

# 保偏光纤的连接损耗和消光比分析

李志高 石文江 黄尚廉

(重庆大学光电精密仪器系, 重庆 630044)

**摘 要** 采用模式分析法处理两保偏光纤在连接中各种几何不对准误差引起的损耗和消光比的计算问题, 给出了数值求解的结果。该结论对保偏光纤的连接、熔接和耦合等具有一定的指导意义。

**关键词** 保偏光纤, 连接损耗, 连接消光比。

保偏光纤(PMF)具有高双折射率, 因而能使与其偏振主轴一致的方向入射的偏振光保持其偏振性, 其传输模为两个偏振方向互相垂直的基模  $HE_{11}$  和  $HE_{11}$ , 它们分别具有传输常数  $\beta_x$  和  $\beta_y$ , 因而并不简并。随着科学技术的发展, 保偏光纤在相干光通信、光纤陀螺和光纤传感等领域中得到越来越广泛的应用, 而在所有这些应用中, 光纤的连接必不可少。将两根保偏光纤连接起来, 希望连接处对光纤性能的影响尽可能小, 这时至少对两个参数提出了要求: 传输损耗和消光比。前者表征了连接引起的光纤传输能量的损失大小, 后者表征了连接引起的光纤保持偏振能力的下降程度。影响这两个参数的因素包括: 两被连接光纤间的几何不对准、光纤的端面质量、两被连接光纤间的参数不匹配和两光纤之间的介质折射率。本文将模式分析法<sup>[1]</sup>为基础对光纤的几何不对准的影响进行讨论。目前有关单模光纤连接理论的分析研究已被广泛报道<sup>[2~5]</sup>, 但对保偏光纤的连接问题, 尚处于探索阶段。

## 1 数学模型

在分析中, 考虑同种光纤的连接问题。为了简化分析, 假定: 1) 被连接的两光纤之间充满折射率匹配液, 因而可以不考虑光纤端面的折射和反射; 2) 光纤的形状是理想的, 不考虑光纤制造引起的形状误差的影响, 即不考虑光纤本身的损耗和消光。

图 1 表明了两根光纤连接前的相对位置, 分别用  $t_x$  ( $x$  方向的偏移)、 $t_y$  ( $y$  方向的偏移)、 $d$  (二光纤之间的距离)、 $\varphi$  ( $x$  方向的倾角)、 $\psi$  ( $y$  方向的倾角) 和  $\theta$  ( $z$  方向的倾角) 表示两光纤六个自由度的几何偏差。采用的模式分析法的思想是: 假定光纤 I 作为一个发射光源而光纤 II 作为受激发的光纤, 其正交偏振基模  $HE_{11}$  和  $HE_{11}$  分别被来自光纤 I 中的偏振光所激发, 并作为光纤 II 中

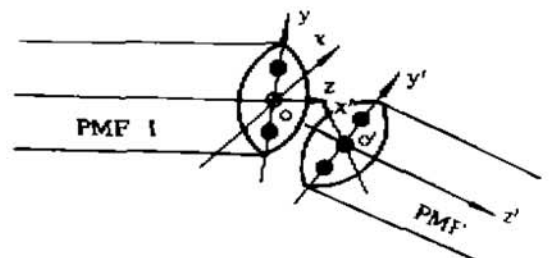


Fig. 1 Scheme for the relative orientation of two PMFs connection

的仅有的两个传输模向前传播。

按照 Kazuya Hayata 等人和 Chin-Lin Chen 各自独立的分析<sup>[6, 7]</sup>, 保偏光纤的两正交基模在纤芯附近区域是贝塞尔分布, 但在不特别严格的条件下, 可近似为高斯分布, 而且两模的横向光强分布可以认为是相同的。为了分析方便, 假设光纤 I 中只有两正交基模之一传输, 如  $HE_{11}$  (其偏振方向为  $x$  轴向)。由于  $HE_{11}$  的  $E_x$  分量 (或对应的  $H_y$  分量) 比其  $E_y$  分量 (或对应的  $H_x$  分量) 强得多, 因此进一步简化, 认为  $HE_{11}$  模只包含  $E_x$  分量和对应的  $H_y$  分量, 而忽略  $E_y$  和  $H_x$ 。这样光纤 I 中传输模的模场表达式可用标量形式表示为:

