

# 单模光纤耦合器带宽特性分析

姚慧海 陈翼强

(上海科技大学, 上海光纤技术与现代通信研究所)

## 提 要

本文由求解耦合系数随纵向距离变化的耦合波方程着手, 提出了变间距单模光纤定向耦合器, 讨论了这种耦合器的耦合特性。通过对耦合器各种损耗的分析计算, 得出立体交叉分离型耦合器有最佳带宽特性的结论。文中也初步提出了实现宽带单模光纤定向耦合器的方法和设计步骤。

本文引入了变间距单模光纤定向耦合器, 通过求解耦合系数随纵向距离变化的耦合波方程, 讨论了耦合器的带宽特性, 并得出高次幂分离函数的耦合器较之低次幂分离函数的具有较好的带宽特性。通过计算单模光纤的辐射损耗和渡越损耗, 发现光纤弯曲引起的辐射损耗对波长极为敏感, 从而直接破坏了高次幂分离函数型耦合器的特性。然后, 提出了立体交叉型耦合器结构, 这种结构可给出较宽的工作波长范围。最后, 本文讨论了单模光纤定向耦合器的宽带设计方法。

通过控制两光纤的分离速率, 分离形状, 本文提出的器件可在较宽的波长范围内用作光开关(0 db 耦合器), 光功分器(3 db 耦合器)以及实现任意功率比的功率分配器。

## 一、基本理论

### 1. 耦合波方程

从等效电流概念和麦克斯韦方程出发, 求出由源所激励的耦合系统的场分布, 并得出场振幅的微分方程组。对单模光纤而言, 耦合方程组为:

$$\begin{aligned} \frac{da_1(z)}{dz} &= -j\beta_1(z)a_1(z) + jc_{21}(z)a_2(z), \\ \frac{da_2(z)}{dz} &= -j\beta_2(z)a_2(z) + jc_{12}(z)a_1(z). \end{aligned} \quad (1)$$

上式也适用于耦合系统中两光纤间距平滑缓变的场合, 仅耦合系数  $c_{ij}$  是  $z$  的函数。式中带下标 1 和 2 的量分别属于光纤 1 和 2,  $a_1, a_2$  为两光纤场的振幅,  $\beta$  为传播常数,  $c_{ij}$  是光纤  $i$  和  $j$  之间的耦合系数。当两光纤相同时,  $c_{12}(z) = c_{21}(z) = c(z)$ , 此时式(1)的解为

$$\begin{aligned} a_1(z) &= e^{-j\beta z} [a_1(0) \cos \Phi(z) + ja_2(0) \sin \Phi(z)], \\ a_2(z) &= e^{-j\beta z} [a_2(0) \cos \Phi(z) + ja_1(0) \sin \Phi(z)], \end{aligned} \quad (2)$$

式中 
$$\Phi(z) = \int_0^z c(z) dz.$$

为进行计算, 必须用耦合器参数来表示  $c(z)$ 。设光纤本身轴向均匀, 仅间距  $D$  随  $z$  平滑缓变, 在这一情况下单模光纤的耦合系数为:

$$C(z) = (\Delta u^2 / V^3 K_1^2(w)) K_0(D(z)w/\rho), \quad (3)$$

式中  $\rho$  为光纤芯半径,  $\Delta$  为相对折射率差,  $K_0$ 、 $K_1$  分别为零阶和一阶变型贝塞尔函数,  $V$  为光纤参量,  $D(z)$  是在点  $z$  处两光纤之间的间距, 且模式参量  $u$ ,  $w$  的定义为

$$u^2 = \rho^2(n_1^2 k^2 - \beta^2) = \rho^2(n_2^2 k^2 - \beta^2); \quad w^2 = \rho^2(\beta^2 - n_3^2 k^2). \quad (4)$$

光纤参量(即归一化频率)为

$$V = (u^2 + w^2)^{1/2} = \rho k (n_1^2 - n_3^2)^{1/2}, \quad (5)$$

式中  $n_1 = n_2$  是光纤 1 和 2 的芯层折射率,  $n_3$  为包层折射率,  $k = 2\pi/\lambda$  为自由空间波数。

## 2. 带宽特性

对幂次型分离函数形式

$$D(z) = d_0 + (\alpha z)^g, \quad (6)$$

和指数函数分离型

$$D(z) = d_0 e^{\alpha z}, \quad (7)$$

计算了功率纵向分布特性及带宽特性。计算中假设对光纤 1 进行激励, 光纤 2 中的功率乃由连续耦合所产生。对式(6)的分离函数形式, 分别取  $g=1/2, 1, 2, 3, 5, 10$ 。图 1 示出  $g=2$  时, 不同  $\alpha$  值下光纤 2 中耦合功率与波长的关系曲线。图中曲线(a)是  $\alpha$  甚小的情形, 此时耦合功率随波长按正弦规律振荡; 曲线(d)的  $\alpha$  值较大, 功率随波长变化呈单峰。频响范围较宽, 可符合宽带工作需要。

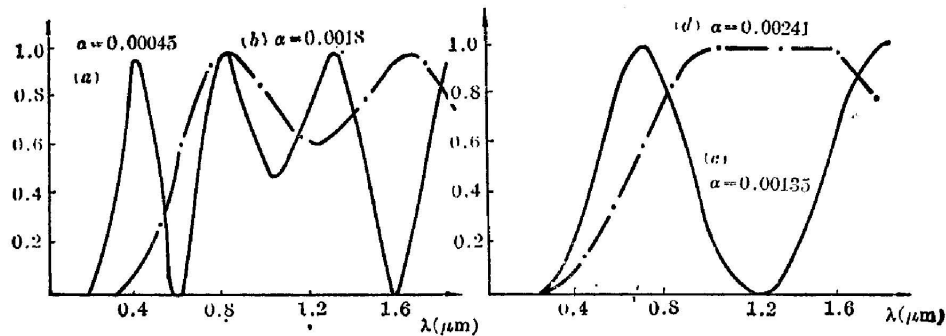


图 1 耦合功率-波长关系曲线

Fig. 1 Coupled power vs. wavelength

通过计算各种不同分离形式耦合器在不同  $\alpha$  值下的带宽特性, 我们得出下列结论:

- 1) 对每一种分离函数形式, 可选择  $\alpha$  值使耦合功率  $P(\lambda)$  曲线呈现单峰;
- 2) 在某一固定工作波长下, 当纵向传输距离大于某一临界长度时, 耦合度趋于平稳, 且高次幂分离函数的临界长度小于低次幂的;
- 3) 高次幂分离函数的相对带宽特性优于低次幂的;
- 4) 对某一特定的光纤参数, 不同分离函数耦合器的带宽和中心工作波长不同。对幂次型分离函数而言, 中心工作波长随幂次升高而移向短波长;
- 5) 随着两光纤间初始间距减小, 带宽中心移向短波长, 同时带宽变宽。反之, 带宽中心移向长波长, 带宽变窄。

上述各结论都是在特定的光纤参数下得到的。通过计算分离函数形式相同, 但光纤参

数不同的耦合器得出:

- 1) 同一分离函数, 不同光纤参数耦合器的中心工作波长  $\lambda_0$  不同, 但  $\lambda_0/\lambda_c$  保持常数 ( $\lambda_c$  为单模光纤的截止波长);
- 2) 同一分离函数的耦合器有相同的相对带宽。

### 3. 辐射损耗和渡越损耗

光纤的弯曲会造成传播常数和场型的变化, 并引起连续的辐射损耗。此外, 在弯曲光纤的两端 ( $s=0$  和  $s=l$  处), 尚有过渡损耗  $P_{RO}$  和  $P_{RL}$ , 因而总损耗为:

$$P_T = P_{RO} + P_{RL} + \int_0^L \alpha_c(R) ds \quad (8)$$

式中  $\alpha_c(R)$  是均匀弯曲光纤单位长度的连续弯曲损耗, 通常可表示为<sup>[1, 2]</sup>:

$$\alpha_{c(R)} = \frac{\pi^{1/2} w^2 \exp[-2/3 \cdot w^3 / \beta^3 \cdot R(s) / \rho^3]}{2w^{3/2} V^2 [R(s)\rho]^{1/2} K_1^2(w)}, \quad (9)$$

