

# 用两段式波导模型研究 3dB 宽带光纤耦合器

顾炳生

(上海科学技术大学物理系, 上海 201800)

**摘 要** 报道了用两段式组合波导模型分析研究 3dB 宽频带熔锥型单模光纤耦合器. 根据文献[1]用两根阶跃型单模光纤, 使其中一根光纤的熔锥区腐蚀变细, 熔融拉锥成两段式的准双锥体组合波导, 分别用变分理论和传统的耦合波理论分析横截面近似不变的腰部区域和横截面随纵向距离变化的梯度区域内的耦合行为, 耦合器的耦合功率应是这两段区域耦合功率的叠加. 从而得到了耦合器中任意点的耦合功率表达式. 用光纤参数和适当的组合波导横截面尺寸计算不同波长的耦合长度  $Z_c$ , 据此找到宽频带的耦合长度  $Z_0$ . 通过分析比较, 得到了一种符合工艺实际且具有相当平坦功率谱的熔融型单模光纤耦合器.

**关键词** 宽频带, 腰部区域, 梯度区域.

## 1 引 言

常规的熔融型耦合器具有低损耗, 温度特性稳定, 机械性能牢固和容易制作等优点. 但这些器件的耦合比完全依赖于工作波长. 图 1 为常规的耦合器转换功率随波长变化的曲线图. 显然, 在 C 点附近功率转换随波长变化最灵敏. 当光源波长偏离耦合器拉制波长时, 分束特性将迅速变坏. 例如: 耦合器工作在  $1.57 \mu\text{m}$  波长时, 功率分束比为 50%. 若在  $\Delta\lambda$  范围内偏离  $1.57 \mu\text{m}$  功率分束比将远离 50% (3dB), 接近于 0 (A 点) 或 1 (B 点), 于是,  $1.57 \mu\text{m}$  波长处的耦合器, 变成了一个开关器件; 如果控制拉伸长度于 Z 点 (图 2), 使  $1.57 \mu\text{m}$  与  $1.30 \mu\text{m}$  波长的光具有共同的分束比, 即 A 点, 则两种波长光的分束比均远离 50% (3dB). 为了使工作在  $1.57 \mu\text{m}$  和  $1.30 \mu\text{m}$  波长处的耦合器具有固定的分束比, 提出了用不同特性的单模光纤制作耦合器的设想, 这种耦合器具有分束比与工作波长无关 (或受很小影响) 的特性. 因此它将在今后波分复用单模光纤系统和其它 (如非线性) 光学领域起重要作用.

## 2 实 验

为了使耦合器的工作波长在一定范围内都具有预定的分束比 (3dB), 可采用不同特性单模光纤来实现宽频带耦合器<sup>[1,2]</sup>. 出于工艺可行性和系统匹配等考虑, 用两根相同的单模光纤, 使它们在耦合区的特性不同, 从而实现了一定波长范围内功率分束比随波长变化相当平坦的定向耦合器.

