。

关键词 保偏光纤 耦合器 熔锥 耦合系数

中图分类号 :TN929.11 文献标识码 :A

Coupling Coefficient Analysis of Fused Polarization-maintaining Fiber Couplers

WANG Jin'e, ZHENG Yu, WU Yu-lie, LI Sheng-yi

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Coupling coefficient will directly influence the light distribution of linearly polarized light through the Fused-Tapered zone of Polarization Maintaining Fiber (PMF) couplers. Accordingly, it affects the coupling performance of the couplers. Coupling model of fused polarization-maintaining fiber couplers is built on the basis of coupling mode theory of optical waveguide. A new formula for coupling coefficient of PMF couplers has been derived. It is appropriate for any PMF when the core is circular and the birefringent axes are nonaligned. The conclusion of the research can provide the precondition to solve the coupled mode equation and analyze the performance of couplers. Therefore, theoretical direction for the high-performance manufacturing of PMF couplers is provided.

Key words polarization-maintaining fiber fiber coupler fused-taper coupling coefficient

熔锥型保偏光纤耦合器是各种军用干涉型传感器和相干光通信的关键器件,是构成高精度高性能光纤陀螺和水声器的基础元件之一^[1]。文献[2]对此类耦合器的耦合性能进行了报道,但仅限于两根光纤的偏振主轴平行。事实上由于制作工艺的高度敏感性,偏振主轴角度差是不可忽略的。文献[3,4]分析了偏振轴未对准时保偏光纤耦合器的一些特性,不过主要分析的是四个基模的传播常数以及电磁场分布。文献[5]对保偏光纤耦合器中偏振轴未对准时的耦合系数进行过分析,但是公式推导及解释不够明确。由于耦合系数会直接影响到偏振光经过耦合器熔锥区后的光能量分布,从而影响保偏光纤耦合器的耦合性能。本文基于光波导模式耦合理论,建立了熔锥型保偏光纤耦合器的耦合模型,推导出适用于圆芯型、偏振主轴非平行时保偏光纤耦合器的耦合系数计算公式,形式简单、应用方便。结果为进一步求解耦合模方程从而对耦合器的性能如消光比、模式耦合比等进行分析提供了条件。

1 耦合模型

熔锥型保偏光纤耦合器是基于缓变、非正规光波导横向耦合原理经过熔融拉锥工艺制造而成的^[6],其结构如图1所示。保偏光纤是特殊的单模光纤,其传输模为两个偏振方向互相垂直具有不同传输常数的基模 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y ^[7]。根据耦合模理论,在弱耦合条件下,耦合光纤系统的场是原来光纤 F_1 、光纤 F_2 单独存在时场的组合。即

* 收稿日期 2006-09-04

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50235040)

作者简介:王金娥(1978—),女,博士生。

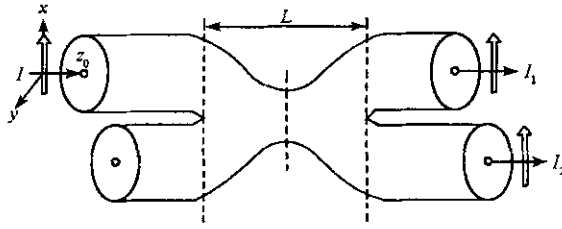


图1 熔锥型保偏光纤耦合器示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the fused PM fiber couplers

$$\left. \begin{aligned} E(x, y, z) &= \sum_p \sum_{m=1}^2 u_m^{(p)}(z) E_m^{(p)}(x, y) \\ H(x, y, z) &= \sum_p \sum_{m=1}^2 u_m^{(p)}(z) H_m^{(p)}(x, y) \end{aligned} \right\} p = x, y \quad (1)$$