$$E_x(x, y, z, t) = E_0 A(x, y) B(t) \exp(j\beta_x z). \quad (1)$$

式中  $E_0$  为场的电矢量幅度,  $A(x, y)$  为场的横向分布,  $B(t)$  为场的时变因子,  $\beta_x$  为  $HE_{11}$  模的传输常数。由上述分析可认为场的横向分布为圆形高斯场, 即

$$A(x, y) = \exp[-(x^2 + y^2)/\omega_R^2]. \quad (2)$$

式中  $\omega_R$  是模场半径 (MFR), 且  $\omega_R/a \approx 1.3$ ,  $a$  是保偏光纤的纤芯半径。模场的时变分量为<sup>[8]</sup>:

$$B(t) = \int_0^{\infty} B(\omega) \exp[j(\omega - \bar{\omega})t] d\omega. \quad (3)$$

其中  $B(\omega)$  为光纤中传输光的频谱,  $\bar{\omega}$  为平均角频率。由于光纤中一般采用准单色光或激光传输, 有  $|\omega - \bar{\omega}| \ll \bar{\omega}$ , 因而

$$B(t) = \exp(-j\bar{\omega}t). \quad (4)$$

这样 (1) 式成为:

$$E_x(x, y, z, t) = E_0 \exp[-(x^2 + y^2)/\omega_R^2] \exp[-j(\bar{\omega}t - \beta_x z)] \quad (5)$$

由于常用的 Panda 型和 Bow-tie 型保偏光纤的偏振模色散很小<sup>[9]</sup>, 而且色散效应对连接的影响不大, 因而不考虑色散效应的影响, 因此引起损耗和消光比变化是场的振幅, 而与相位无关。在后面的分析中, 以场的振幅来表示场  $E_x(x, y, z, t)$ :

$$E_x(x, y) = E_0 \exp[-(x^2 + y^2)/\omega_R^2]. \quad (6)$$

该高斯光束沿轴向传输距离  $d$  后到达光纤 I 的端面, 这时其模场变为<sup>[10]</sup>:

$$E_{x_2}(x, y) = E_0 (\omega_R/\omega_L) \exp[-(x^2 + y^2)/\omega_L^2], \quad (7)$$

而

$$\omega_L = \omega_R [1 + (2d/n_2 k_0 \omega_R^2)^2]^{1/2}. \quad (8)$$

式中  $\omega_L$  为高斯光束传输距离  $d$  后的模场半径,  $n_2$  为光纤包层折射率 (即折射率匹配液的折射率),  $k_0$  为传输光的真空波数。假定该光束仍为沿  $x$  方向的线偏光 (这是因为  $d$  很小, 只有光波长数量级)。在光纤端面上的该光束将激励光纤 I 的传导模  $HE_{11}$  和  $HE_{11}$ 。由于两光纤几何不对准的影响, 入射的线偏振光依照光纤的两偏振主轴方向  $x'$  和  $y'$  分解成两正交线偏振光  $E_{x'_2}(x, y)$  和  $E_{y'_2}(x, y)$ , 而且它们分别激发各自对应方向上的偏振基模  $HE_{11}$  和  $HE_{11}$ , 其中小部分能量被激发成光纤 I 的包层模而损失掉。

