

# 单模光纤耦合率的计算分析\*

傅思镜 傅颖军 梁丽贞

(中山大学物理学系, 广州 510275)

**摘要** 分别对 2 根对称单模光纤耦合率与其数值孔径、最小间距、弯曲半径、垂直偏移等参量的响应特性作了计算, 对计算结果作了扼要分析, 为用户制作优质光纤耦合器提供了依据和方便的计算数据.

**关键词** 单模光纤, 耦合率

**分类号** TP 391, O 436, TN 25

用理论演算与工程数据相结合的方法计算两根对称单模光纤耦合率与其使用光波长响应特性, 可避免解超越方程时而费时复杂的计算, 能快捷获得较精确的计算结果<sup>[1]</sup>. 在此基础上, 分别对两根对称单模光纤耦合率 ( $Z$ ) 与其数值孔径 ( $d_n$ )、最小间距、弯曲半径、垂直偏移等参量的响应特性作了计算, 对计算结果作了扼要分析. 这一工作为用户制作优质光纤耦合器提供了依据和方便的计算数据, 尤其对解决当前光纤通信紧迫的扩容问题——众所关注的热点高科技研究课题——制作 WDM (波分复用) 系统的低成本、低插入损耗、低串扰、高密度信道的光纤分波 (合波) 器的研究具有重要的现实意义.

## 1 计算方法简述

讨论两根弯曲单模光纤耦合的情况.

参数相同的两根互相平行的单模光纤的位置关系如图 1 所示.

设定两光纤最接近处  $z=0$ , 其距离为  $h_0$ , 随着  $z$  的变化, 两光纤的轴线间距离  $h(z)$  不断变化, 两光纤的弯曲半径为  $R$ .

两根光纤沿互作用区域光功率的分布为

$$P_1 = P_0 \cos^2 C \quad P_2 = P_0 \sin^2 C \quad (1)$$

其中,  $P_0$  是  $z=0$  时激发进光纤 1 中的光功率,  $P_1$  和  $P_2$  分别为沿互作用区域 2 条光纤中的功率,  $C$  是 2 条单模光纤  $HE_{11}$  模式的耦合系数,  $C$  的数值

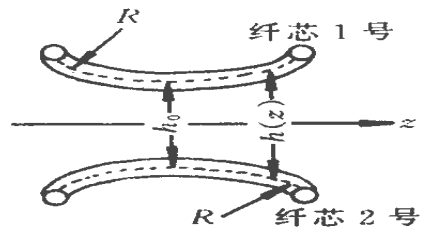


图 1 光纤耦合器中两纤芯的位置  
Fig. 1 The location of two fiber cores  
in the optical fiber coupler

\* 广东省自然科学基金 (960025) 资助项目

收稿日期: 1998-02-09 傅思镜, 男, 52岁, 副教授

与 2 个模式场分布的空间重叠有关<sup>[2]</sup>, 为

$$C = \frac{-kX}{4P_0} \iint_{-\infty}^{+\infty} (n^2(x, y) - n_2^2) E_1^* \cdot E_2 dx dy \quad (2)$$

式中,  $n(x, y)$  是光纤纤芯折射率分布,  $n_2$  是包层或周围折射率匹配物质的折射率,  $E_1$  和  $E_2$  是相互作用的 2 个模式的场分布,  $k$  是光信号的角频率.

对于弱导型阶跃折射率分布的单模光纤, 上式的计算结果为<sup>[3]</sup>

$$C = \frac{\lambda^{-2} K_0(Wh(z)) / a}{2n_1 (Va)^2 K_1^2(W)} \quad (3)$$

式中,  $a$  是纤芯半径,  $n_1$  是纤芯折射率,  $\lambda$  是传输光波长,  $K_v(x)$  是第二类虚宗量贝塞尔函数,  $V$  是光纤的归一化频率,  $V^2 = U^2 + W^2$ .

由图 1, 对于  $z \ll R$  的情况,  $h(z)$  可近似为

$$h(z) = [(h_0 + z^2/R)^2 + Y^2]^{1/2} \quad (4)$$

式中,  $R$  是光纤轴线的弯曲半径,  $Y$  是 2 条光纤垂直纸面的位移.

要确定  $W$  (或  $U$ ) 需解基模  $HE_{11}(LR_0)$  的本征值方程

$$U \frac{J(U)}{J_0(U)} = W \frac{K_1(W)}{K_0(W)} \quad (5)$$

(5) 式是一超越方程, 需很复杂的数值计算, 于实际工程应用不便, 故工程计算常采用如下近似式<sup>[4]</sup>

$$W \approx 2.748 \lambda_c \lambda_0 - 0.9960$$

$\lambda_c = \pi a d_n / 1.202$ ,  $\lambda_0 \lambda_c = 2.405 / V > 1$  (单模传输条件);  $U = (V^2 - W^2)^{1/2}$  ( $1 < V < 3$  范围内误差不过 1%). 式中,  $\lambda_c$  是单模光纤的截止波长,  $d_n$  是光纤的数值孔径,  $d_n = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ .

由于耦合长度和  $z$  有关, 所以定义有效作用长度  $L_e$  由下式决定

$$C_0 L_e = \int_{-\infty}^{+\infty} C(z) dz \quad (6)$$

利用变型贝塞尔函数  $K_v(x)$  的大宗量近似式, 可得

$$L_e = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{h_0}{h(z)} \right]^{1/2} \exp \left\{ \frac{-W[h(z) - h_0]}{a} \right\} dz \quad (7)$$

根据以上分析, 可得光耦合器的功率转换为  $P_1 = P_0 \cos^2(C_0 L_e)$ ,  $P_2 = P_0 \sin^2(C_0 L_e)$ . 所以, 耦合器的耦合效率为  $Z = P_2 / P_0 = \sin^2(C_0 L_e)$ .

## 2 计算结果及分析

典型参量值情况下, 可得  $Z$  与  $d_n$  的响应曲线 (图 2a),  $Z$  与  $h_0$  的响应曲线 (图 2b),  $Z$  与  $R$  的响应曲线 (图 2c),  $Z$  与  $y$  的响应曲线 (图 2d).

根据计算结果, 分析如下:

(1) 根据 1984 年通过的国际电报电话咨询委员会 G-651 建议<sup>[5]</sup>, 通信光纤的数值孔径  $d_n$  应为  $(0.18 \sim 0.24) \pm 0.02$ . 在这一范围内,  $d_n = 0.1600$  和  $0.2088 \sim 0.2091$  附近有  $Z \approx 1$  或  $Z \approx 0$  的大值点 (图 2a), 在  $d_n = 0.1823 \sim 0.1827$  和  $0.2393 \sim 0.2398$  附近有  $Z \approx 0$  或  $Z \approx 1$  的小值点.

(2) 当两根单模光纤紧靠 ( $h_0 = 9 \mu\text{m}$ ) 时和  $h_0 = 10.126 \sim 10.139 \mu\text{m}$  附近有  $Z \approx 1$  或  $Z \approx 0$  的大值点, 在  $h_0 = 9.415 \sim 9.422 \mu\text{m}$  附近和  $h_0 > 13.5 \mu\text{m}$  有  $Z \approx 0$  或  $Z \approx 1$  小值点. 从图 2b 可见光纤耦合器的最近距离有耦合率接近零的限制点和限制范围.

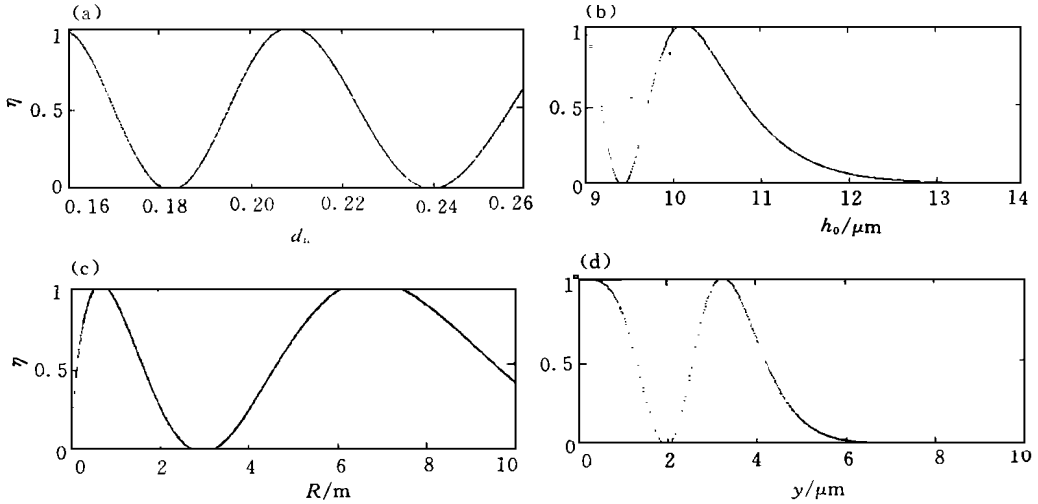
图 2  $Z$ 与各参数的响应曲线

Fig. 2 The response curves of coupling efficiency versus respective parameter

$$a = 4.5 \mu\text{m}, h_0 = 9.0 \mu\text{m}, n_1 = 1.460, R = 6.8 \text{ m}, y = 0, d_n = 0.209$$

(3) 在  $R = 0.731 \sim 0.750 \text{ m}$  和  $6.739 \sim 6.800 \text{ m}$  附近有  $Z \approx 1$  或  $Z \approx -1$  的大值点 (图 2c),  $R = 2.941 \sim 2.987 \text{ m}$  附近有  $Z \approx 0$  或  $Z \approx -0$  的小值点以及  $R > 10$  以后耦合率逐渐变小会趋另一个最小值点. 很明显,  $R = 6.74 \sim 6.80 \text{ m}$  能获得大的耦合率, 给制作调节带来很大方便, 也可以看出  $R$  弯曲半径不宜太小. 否则, 耦合长度太短,  $Z$  很低.

(4) 在  $y = 0 \sim 0.201 \mu\text{m}$  和  $y = 3.266 \sim 3.285 \mu\text{m}$  附近有  $Z \approx 1$  或  $Z \approx -1$  的大值点, 在  $y = 1.965 \sim 1.982 \mu\text{m}$  附近和  $y > 7.0 \mu\text{m}$  后有  $Z \approx 0$  或  $Z \approx -0$  的小值点 (图 2d). 很明显,  $y = 0 \sim 0.201 \mu\text{m}$  的耦合率大值点给制作调节带来极大方便, 可利用, 需要注意避开耦合率的最小值点.

计算表明,  $d_n$  在  $10^{-3}$  量级的变化, 最近距离和垂直偏移在  $10^{-2} \mu\text{m}$  量级的变化和弯曲半径在  $10^2 \text{ m}$  级的微小变化都将引起  $Z$  的很大变化, 这就给制作高要求优质光纤耦合器带来困难. 本文的计算数据为实验和生产上解决这一困难提供了依据和方便.

### 3 讨 论

(1) 本文以工作波长  $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$  作为典型值计算和分析耦合率与各参量的响应特性. 其计算和分析方法同样适用于  $\lambda = 0.85$  和  $1.55 \mu\text{m}$  两个低损耗窗口工作波长.

(2) 在计算技巧方面, 使用高级混合编程的方法<sup>[1]</sup>有获得计算速度快、结果精确程度高的优点, 但每计算一种参量与耦合率的响应特性曲线, 程序要作相应的修改. 我们试用 Mathcad 6.0 计算, 在同样的微型计算机上速度和结果精确程度都比文 [1] 的高级混合编程方法低, 但它可省去修改程序的麻烦.

### 参 考 文 献

1 傅思镜, 陈颖宇, 郑文耀, 等. 单模光纤耦合的计算及其软件技巧. 中山大学学报 (自然科学

- 版), 1998, 37 (1): 64- 67
- 2 Georgiou G. Low-loss single-mode optical couplers. IEEE proceedings. 1985, 132 (5): 297
- 3 顾晔仪, 李国瑞. 光纤通信系统. 北京: 人民邮电出版社, 1989. 356- 361
- 4 刘德明, 向清, 黄德修. 光纤光学. 北京: 国防工业出版社, 1995. 43
- 5 杨同友, 杨邦湘. 光纤通信技术. 北京: 人民邮电出版社, 1995. 41

## The Calculation and Analysis of Single-Mode Fiber Coupling Efficiency

*Fu Sijing\**    *Fu Yingjun*    *Liang Lizhen*

**Abstract** The coupling efficiency of two single-mode fibers versus numerical aperture, nearest distance, bending radius and the vertical distance was calculated and analysed.

**Keywords** single-mode fiber, coupling efficiency

· 简 讯 ·

### 本 刊 启 事

为促进国内外学术交流, 本刊已入编《中国学术期刊(光盘版)》, 并以摘要和全文的形式逐步进入中国教育网和广东金科网等网络系统. 来稿一经本刊录用, 将同时被光盘版收录和进入有关的网络. 并在印刷版出版后一次性发放稿酬.

中山大学学报(自然科学版)编辑部

\* Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China