上式说明光波导 F_1 和光波导 F_2 同时存在时,总的场已不是 $E_m^{(p)}$ 、 $H_m^{(p)}$ 的简单叠加。由于相互影响, $u_m^{(p)}(z)$ 作为 $E_m^{(p)}$ 的幅值随传输距离 z 而变化,从而由 $E_m^{(p)}$ 叠加形成的总场 E 也将随传播距离 z 变化。

两根保偏光纤耦合系统如图2所示,两光纤中心的连线为 O_1O_2 , 距离为 d 。它与光纤 F_1 的偏振主轴 x_1 轴夹角为 φ_1 , 与光纤 F_2 的偏振主轴 x_2 轴夹角为 φ_2 , 两光纤偏振主轴 x_1 与 x_2 的夹角为 φ_3 , 两者之间的关系为 $\varphi_2 = \varphi_1 + \varphi_3$ 。 C_m 为纤芯与包层的界面曲线。

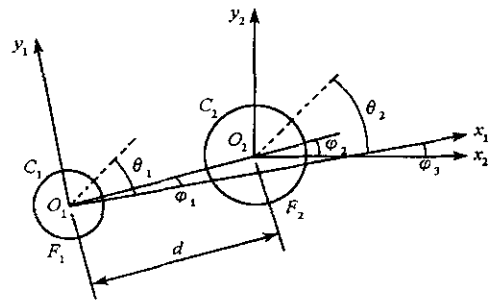


图2 保偏光纤耦合示意图

Fig. 2 Schematic illustration of the coupled PM fibers

根据弱导模式耦合理论有^[8]

$$\frac{dU(z)}{dz} - iB(z)U(z) = iK(z)U(z) \quad (2)$$

式中 $U(z)$ 为幅值向量, $B(z)$ 为传输常数矩阵, K 为耦合系数矩阵, 表达式如下

$$U(z) = [u_1^{(x)}(z) \ u_2^{(x)}(z) \ u_1^{(y)}(z) \ u_2^{(y)}(z)]^T \quad (3)$$

$$B(z) = \text{diag}[\beta_1^{(x)}(z) \ \beta_2^{(x)}(z) \ \beta_1^{(y)}(z) \ \beta_2^{(y)}(z)] \quad (4)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{11}^{(xx)} & K_{12}^{(xx)} & K_{11}^{(xy)} & K_{12}^{(xy)} \\ K_{21}^{(xx)} & K_{22}^{(xx)} & K_{21}^{(xy)} & K_{22}^{(xy)} \\ K_{11}^{(yx)} & K_{12}^{(yx)} & K_{11}^{(yy)} & K_{12}^{(yy)} \\ K_{21}^{(yx)} & K_{22}^{(yx)} & K_{21}^{(yy)} & K_{22}^{(yy)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

任意两模式间的耦合系数 K_{mn} 的表达式为

$$K_{mn}^{(pq)} = \int_{C_m} [E_m^{(p)} \times H_n^{*(q)} - H_m^{(p)} \times E_n^{*(q)}] \cdot dC_m, \quad m, n = 1, 2; p, q = x, y \quad (6)$$

式(6)积分是在产生 m 模式的光纤纤芯包层界面曲线上进行的, 但为矢量积形式, 应用不方便。对于圆芯型保偏光纤, 可选用圆柱坐标系, 求出各个耦合系数值, 给定初始条件, 求解耦合模方程即可求得任意模式在任意位置的幅度, 进而可得到耦合器的耦合比和消光比等性能参数。

2 耦合系数分析

结合熔锥型保偏光纤耦合器的对称性等特点, 耦合系数 K 有7个独立变量^[9, 10], 其相应关系如下:

$$K_{11}^{(xx)} = K_{11}^{(yy)}, \quad K_{22}^{(xx)} = K_{22}^{(yy)}, \quad K_{12}^{(xx)} = K_{21}^{(xx)} = -K_{12}^{(yy)} = -K_{21}^{(yy)} \quad (7)$$

$$K_{12}^{(xy)} = -K_{12}^{(yx)}, \quad K_{21}^{(xy)} = -K_{21}^{(yx)}, \quad K_{11}^{(xy)} = K_{11}^{(yx)} = K_{22}^{(xy)} = K_{22}^{(yx)}$$