### 3 连接损耗分析

连接损耗定义为: 
$$\alpha = -10 \lg T. \quad (9)$$

式中  $T$  为连接时导模能量从光纤 I 传到光纤 II 时的传输率,  $\alpha$  的单位为 dB。

由上节分析, 连接时能量传输率为:

$$T = \frac{\left[ \iint_S |E_{r_2}(x, y) E_r(x', y')| dx' dy' \right]^2 + \left[ \iint_S |E_{r_2}'(x, y) E_r'(x', y')| dx' dy' \right]^2}{\left[ \iint_S |E_r(x, y)|^2 dx dy \right]^2} \quad (10)$$

$$\text{其中} \quad \left. \begin{aligned} E_{r_2}'(x, y) &= E_{r_2}(x, y) \cos \theta = E_0 (\omega_R/\omega_L) \exp[-(x^2 + y^2)/\omega_L^2] \cos \theta, \\ E_{r_2}(x, y) &= E_{r_2}(x, y) \sin \theta = E_0 (\omega_R/\omega_L) \exp[-(x^2 + y^2)/\omega_L^2] \sin \theta, \\ E_r(x', y') &= E_0 \exp[-(x'^2 + y'^2)/\omega_R^2], \\ E_r'(x', y') &= E_0 \exp[-(x'^2 + y'^2)/\omega_R^2], \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将(11)式代入(10)式, 得:

$$T = \left[ \iint_S |E_{r_2}(x, y) E_r(x', y')| dx' dy' \right]^2 / \left[ \iint_S |E_r(x, y)|^2 dx dy \right]^2 \quad (12)$$

$$\text{令} \quad T = (T_r/T_s)^2, \quad (13)$$

$$\text{其中:} \quad T_s = \iint_S |E_r(x, y)|^2 dx dy = \iint_S E_0^2 \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega_R^2}\right] dx dy = \frac{\pi}{2} E_0^2 \omega_R^2 \quad (14)$$

上式中将积分区间从包层扩展到无穷大, 是由于考虑到包层直径比高斯光束的束腰直径大很多倍(一至两个数量级), 呈指数衰减的高斯光束在包层外已趋于零, 因此, 这种近似所引起的计算误差是很小的。

$$\begin{aligned} \text{而} \quad T_r &= \iint_S |E_{r_2}(x, y) E_r(x', y')| dx' dy' \\ &= E_0^2 \frac{\omega_R}{\omega_L} \iint_S \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_L^2}\right) \exp\left(-\frac{x'^2 + y'^2}{\omega_R^2}\right) dx' dy'. \end{aligned} \quad (15)$$

对(15)式的积分, 需将坐标  $x, y$  转换成坐标  $x', y'$ , 为此进行平面坐标的旋转和平移, 得到:

$$x = x'/\cos \psi + t_x, \quad y = y'/\cos \varphi + t_y \quad (16)$$

将(16)式代入(15)式, 得到:

$$T_r = E_0^2 \frac{\omega_R}{\omega_L} \iint_S \exp\left[-\frac{(x'/\cos \psi + t_x)^2 + (y'/\cos \varphi + t_y)^2}{\omega_L^2}\right] \exp\left(-\frac{x'^2 + y'^2}{\omega_R^2}\right) dx' dy'. \quad (17)$$

上式中的积分计算, 用辛普生数值求积法求得各参数下的积分值, 并由(13)、(14)和(17)式得到各参数变化时的损耗  $\alpha$  的大小, 如表 1~3 所示。需要说明的是, 由于认为保偏光纤中  $HE_{11}$  和  $HE_{11}$  的模场分布是近似一致的, 因而对于沿  $x$  轴和  $y$  轴的平动  $t_x, t_y$ , 它们对损耗的影响程度是一样的。为简化分析, 在计算时考虑取两种偏差同步变化的情形, 即取  $t_x = t_y$ 。对角度偏差  $\varphi$  和  $\psi$ , 也是同样考虑的。

Table 1. Influence of axial distance ( $d$ ) on loss ( $\alpha$ )

(parameters:  $\omega_R = 3.0 \mu\text{m}$ ,  $n_2 = 1.46$ ,  $\lambda_0 = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $\varphi = \psi = 1^\circ$ ,  $\theta = 1^\circ$ ,  $t_x = t_y = 0.15 \mu\text{m}$ )

$d$ ( $\mu\text{m}$ )	5.0	4.0	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.2
$\alpha$ (dB)	0.130	0.089	0.062	0.050	0.040	0.033	0.027	0.024	0.023