式中  $R(s)$  为弯曲半径。过渡损耗可近似表示为<sup>[3, 4]</sup>:

$$P_R = 1/2 [V^2 w_0^2 / \Delta R(s) \rho^2]^2, \quad (10)$$

式中  $w_0$  为模斑尺寸。表 1 列出了对中心工作波长为  $1.26 \mu\text{m}$  的  $D=d_0+(\alpha z)^2$  型耦合器 ( $d_0=2\rho=6 \mu\text{m}$ ,  $\alpha=0.00241$ ) 和中心波长为  $1.1 \mu\text{m}$  的  $D=d_0+(\alpha z)^5$  型耦合器 ( $d_0=2\rho=6 \mu\text{m}$ ,  $\alpha=0.00171$ ) 的计算结果。可见, 弯曲引起的辐射损耗对波长极为敏感, 随着  $\lambda$  增大 (即  $V$  值降低), 辐射损耗急剧增大; 且对幂次型分离型式耦合器而言,  $g$  值越大, 这一影响也越大。

表 1 幂次型分离函数耦合器的弯曲辐射损耗。

Table 1 Bending radiation loss of couplers with power-law separation function

耦合器类型	$D=d_0+(\alpha z)^2$			$D=d_0+(\alpha z)^5$		
	1.08	1.32	1.56	0.88	1.08	1.28
波长 ( $\mu\text{m}$ )						
损耗功率百分比	$\approx 0$	0.1%	5%	19.2%	58.1%	99.7%

## 二、立体交叉分离型耦合器的提出

由上面讨论可见, 在不考虑弯曲损耗时, 高次幂分离形式的耦合器具有较好的带宽特性, 但由于弯曲损耗, 使高次幂分离形式耦合器的损耗加大。综合这二方面因素, 从耦合器的有效工作带宽考虑, 线性分离型是实现宽带耦合器的比较理想的优选型函数。本文对图 2 所示的两种线性分离型单模光纤定向耦合器进行了计算, 图 2(a) 是 Y 型的, 耦合光纤的



图 2 两种线性分离型单模光纤耦合器

Fig. 2 Two types of singlemode fiber coupler with linear separation

(a) Y-type; (b) Grade separation

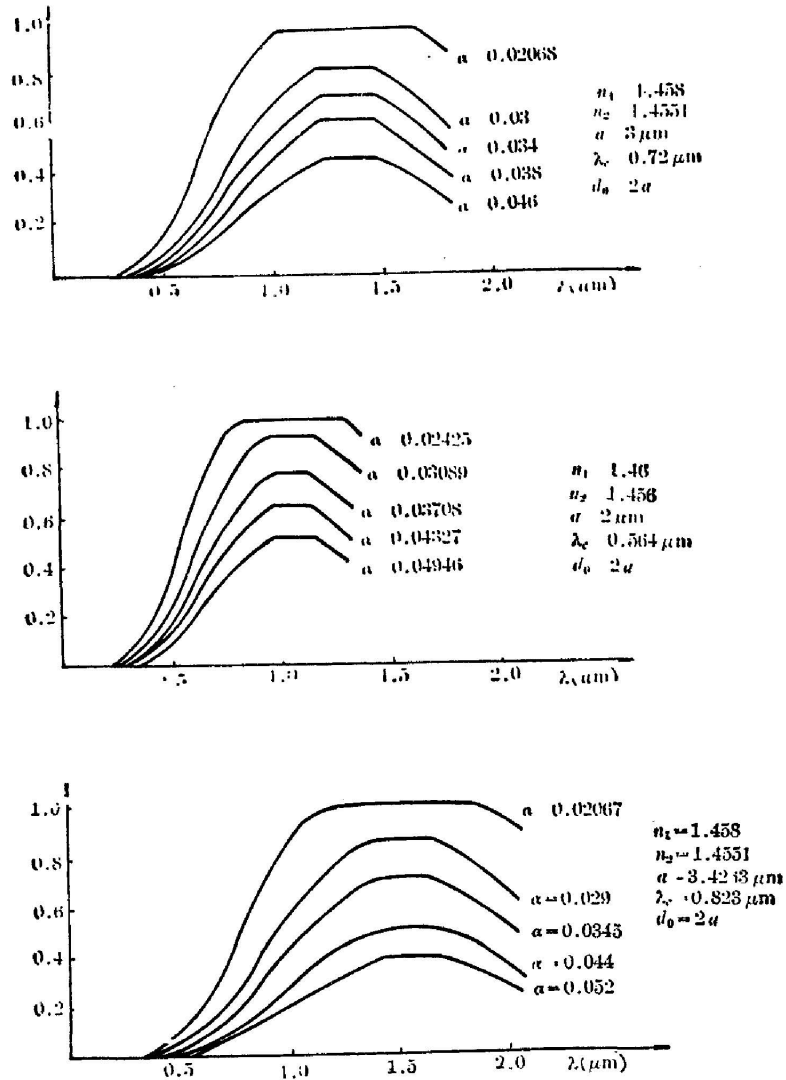


图3 立体交叉型耦合器带宽特性

Fig. 3 Bandwidth characteristics of grade separation coupler

一个端口用全吸收材料封住; 图 2(b) 是立体交叉型的, 其带宽特性示于图 3。

前面提及对每种分离函数而言, 单模光纤定向耦合器的  $\lambda_0/\lambda_c = \text{常数}$ ; 计算得出对立体交叉分离型耦合器, 这一常数为 1.86。因此, 为设计出符合某一中心波长的耦合器, 通常可用适当选择  $\lambda_c$  来实现, 然后由  $\lambda_c$  来确定光纤芯层, 包层折射率等参数。

### 三、耦合器的对接损耗和宽带设计方法

一般常用的单模光纤的  $V$  值应略小于第一个高阶模出现时的  $V$  值(对阶跃型分布, 这一值为 2.405), 但宽带耦合器光纤不可能满足这一要求。以立体交叉型耦合器为例,  $V$  值的取值范围为 1.924~0.9736(0 db) 和 1.53~1.12(3 db)。  $V$  值小, 光纤导模场有相当一部分

功率扩展到芯层以外,从而有利于和邻近光纤导模场的相互作用。但若把这种光纤直接向外引伸作为引线,光纤内的导模很容易被转换成辐射模而损耗掉,必须选择V值较大的光纤作引线。为保证光纤在整个耦合器工作波长范围内是单模的,可选择引线的单模截止波长 $\lambda_{cL}$ 与耦合器工作波长的短波长边缘重合。在此先直观地取制作耦合器的单模光纤的芯层和包层的折射率与引线的一致,而它们的芯径与下式成反比:

$$\lambda_{cL}/\lambda_{cc} = \lambda_0/\lambda_{cc} \left(1 - \frac{1}{2} \Delta\lambda/\lambda_0\right), \quad (11)$$

式中 $\lambda_{cL}$ ,  $\lambda_{cc}$ 是引线光纤和耦合器光纤的截止波长, $\lambda_0$ 是中心工作波长。计算得出的对接耦合效率随波长变化曲线见图4,其中(a),(b)分别相应于0db和3db立体交叉型耦合器,图中实线是由弱导近似求出的耦合效率,虚线是由高斯近似所得结果。图中各符号为: $\rho_L$ —引线芯半径; $\rho_c$ —耦合器光纤芯半径; $n_{1L}$ —引线芯层折射率; $n_{1c}$ —耦合器光纤芯层折射率; $n_{3L}$ —引线包层折射率; $n_{3c}$ —耦合器光纤包层折射率。

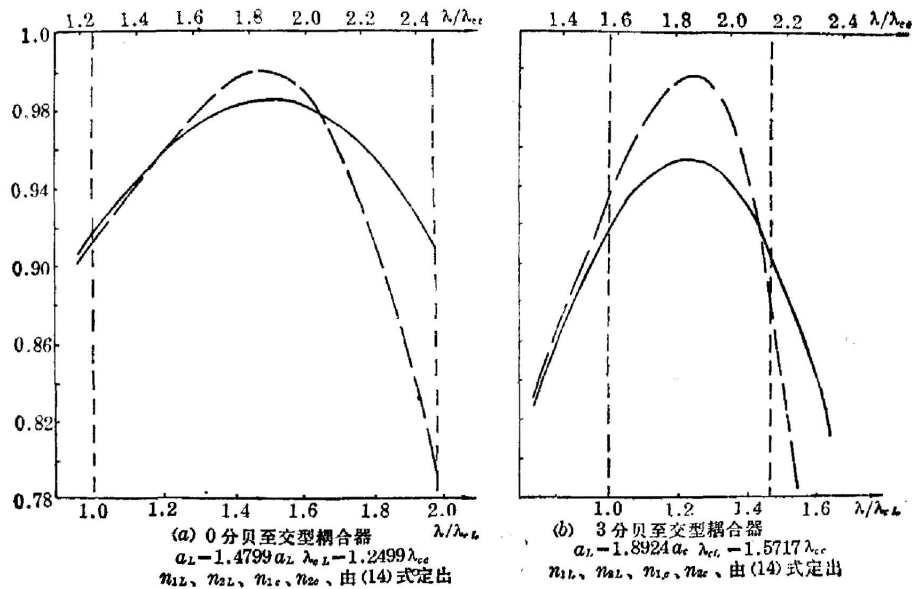


图4 两光纤对接耦合传输效率随波长变化曲线

Fig. 4 Transmission efficiencies of two butt-joint fibers vs. wavelength

- (a) 0 db grade separation coupler,  $\rho_L=1.2499\rho_c$ ,  $\lambda_{cL}=1.2499\lambda_{cc}$ ,  $n_{1L}=n_{1c}$ ,  $n_{3L}=n_{3c}$ ;
- (b) 3 db grade separation coupler,  $\rho_L=1.5717\rho_c$ ,  $\lambda_{cL}=1.5717\lambda_{cc}$

由图4可见,在短波长附近,耦合效率很高(最高达99.08%),且由高斯近似和弱导近似所得的结果吻合良好。但随着波长增大,对接效率下降,在长波长边缘由弱导近似求得的对接效率只有82%,且两种计算方法所得结果的差异也增大。

为提高耦合器工作波长范围内的最低传输效率,并使中心工作波长处的传输效率达到最大,在保证单模工作条件下,可以取引线芯径 $\rho_L$ 和耦合器光纤芯径 $\rho_c$ 之比为:

$$\frac{\rho_L}{\rho_c} = \frac{0.65 + 1.619V_{oc}^{-3/2} + 2.879V_{oc}^{-6}}{0.65 + 1.619V_{oL}^{-3/2} + 2.879V_{oL}^{-6}}, \quad (12)$$

式中 $V_{oc}=2.405(\lambda_{cc}/\lambda_0)$ ,  $V_{oL}=2.405(\lambda_{cL}/\lambda_0)$ , 引线光纤的折射率 $n_{1L}$ ,  $n_{3L}$ 和耦合器光纤的 $n_{1c}$ ,  $n_{3c}$ 满足:

$$(n_{1L}^2 - n_{3L}^2)^{1/2} = \frac{\lambda_{cL}/\lambda_{cc}}{\rho_L/\rho_c} (n_{10}^2 - n_{30}^2)^{1/2}, \quad (13)$$

一般可以取  $n_{1L} = n_{10}$ ,  $n_{3L} \neq n_{30}$  或  $n_{1L} \neq n_{10}$ ,  $n_{3L} = n_{30}$ .

用上述两个公式对立体交叉型耦合器进行了计算, 图 5 示出了得到的计算结果。可见在中心工作波长上, 0db 耦合器引线的最大传输效率可达 96.54%, 3db 耦合器的为 95.41%, 均低于前一种引线设计方案; 但在长波长边缘, 最低传输效率可达 91%, 所以后一种参数选择方法可使传输效率较为平稳。同样, 在  $V$  值减小时, 高斯近似与弱导近似计算结果之间的差异也增大。

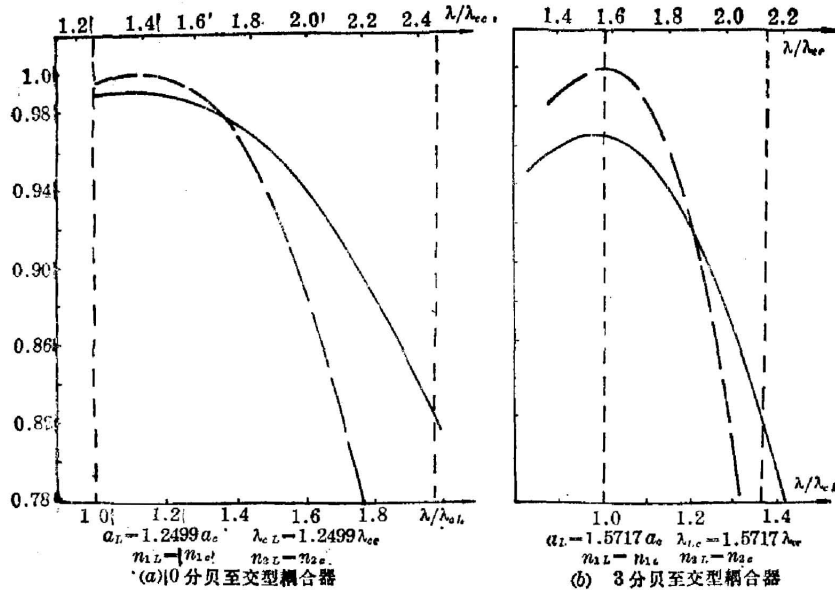


图 5 两光纤对接耦合传输效率随波长变化曲线

Fig. 5 Transmission efficiencies of two butt-joint fibers vs. wavelength

- (a) 0db grade separation coupler,  $\rho_L = 1.4799\rho_c$ ,  $\lambda_{cL} = 1.2499\lambda_{cc}$ ;
- (b) 3db grade separation coupler,  $\rho_L = 1.8924\rho_c$ ,  $\lambda_{cL} = 1.5717\lambda_{cc}$ .

综上所述, 得出宽带单模光纤定向耦合器的设计步骤为:

- (1) 根据耦合器的中心工作波长, 由  $\lambda_0/\lambda_c = \text{常数}$  (对立体交叉型分离函数,  $\lambda_0/\lambda_c = 1.86$ ) 定出  $\lambda_{cc}$ , 然后由式(11)求出  $\lambda_{cL}$ ;
- (2) 若引线芯半径  $\rho_L$  给定, 耦合器的光纤芯半径  $\rho_c$  可由式(12)求出; 反之, 若给定  $\rho_c$ , 也可由该式求出  $\rho_L$ ;
- (3) 由式(13)求出耦合器光纤的芯、包层折射率大小;
- (4) 根据所要求的耦合比和参数  $n_{1c}$ ,  $n_{3c}$ ,  $\rho_c$  等来求出间隔  $d_0$  与分离速率  $\alpha_0$ .

参 考 文 献

- [1] D. Marcuse; *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**, No. 3 (Mar), 216.
- [2] A. W. Snyder, et al.; *Electron. Lett.*, 1975, **11**, No. 15 (Jul), 832.
- [3] W. A. Gambling, et al.; *Opt. Quant. Electron.*, 1979, **11**, No. 1 (Jan), 43.
- [4] M. Miyagi, et al.; *Opt. Quant. Electron.*, 1977, **9**, No. 1 (Jan), 51.

## **Analysis of bandwidth characteristics in single-mode fiber couplers**

YAO HUIHAI AND CHEN YIJIANG

*(Shanghai University of Science & Technology, Shanghai Optical Fiber Technique &  
Modern Communication Research Institute)*

(Received 22 January 1985; revised 17 May 1985)

### **Abstract**

Based on solving the coupled mode equation with coupling coefficients as functions of longitudinal distance, single-mode fiber couplers with variable spacing are introduced and their coupling characteristics discussed. We reach the conclusion that grade separation couplers have optimum bandwidth after calculating various insertion losses. The method for realizing broad spectral bandwidth single-mode fiber couplers and the related design procedure are also proposed.