基模 HE_{11} 的模式场由横向和纵向两部分组成, 保偏光纤 F_1 和 F_2 中基模组成分别为

$$F_1: HE_{11}^x: \{E_{1x}^{(x)} \ \rho \ E_{1z}^{(x)} \ \rho \ H_{1y}^{(x)} \ H_{1z}^{(x)}\}; HE_{11}^y: \{0 \ E_{1y}^{(y)} \ E_{1z}^{(y)} \ H_{1x}^{(y)} \ \rho \ H_{1z}^{(y)}\}$$

$$F_2: HE_{11}^x: \{E_{2x}^{(x)} \ \rho \ E_{2z}^{(x)} \ \rho \ H_{2y}^{(x)} \ H_{2z}^{(x)}\}; HE_{11}^y: \{0 \ E_{2y}^{(y)} \ E_{2z}^{(y)} \ H_{2x}^{(y)} \ \rho \ H_{2z}^{(y)}\}$$

将式(6)以光纤 F_m 为基础的柱坐标系 $r_m \theta_m z_m$ 转化,可得

$$dC_m = a_m d\theta_m, \quad m = 1, 2 \quad (8)$$

式中 a_m 为光纤 F_m 的半径。式(6)积分号内的矢量按 r_m 、 θ_m 、 z_m 三个方向分解,可以得到模场沿着半径方向 r_m 和沿着圆周方向 θ_m 以及纵向 z_m 的分量,于是

$$E_{mn}^{(p,q)} = \int_0^{2\pi} [(E_{mr}^{(p)} \times H_{nz}^{(q)*} + E_{mz}^{(p)} \times H_{nr}^{(q)*}) - (H_{mr}^{(p)} \times E_{nz}^{(q)*} + H_{mz}^{(p)} \times E_{nr}^{(q)*})] \cdot a_m d\theta_m \quad (9)$$

$$p, q = x, y; m, n = 1, 2$$

现以 $K_{21}^{(x,y)}$ 为例说明计算过程,根据式(9)有

$$K_{21}^{(x,y)} = \int_0^{2\pi} [(E_{2r}^{(x)} \times H_{1z}^{(y)*} + E_{2z}^{(x)} \times H_{1r}^{(y)*}) - (H_{2r}^{(x)} \times E_{1z}^{(y)*} + H_{2z}^{(x)} \times E_{1r}^{(y)*})] \cdot a_2 d\theta_2 \quad (10)$$

根据图2所示两保偏光纤角度之间的关系有: $H_{1z}^{(y)} = H_{1z}^{(y)}$, $E_{2z}^{(x)} = E_{2z}^{(x)}$, $E_{1z}^{(y)} = E_{1z}^{(y)}$, $H_{2z}^{(x)} = H_{2z}^{(x)}$, $E_{2r}^{(x)} = E_{2x}^{(x)} \cos\theta_2$, $H_{2r}^{(x)} = H_{2y}^{(x)} \sin\theta_2$, $H_{1r}^{(y)} = H_{1x}^{(y)} \cos(\theta_2 - \varphi_3)$, $E_{1r}^{(y)} = E_{1y}^{(y)} \sin(\theta_2 - \varphi_3)$, 代入式(10)可得:

$$K_{21}^{(x,y)} = \int_0^{2\pi} \{ [E_{2x}^{(x)} H_{1z}^{(y)} \cos\theta_2 + E_{2z}^{(x)} H_{1x}^{(y)} \cos(\theta_2 - \varphi_3)] - [H_{2y}^{(x)} E_{1z}^{(y)} \sin\theta_2 + H_{2z}^{(x)} E_{1y}^{(y)} \sin(\theta_2 - \varphi_3)] \} \cdot a_2 d\theta_2 \quad (11)$$