Table 2. Influence of offset ( $t_x, t_y$ ) on loss ( $\alpha$ )

(parameters:  $\omega_R = 3.0 \mu\text{m}$ ,  $n_2 = 1.46$ ,  $\lambda_0 = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $\varphi = \psi = 1^\circ$ ,  $\theta = 1^\circ$ ,  $d = 1 \mu\text{m}$ )

$t_x$ or $t_y$ ( $\mu\text{m}$ )	0.50	0.40	0.30	0.20	0.15	0.12	0.10	0.08	0.05
$\alpha$ (dB)	0.247	0.160	0.092	0.044	0.027	0.020	0.015	0.011	0.008

Table 3. Influence of tilt ( $\varphi$  and  $\psi$ ) on loss ( $\alpha$ )(parameters:  $\omega_R = 3.0 \mu\text{m}$ ,  $n_2 = 1.46$ ,  $\lambda_0 = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $t_x = t_y = 0.15 \mu\text{m}$ ,  $\theta = 1^\circ$ ,  $d = 1 \mu\text{m}$ )

$\varphi$ or $\psi$ (deg.)	5.0	4.0	3.0	2.0	1.5	1.0	0.8	0.5	0.3
$\alpha$ (dB)	0.059	0.047	0.038	0.031	0.029	0.027	0.026	0.026	0.025

#### 4 连接消光比分析

在理想对准情况下, 光纤 I 的  $\text{HE}_{11}$  模只激发光纤 I 中对应的偏振基模  $\text{HE}_{11}$ 。由于几何不对准, 致使光纤 I 中的两个偏振基模都被激发出来, 从而在保偏光纤中传输的光束不再是线偏振光而是一定程度的椭圆偏光, 即由于连接导致了光纤的保偏性能下降, 该指标以消光比表征, 定义为:

$$\eta = 10 \lg \gamma \quad (18)$$

式中  $\gamma$  为连接时引起的被耦合基模  $\text{HE}_{11}$  的能量与另一基模  $\text{HE}_{11}$  的能量的比值。由上节分析知  $\gamma$  应为:

$$\gamma = \left[ \iint_S |E_{r_2}(x, y) E_r(x', y')| dx' dy' \right]^2 / \left[ \iint_S |E_{r_1}(x, y) E_r(x', y')| dx' dy' \right]^2 \quad (19)$$

将(11)式代入(19)式, 得

$$\gamma = \text{tg}^2 \theta \quad (20)$$

将(20)式代入(18)式, 得

$$\eta = 20 \lg (\text{tg} \theta) \quad (21)$$

由上式求得消光比随两保偏光纤的偏振轴不对准偏差  $\theta$  的变化曲线如图 2 所示。

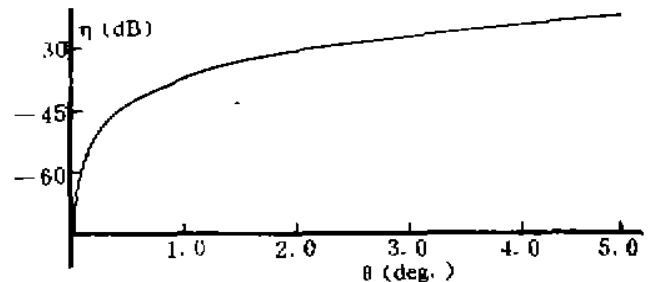


Fig. 2 Influence curve on extinction ratio due to disalignment of polarization axis of two PMFs

#### 5 结 论

从以上分析结果可以看出, 在两光纤间的各种几何不对准中, 两光纤轴向间距  $d$ 、光纤倾斜  $\varphi$  和  $\psi$  以及光纤偏移  $t_x$  和  $t_y$  的影响, 使光纤由于连接产生了附加损耗, 而由于两光纤的偏振主轴不对准误差  $\theta$  使光纤连接产生了附加的消光比, 从而其保偏性能下降, 这都是针对将一整根光纤切断后再连接而言的。