制作单模光纤定向耦合器的装置如图 3 所示. 事先将其中一根光纤中间需熔锥的部分浸

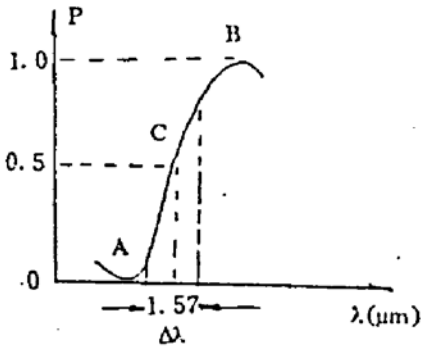


Fig. 1 Spectra of standard coupler

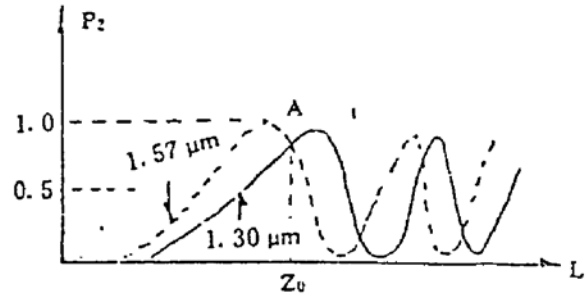


Fig. 2 Coupled power against length

在腐蚀槽中用氢氟酸腐蚀变细,然后将两根光纤需熔锥部分经清洁处理后合拢,任选一根光纤为输入端 1,注入  $1.57 \mu\text{m}$  波长的光,它的输出端 2,另一根光纤的输入端为 3,注入  $1.30 \mu\text{m}$  波长的光,它的输出端为 4,如图 3 所示,用合适的火焰移近合拢的部分,边熔融边拉锥,将熔融的光纤拉成短梯度组合波导的准双锥体,分别打开两种波长的光源,用两只探测器同时监视 2、4 端的输出功率. 只要两光纤需熔锥部分匹配合适,那么在两个波长功率转换随拉伸长度变化曲线上的第一个交点处 A,如图 4 所示,即可达到 2、4 端的输出光功率在两个波长上的分束比都为 50%,这时得到的耦合器插入损耗最小. 在封装过程中,适当微调光纤位置,即使分束比仍保持 50%,固化后即可得到性能良好的波长响应平坦的耦合器.

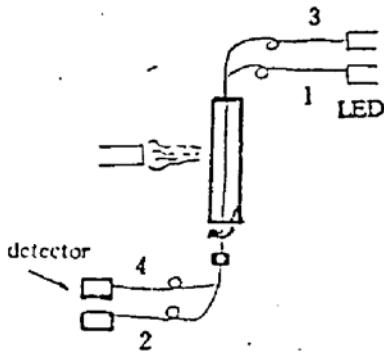


Fig. 3 Set of experiment

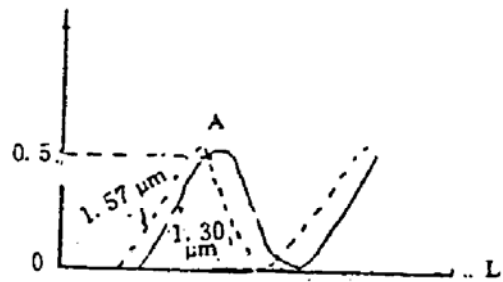


Fig. 4 Coupled power against coupling length

### 3 分析与计算

作者曾经用耦合器组合波导内两最低阶模的相拍来解释常规耦合器波导内的光功率交换,两耦合臂间的耦合系数由模式的耦合拍长即传播常数差决定. 类似的可用这个理论解释宽频带耦合器波导内的光功率交换,其拍长仍由两模式传播常数差决定.

图 5 表示了宽频带耦合器腰部区域的横截面. 在耦合区内,耦合器两臂的主要功率交换发生在腰部. 而在这段区域,组合波导的模截面近似不变,所以,可以假定功率耦合是在腰部的平行波导间发生的. 该区域的长短取决于融锥型耦合

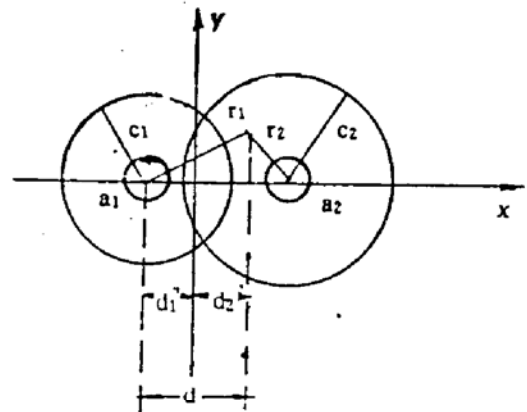


Fig. 5 Transverse section of waist

器的熔融拉伸情况. 对于常规的耦合器该段组合波导用矩形或椭圆形波导近似, 其模式的传播常数也容易得到; 对于非对称臂的宽带耦合器, 用矩形或椭圆形波导近似将不再适合, 借助于变分法分析.