式中积分号内 $E_{2x}^{(x)}$ 、 $E_{2z}^{(x)}$ 、 $H_{2y}^{(x)}$ 和 $H_{2z}^{(x)}$ 均与 θ_2 无关,而 $E_{1y}^{(y)}$ 、 $E_{1z}^{(y)}$ 、 $H_{1x}^{(y)}$ 和 $H_{1z}^{(y)}$ 因为与 a_1 有关,且 $r_1^2 = d^2 + a_2^2 - 2a_2 d \cos(\theta_2 - \varphi_2)$, 所以与 θ_2 有关, d 为两纤芯中心距。

其他偏振模之间的耦合系数均可用同样的方法导出。

$$K_{11}^{(x,x)} = K_{11}^{(x,y)} = K_{22}^{(x,x)} = K_{22}^{(x,y)} = 0 \quad (12)$$

$$K_{12}^{(x,x)} = \int_0^{2\pi} \{ [E_{1x}^{(x)} H_{2z}^{(x)} \cos\theta_1 + E_{1z}^{(x)} H_{2y}^{(x)} \sin(\theta_1 + \varphi_3)] - [H_{1y}^{(x)} E_{2z}^{(x)} \sin\theta_1 + H_{1z}^{(x)} E_{2x}^{(x)} \cos(\theta_1 + \varphi_3)] \} \cdot a_1 d\theta_1 \quad (13)$$

$$K_{12}^{(x,y)} = \int_0^{2\pi} \{ [E_{1x}^{(x)} H_{2z}^{(y)} \cos\theta_1 + E_{1z}^{(x)} H_{2x}^{(y)} \cos(\theta_1 + \varphi_3)] - [H_{1y}^{(x)} E_{2z}^{(y)} \sin\theta_1 + H_{1z}^{(x)} E_{2y}^{(y)} \sin(\theta_1 + \varphi_3)] \} \cdot a_1 d\theta_1 \quad (14)$$

式(11)~(14)即为圆芯型、偏振主轴非平行时保偏光纤耦合器的耦合系数计算公式。如果 x_1 和 x_2 同轴,即 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0$, 也即两保偏光纤对轴结束成理想状态,不存在角度偏差,如图3所示。可以对上述的式(11)、(13)、(14)进行简化。

保偏光纤是特殊的单模阶跃光纤,场的分布表现为 Bessel 函数^[7],即电磁场在纤芯中的分布用第一类 Bessel 函数描述,在包层中则用第二类变型 Bessel 函数来描述。所以式(11)、(13)、(14)涉及到 Bessel 函数的积分。从式(11)~(14)还可以看出,两个不同偏振方向的模式之间的耦合必须考虑纵向分量。

3 结束语

在保偏光纤耦合器制作过程中,两根保偏光纤偏振主轴不可能达到完全的平行,总会成一定的角度(可能会有 $1^\circ \sim 3^\circ$ 的偏差),从而分析当二者成一定角度时的耦合系数变得非常重要。文章基于光波导模式耦合理论,导出了适用于圆芯型、偏振主轴非平行时保偏光纤耦合器的耦合系数计算公式。但是要对保偏光纤耦合器的制造真正起到指导作用,还需要进一步的研究。尤其是耦合系数表达式导出后,需要求解耦合模方程得到幅值向量,从而得到偏振光经过耦合器后的光功率分布,继而可以求得耦合比、消光比以及一定耦合比下的拉锥长度等性能参数,才能够指导保偏光纤耦合器的高性能熔融拉锥工艺制造。

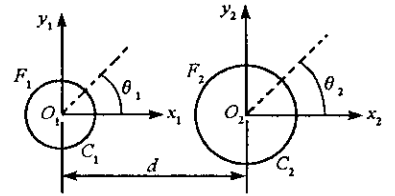


图3 偏振主轴平行时的耦合
Fig. 3 Coupling when the birefringent axes parallel

参考文献：

- [1] 陈伟,李诗愈,成煜. 保偏光纤技术进展及发展趋势[J]. 光通信研究, 2003(6) 54 - 57.
- [2] Yue W P. On the Different Formulations of the Coupled-Mode Theory for Parallel Dielectric Waveguide[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12 82 ~ 85.
- [3] Shafir E, Hardy A, Tur M. Polarization-Maintaining Fiber Couplers with Misaligned Birefringent Axes[J]. Electronics Letters, 1988, 24 (12) 754 - 756.
- [4] Snyder A W, Stevenson A. Anisotropic Fiber Couplers with Nonaligned Optical Axes[J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(3) : 450 - 462.
- [5] 严秀红,梁毅,简水生. 保偏光纤耦合器中偏振轴未对准时的耦合系数[J]. 光通信技术, 1995, 19(2) : 110 - 115.
- [6] 李玉权,崔敏. 光波导理论与技术[M]. 北京 : 人民邮电出版社, 2002 92 - 156.
- [7] 陈哲,胡永明,李秀娟. 熊猫光纤的结构与双折射特性关系研究[J]. 光子学报, 2000, 29(12) : 1127 ~ 1130.
- [8] Snyder A W, Love J D. Optical Waveguide Theory[M]. London : Chapman and Hall Ltd, 1983 658 - 690.
- [9] 酆达,李铮,唐丹. 熔锥型单模光纤耦合器的模型[J]. 光子学报, 2003, 32(11) : 1316 ~ 1320.
- [10] Hiroyuki T, Mikio Y, Takeshi Y, et al. Manufacturing Method for Polarization Maintaining Optical Fiber Couplers[P]. US Patent 5024501, Jun. 18, 1991.

(上接第 112 页)

参考文献：

- [1] Kleijnen J P C, Sargent R G. A Methodology for Fitting and Validating Metamodels in Simulation[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 120 (1) : 14 - 29.
- [2] 杨峰. 面向效能评估的平台级体系对抗仿真跨层次建模方法研究[D]. 长沙 : 国防科技大学 2003.
- [3] Johnson K E, Bauer K W, Moore JR J T, et al. Metamodelling Techniques in Multidimensional Optimality Analysis for Linear Programming [J]. Math. Comput. Modelling, 1996, 23(5) 45 - 60.
- [4] Li J P, Bai F S, Zhang W, et al. Metamodel Method of Optimality Analysis for Linear Programming under the Right-Hand-Side Vectors Partially Alterable[J]. Journal of Information & Computational Science, 2006, 3(3) 477 - 486.
- [5] Jin R, ChenWei, Simpson T. Comparative Studies of Metamodeling Techniques Under Multiple Modeling Criteria[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 23(1) : 1 - 13.
- [6] Shin M, Sargent R G. Gaussian Radial Basis Functions for Simulation Metamodeling[C]//Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference 483 - 488.
- [7] Nasereddin M, Mollaghasemi M. The Development of a Methodology for the Use of Neural Networks and Simulation Modeling in System Design[C]//Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, 1999 : 537 - 542.
- [8] Madu C N. A Fuzzy Theoretic Approach to Simulation Metmodelling[J]. Appl. Math. Lett., 1995, 8(6) 35 - 41.
- [9] Hussain M F, Barton R R, Joshi S B. Metamodeling : Radial Basis Functions, Versus Polynomial[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 138 142 - 154.
- [10] Fang H, Rasis-Rohani M, Liu Z, Horstemeyer M F. A Comparative Study of Metamodeling Methods for Multiobjective Crashworthiness Optimization[J]. Computer & Structures 2005(83) 2121 - 2136.
- [11] 谢政,李建平,汤泽滢. 非线性最优化[M]. 长沙 : 国防科技大学出版社 2003.