保偏光纤的熔接是保偏光纤连接的主要形式之一。在熔接过程中, 由于高压放电产生的高温使两光纤熔接端产生一段熔融区, 在冷却后两光纤便永久性地连接在一起。随着对准情况和熔接放电情况的不同, 这段熔融区的影响范围从几十微米至几百微米。在这段范围内, 保偏光纤的波导结构将在一定程度上被破坏, 这必将引起光纤损耗和消光比性能的下降。对此作精确的理论分析需采用微扰理论, 这种分析方法已由 W. Zheng<sup>[1, 12]</sup> 在单模光纤熔接中加以应用。对保偏光纤, 需综合考虑纤芯、应力区和包层的微变形情况, 这是极其困难而繁琐的。本文所作的分析对保偏光纤的熔接虽然不十分精确, 但在一定的精度范围内并适当地考虑熔接的具体情况, 仍然是成立的。对于作者正在研制的保偏光纤熔接机(航天部重点基金项目), 所要求的设计指标为: 对同种保偏光纤(主要是指 Panda 型光纤), 损耗 0.05 dB, 消光比 -30 dB。考虑到熔接中放电的影响以及纤芯和应力区在高温熔化后的特性变化都将影响熔接损耗和消光比参数, 因而在熔接机的设计中各几何不对准参数取值为:  $t_x, t_y \leq 0.15$

$\mu\text{m}$ ,  $\varphi, \psi \leq 1^\circ$ ,  $d \leq 1 \mu\text{m}$ ,  $\theta \leq 1^\circ$ . 这样由本文的分析知, 几何不对准引起的连接损耗  $\alpha \leq 0.027 \text{ dB}$ . 消光比  $\eta \leq -35.1 \text{ dB}$ . 考虑其它因素的综合影响后, 认为将能满足整机的设计要求。

本文以保偏光纤的基模特征分析为基础, 应用光纤轴向耦合的模式分析法, 得出了各种几何不对准参数对保偏光纤连接中两个主要参数——损耗和消光比的影响的具体表达式和数值关系, 对保偏光纤的连接、耦合和熔接都有指导意义, 已应用在保偏光纤熔接机的设计中。

### 参 考 文 献

- [1] 叶培大, 吴彝尊, 光波导技术基本理论, 北京, 人民邮电出版社, 1981, 391~409
- [2] D. Matcuse, Loss analysis of single-mode fiber splices. *Bell Syst. Tech. J.*, 1977, 58(5): 703~715
- [3] W. A. Gambling, H. Matsumura, A. O. Cowley, Jointing loss in single-mode fibers. *Electro. Lett.*, 1978, 14: 54~55
- [4] 黄尚廉, 石文江, 饶云江, 单模光纤连接损耗研究. *光子学报*, 1994, 23(2): 127~133
- [5] 黄尚廉, 石文江, 李平等, 单模光纤熔接损耗分析及自动对准与熔接系统. *仪器仪表学报*, 1994, 15(2): 124~129
- [6] Kazuya Hayata, Masanori Koshiha, Michio Suzuki, Vectorial wave analysis of stress-applied polarization-maintaining optical fibers by the finite-element method. *J. Lightwave Technology*, 1986, LT-4(2): 133~139
- [7] Chin-Lin Chen, An analysis of high birefringence fibers. *J. Lightwave technology*, 1987, LT-5(1): 53~69
- [8] Yasuyuki Kato, Fusion splicing of polarization perserving fibers. *Appl. Opt.*, 1985, 24(15): 234~240
- [9] Katsunari Okamoto, Toshihito Hosaka, Yutaka Sashki, Linearly single polarization fibers with zero polarization model dispersion. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, QE-18(4): 496~503
- [10] 伍长征, 王兆和, 陈凌冰等, 激光物理学. 上海, 复旦大学出版社, 1988, 98~101
- [11] Wenxin Zheng, Loss estimation for fusion splices of single-mode fibers. *Proc. SPIE*, 1991, 1580: 380~390
- [12] Wenxin Zheng, Real time control of arc fusion for optical fiber splicing. *J. Lightwave Tech.*, 1993, 11(4): 548~553