图 5 横截面所具有的波导场可表示为两独立光纤内三角近似场的适当叠加, 组合波导内两个最低阶模应取为叠加的同相模, 另两个最低阶模应取为叠加的反相模, 两模式场的数学表达式为:

$$\left. \begin{aligned} \psi_+(x, y) &= b_+ \left[ \left(1 - \frac{r_1}{c_1}\right) + a_+ \left(1 - \frac{r_2}{c_2}\right) \right], \\ \psi_-(x, y) &= b_- \left[ \left(1 - \frac{r_1}{c_1}\right) - a_- \left(1 - \frac{r_2}{c_2}\right) \right] \\ r_1 &= [(x + d_1)^2 + y^2]^{1/2}, \quad r_2 = [(x - d_2)^2 + y^2]^{1/2} \\ d_1 &= (d^2 - C_2^2 + C_1^2)/2d, \quad d_2 = (d^2 + C_2^2 - C_1^2)/2d \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $d$  为两光纤中心间距,  $\psi_+$  为同相模,  $\psi_-$  为反相模;  $b_+$ 、 $b_-$ 、 $a_+$ 、 $a_-$  为常数, 其中  $a_+$  和  $a_-$  应由下式联系:

$$a_- = \left( \frac{\pi}{6} C_1^2 + I a_+ \right) / \left( \frac{\pi}{6} C_2^2 a_+ + I \right), \quad I = \iint_B \left(1 - \frac{r_1}{c_1}\right) \left(1 - \frac{r_2}{c_2}\right) dx dy \quad (2)$$

(2) 式是根据两模式正交条件得到的, 在假设  $\psi_+$  为同相模,  $\psi_-$  为反相模时, 规定  $a_+ > 0$ ,  $a_- > 0$ , 这样才能使假设与最后结果一致. 如果波导模式场已知, 模式的传播常数可由变分表达式

$$\beta_{\pm}^2 = \frac{\iint [k^2 n^2(x, y) \psi_{\pm}^2 - \left(\frac{\partial \psi_{\pm}}{\partial x}\right)^2 - \left(\frac{\partial \psi_{\pm}}{\partial y}\right)^2] dx dy}{\iint \psi_{\pm}^2 dx dy} \quad (3)$$

决定, 式中  $k$  为自由空间波数,  $n(x, y)$  为组合波导的折射率分布, 借助于(1)式的组合波导场分布, 可得到耦合器组合波导内两最低阶模的传播常数为:

$$\left. \begin{aligned} \beta_{\pm}^2 &= k^2 n_2^2 + \frac{I_1 + a^2 \pm I_2 - [x(1 + a_{\pm}^2) \pm 2a \pm I]}{\frac{\pi}{6} a^2 + a_{\pm}^2 \frac{\pi}{6} C_2^2 \pm 2a \pm I} \\ I_{\pm} &= \pi a_{\pm}^2 k^2 (n_1^2 - n_2^2) \left(1 - \frac{4a_{\pm}}{3c_{\pm}} + \frac{a_{\pm}^2}{2c_{\pm}^2}\right)_{(a=1,2)}, \quad I_1 = \frac{1}{c_1 a} \iint_B \cos \theta dx dy \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

相应的耦合拍长为:

$$z_c = \pi / (b_+ - b_-) \quad (5)$$

从前面的分析可知, 除对  $a_+$  与  $a_-$  的取值要求保持两模式正交的限制外, 它们的取值还未决定, 其取值应由  $z_c$  的极值定出. 即  $(\partial z_c / \partial a_+) = 0$  或  $(\partial z_c / \partial a_-) = 0$

对于非对称臂耦合器, 在耦合区两光纤粗细不同, 理论计算表明, 设输入端的功率为单位功率时, 由(1)式表示的最低阶模式可得:

$$\left. \begin{aligned} a_+ &\neq a_-, \quad a_+ b_+ = a_- b_- \\ b_+ &= \frac{a_-}{a_+ + a_-} \frac{1}{c_1} \sqrt{\frac{6}{\pi}}, \quad b_- = \frac{a_+}{a_+ + a_-} \frac{1}{c_1} \sqrt{\frac{6}{\pi}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

在  $z = z_0$  点, 最大可交换功率:

$$P_{2max} = \frac{4a_+^2 a_-^2}{(a_+ + a_-)^2} \frac{c_2^2}{c_1^2} \quad (7)$$

耦合臂 2 在任意点耦合功率为:

$$P = P_{2max} \cdot \sin^2 \left( \frac{\pi}{2} \frac{z}{z_c} \right) \quad (8)$$

取  $C_1 = 16 \mu\text{m}$ ,  $C_2 = 18 \mu\text{m}$ ,  $a_1 = 1.1 \mu\text{m}$ ,  $a_2 = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $d = 26 \mu\text{m}$ , 计算得  $d_1 = 12 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 14 \mu\text{m}$ ,  $a_+ = 2.22$ ,  $a_- = 0.37$ , 在  $\lambda = 1.30 \mu\text{m}$  处,  $z_c = 6.396 \text{ mm}$ , 而在  $\lambda = 1.57 \mu\text{m}$  处,  $z_c = 5.444 \text{ mm}$ , 为了使耦合器在  $1.30 \mu\text{m}$  和  $1.57 \mu\text{m}$  两工作点均具有 3 dB 的分束比, 取  $z_c = 5.873 \text{ mm}$  的耦合长度, 在上述耦合参数下所得到的功率谱如图 6 曲线 I. 该功率谱在  $1.40 \mu\text{m}$  波长处耦合功率为最大, 其值为 51%, 在工作波长  $1.27 \mu\text{m}$  至  $1.60 \mu\text{m}$  范围内耦合功率在  $50\% \pm 1.5\%$  范围内变化, 即在  $0.33 \mu\text{m}$  带宽内, 耦合功率只有很小的涨落. 如果耦合器腰部区域适当长, 而梯度区域很短, 使耦合器内整个功率耦合只发生在腰部区域, 而梯度区域内无耦合产生, 则非对称臂熔融型耦合器分光比在相当宽的范围内近似与工作波长无关. 当然这里所指的短梯度耦合区是指光纤芯径梯度满足条件  $|d_+/d_-| < a/z_c$  使在此耦合段无辐射产生.

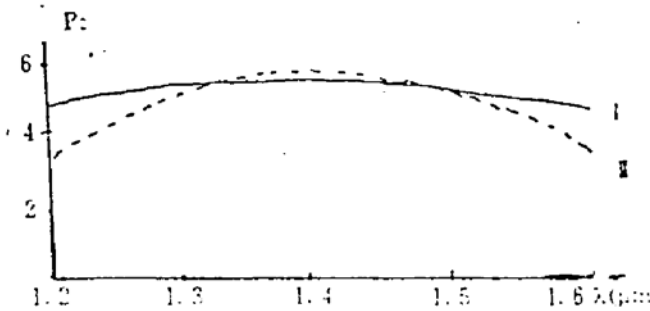


Fig. 6 The spectrum response curve of wide band couplers

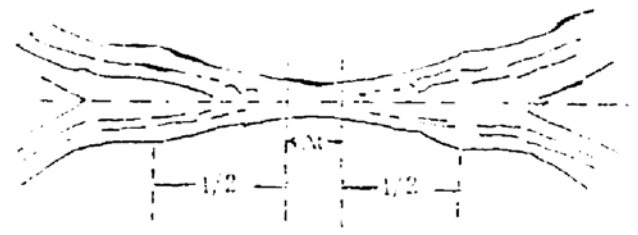


Fig. 7 Model of two type waveguide couplers

在实际情况下, 由于工艺的原因, 某些熔融型耦合器总功率耦合, 不仅来源于腰部区域, 而且有一部分功率耦合来源于梯度区域. 这类耦合器可用两段模型模拟, 如图 7 所示, 一段是耦合器腰部区域, 其横截面可视作恒定, 但二臂相互重叠. 另一段为梯度区域, 其横截面随纵向距离变化. 但两耦合臂恰好相互接触而不重叠, 在这一段内, 每一臂的横截面可表达为.

$$C_i(z) = C_{imax} - (C_{imax} - C_{imin}) \exp \left[ - \left( \frac{z}{z_c} \right)^2 \right] \quad (9)$$

在梯度区域, 波导内两最低阶模式除相拍外, 还存在相互交叉耦合. 但对于缓变的光纤倾斜梯度, 波导内模式的交叉耦合很弱, 在分析时可略去一正规耦合效应, 而把耦合器两臂的功率交换归纳为组合波导的两正规耦合的相拍, 其拍长由(1)式、(4)式、(5)式决定. 但(1)式中的三角形函数应用三层折射率分布的光纤场代替. 由此可见, 用变分法分析梯度区域在比分析腰部区域复杂些. 因此, 对该段区域, 下面将采用传统的耦合波理论分析. 在弱耦合段, 耦合器各独立臂光纤为单模<sup>[3]</sup>, 根据耦合理论得到耦合器正规耦合振幅耦合方程.

$$\frac{dA_1}{dz} = -j\beta_1 A_1 + jC_{12} A_2, \quad \frac{dA_2}{dz} = -j\beta_2 A_2 + jC_{21} A_1 \quad (10)$$

光纤耦合一般可认为是无耗损的, 故有  $C_{12} = C_{21}$ , 对上式作矩阵变换,

$$\frac{d(w)}{dz} = [T] \frac{d[a]}{dz}, \quad [T] = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad \phi = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{2c_{12}}{\beta_1 - \beta_2} \quad (11)$$

至此, (8) 式的正规耦合方程被转化为本地模耦合方程或称为组合波导的本征模耦合方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw_1}{dz} &= -j\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} - g\right)w_1 + j\frac{d\phi}{dz}w_2, & \frac{dw_2}{dz} &= -j\frac{d\phi}{dz}w_1 + j\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} + g\right)w_2 \\ g &= \left[\left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2}\right)^2 + C_{12}^2\right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中  $C_{12}$  为具有不同特性的三层折射率光纤基模耦合系数. 理论计算证明, 由于横截面的变化, 组合波导两本征模相互耦合<sup>[4]</sup>. 但如果横截面梯度足够小时, 两本征模的交叉耦合项就可以被忽略, 组合波导两本征模近似被视为独立传播, 两本征模的相拍造成了耦合器两臂的功率交换. 从 (10) 式可得到本征模的传播常数差和相应的耦合拍长分别为

$$\Delta\beta = 2g, \quad z_c = \pi/2g \quad (13)$$

耦合器总功率耦合是腰部区域和梯度区域耦合的叠加, 为简单起见, 假定两区域的最大可交换功率相同, 则耦合器任一点的耦合功率为

$$P = P_{2\max} \sin^2\left[\frac{\pi}{2} \int_0^z \frac{dz}{z_c}\right] \quad (14)$$

取  $C_1 = 16 \mu\text{m}$ ,  $C_2 = 17.5 \mu\text{m}$ ,  $a_1 = 1.1 \mu\text{m}$ ,  $a_2 = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $d = 26 \mu\text{m}$ ,  $c_{1\max} = 57.1 \mu\text{m}$ ,  $c_{2\max} = 62.5 \mu\text{m}$ ,  $c_{1\min} = c_1$ ,  $c_{2\min} = c_2$ ,  $z_c = 10.05 \text{mm}$ , 该功率谱在  $1.30 \mu\text{m}$  处具有 49.9% 分束比, 在  $1.57 \mu\text{m}$  处, 具有 52% 的分束比, 其最大功率耦合发生在  $1.39 \mu\text{m}$  处, 其值为 57.6%. 在工作波长  $1.24 \mu\text{m}$  至  $1.61 \mu\text{m}$  范围内, 耦合器分束比的变化范围是  $50\% \pm 7.5\%$ . 如图 6 曲线 I 所示.

## 4 结 果

比较图 6 曲线 I 与曲线 II, 提出了一种符合图 3 工艺实际的两段式短梯度组合波导模型及耦合区尺寸的参考数据, 从而获得了具有相当平坦功率谱的熔融型宽带耦合器. 在实际工艺中, 取  $c_1$  为  $15.4 \mu\text{m}$   $c_2$  为  $16.5 \mu\text{m}$ . 测得  $d$  为  $28.7 \mu\text{m}$ ,  $d_1$  为  $13 \mu\text{m}$ ,

$\lambda(\mu\text{m})$	output (mV)	output (mV)	splitting ratio 1	splitting ratio 2	$\lambda(\mu\text{m})$	output (mV)	output (mV)	splitting ratio 1	splitting ratio 2
1.24	0.0772	0.0577	57.2%	42.8%	1.48	0.0437	0.0490	47.1%	52.9%
1.26	0.0762	0.0650	54.0%	46.0%	1.50	0.0450	0.0477	48.5%	51.5%
1.28	0.0745	0.0660	53.0%	47.0%	1.52	0.0467	0.0440	51.5%	48.5%
1.30	0.0725	0.0707	50.6%	49.4%	1.54	0.0520	0.0447	53.7%	46.3%
1.32	0.0672	0.0702	48.9	51.1%	1.55	0.0517	0.0437	54.2%	45.8%
1.34	0.0625	0.0715	46.6%	53.4%	1.57	0.0530	0.0402	56.9%	43.1%
1.36	0.0680	0.0850	44.4%	55.6%	1.58	0.0555	0.0395	58.4%	41.6%
1.38	0.0505	0.0660	43.3%	56.7%	1.59	0.0562	0.0385	59.3%	40.7%
1.42	0.0432	0.0552	43.9%	56.1%	1.60	0.0550	0.0340	61.8%	38.2%
1.46	0.0432	0.0512	45.8%	54.2%					

$d_2$  为  $15.7 \mu\text{m}$ ,  $c_{1\max}$  为  $54 \mu\text{m}$   $c_{2\max}$  为  $61.5 \mu\text{m}$ ,  $c_{1\min}$  等于  $c_1$   $c_{2\max}$  等于  $c_2$ . 显然,  $d \gg a_1 + a_2$ , 耦

合波导满足弱耦合条件,  $z_c$  由实测系统拉伸控制, 是两个波长耦合功率随耦合长度变化曲线的第一个交点 A(图 4)处的拉伸长度. 制得的宽频带单模光纤耦合器其分束频谱特性如表 1 所示, 对应的波谱响应曲线图 8 所示. 即分束比为 3dB, 分束比容差小于  $\pm 10\%$ ; 工作带宽大于 100 nm 测得器件插入损耗小于 0.3 dB, 反向隔离度大于 60 dB, 工作温度在  $-40^\circ\text{C}$  至  $+80^\circ\text{C}$ .

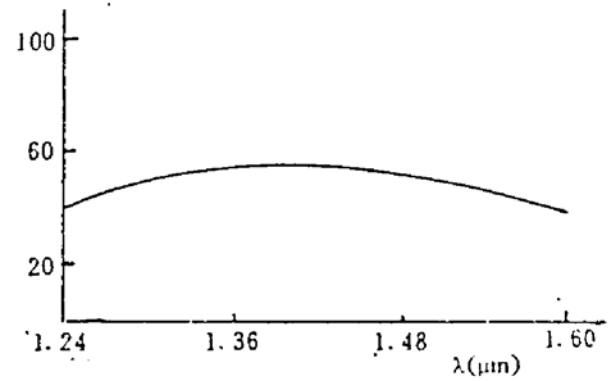


Fig. 8 The spectrum response curve of sample solitting ratio aganist wavelength

### 参 考 文 献

- [1] 陆善达, 顾炳生等, 波长响应平坦的  $2 \times 2$  单模光纤耦合器, 第五届全国光纤通信学术会议论文集, 津浙出图字(90)第 001085 号, 1991: 321~322
- [2] O. B. Mortimore, Wavelength-flattened fused couplers. *Electron. Lett.*, 1985, 21(17): 742~743
- [3] A. Hardy, W. Streifer, Coupled-mode equations for two weakly guiding single-mode fibers. *Opt. Lett.*, 1986, 11(5): 324~326
- [4] J. V. Wright, Variational analysis of fused tapered couplers. *Electron. Lett.*, 1985, 21(23): 1064~1065

## Study on 3dB Wide Band Coupler in Two-Type Waveguide Model

Gu Bingsheng

(Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201800)

(Received 1 September 1993)

**Abstract** This paper describes the study on 3 dB wide band coupler in two-type waveguide model. Two fibers of stepping refraction index were used. Let coupling zone of one fiber become thin by etch method, to make a combination waveguide of two quasi-cone shaped. The variational and coupled wave theory, are adoped to analyse the waist zone and trapezoidal zone. Total power was equal to the sum of two part coupled power at any point of the coupler. Using parameter of fiber and size of combination waveguide transverse section to compute the compeled length  $z_c$  at 1.57  $\mu\text{m}$  and 1.39  $\mu\text{m}$  wavelength, thus coupled length for wide band,  $z_c$  was obtained. Through analyse and compavison proved that this theory suit technological practice. A single mode optical fiber coupler with flat power-spectrum and technological feasibility was achieved.

**Key words** wide band, waist zone, trapezoidal zone.