## Analysis of Connection Loss and Extinction Ratio of Polarization-Maintaining Fibers

Li Zhigao      Shi Wenjiang      Huang Shanglian

(Department of Optoelectronic Precision Instruments, Chongqing University, Chongqing 630044)

(Received 31 July 1994; revised 27 January 1995)

**Abstract** This paper deals with the calculation of the additional loss and the additional extinction ratio caused by the alignment error in connection of two polarization maintaining fibers (PMF) using mode analysis method. The corresponding mathematical model and the calculated results are presented. The results are useful for the design of connecting, fusion splicing and coupling of PMFs.

**Key words** polarization-maintaining fiber, connection loss, connection extinction ratio.

# 同心椭圆度光纤的耦合系数计算

王黎蒙 严润生

(电子工业部上海传输线研究所检测中心, 上海 200437)

**摘 要** 应用耦合模原理, 用 Mathieu 函数表示纤芯、包层为同心椭圆度的光纤中的电磁场, 在适当近似条件下, 求得了基模场中的偶模耦合系数表示式, 并给出了截止条件下的离心率~耦合系数, 半长轴~耦合系数曲线。

**关键词** 椭圆光纤, 耦合系数。

光纤 耦合模 TN 253

随着以多媒体技术和光缆传输为核心的“信息高速公路”的兴起, 光纤技术在相干光通信, 集成光学, 光传感技术, 光信息处理和光计算机等各领域得到了广泛使用。应用非圆光波导几何形状的不完全对称性所产生的丰富多彩的物理特性和应力结构特征制造光纤器件, 成为近几年来系统、深入研究的一个热点<sup>[1]</sup>。非轴对称结构有多种形式, 如椭圆型, 熊猫型, 领结型, 边坑型, 边隧道型, D 型, 条型以及其它特种设计的形状等。其中椭圆型光纤因生产工艺规程要求简单、可靠, 而被人们所偏爱, 成为利用最广泛的保偏光纤之一<sup>[2]</sup>。在众多的光纤器件中, 有相当一部分要考虑光的耦合效应(如光耦合器, 光纤传感器, 集成光学器件等), 因此讨论光波在椭圆光纤间的耦合问题既有理论意义, 又有实用价值。本文采用耦合模理论, 以同心椭圆度阶跃光纤为对象, 分析讨论其耦合问题, 计算对实际耦合元件有决定作用的耦合系数。

## 1 光纤中的电磁场和截止频率

椭圆光纤中的标量场分布, 有多种方法可以求解, 如微扰法<sup>[3]</sup>, 摄动法, Mathieu 函数法<sup>[4~6]</sup>, 数值解法等, 本文采用 Mathieu 函数方法。同心椭圆光纤的波导结构参数, 如图 1 所示。在正椭圆柱坐标系  $(\zeta, \eta, z)$  中, 可以写出标量亥姆霍茨 (Helmholtz) 方程<sup>[4~6]</sup>:

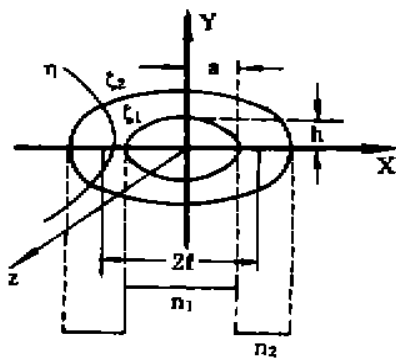


Fig. 1 The ellipsoidal coordinate system

$$\left\{ \frac{4}{f^2 (\operatorname{ch} 2\zeta - \cos 2\eta)} \left( \frac{\partial^2}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + n^2 k_0^2 \right\} \psi = 0. \quad (1)$$

式中  $f$  为半焦距,  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ , 波函数  $\psi = \begin{pmatrix} E \\ H \end{pmatrix}$ , 应用分离变量法, 可得二个 Mathieu 方程, 求解得电磁场的纵向分量为: