

波分复用中的自聚焦透镜耦合系统

刘德明 刘文达 刘树杞
(成都电讯工程学院)

提 要

运用矩阵光学的理论讨论了自聚焦透镜的成像特性;导出了设计最低损耗耦合系统的计算公式,并计算分析了耦合系统诸参数对于耦合损耗的影响。

一、引 言

波分复用(简写 WDM)是伴随着光纤通信发展起来的一门新型通讯复用技术,它利用一根光纤来传输多路波长不同的光截波,能够大大提高光纤通信系统的信息容量,并增加系统的灵活性,受到国内外广泛重视^[1~8]。

在 WDM 系统中,耦合系统是信道损耗的一个重要来源。WDM 的耦合系统是指由准直透镜与聚焦透镜构成的“准直-聚焦”系统。在 WDM 耦合系统中,广泛采用自聚焦透镜作为光束的准直和聚焦元件。由两个自聚焦透镜构成的准直-聚焦耦合系统有加工方便、结构紧凑、稳定可靠等优点,受到普遍欢迎。

本文运用矩阵光学的理论对自聚焦透镜的成像特性作了比较详细的分析、讨论;导出了设计最低损耗耦合系统的计算公式,并以光线追迹法为基础,编制了 Fortran 程序,对耦合系统诸参数变化所施加于耦合损耗的影响作了综合分析。

二、自聚焦透镜的成像特性

自聚焦透镜是由含铯离子(Tl⁺)的多组分玻璃棒浸入熔融的硝酸钾中进行离子交换制成的。我们的讨论中采用目前通用的折射率平方律分布:

$$n^2(x, y) = n_0^2[1 - g^2(x^2 + y^2)], \quad (1)$$

式中 $g = (\sqrt{n_0^2 - n_a^2}/n_0a)$ 是透镜的聚焦参数; n_0 与 n_a 分别是透镜轴线与周界上的折射率; a 为透镜半径。利用射线方程可以证明,在折射率服从(1)式分布的媒质中,光线传布的轨迹可由下述方程决定:

$$\left. \begin{aligned} x(z) &= x_0 \cos(gz/c) + (dx/dz)|_{z=0}(c/g) \sin(gz/c), \\ y(z) &= y_0 \cos(gz/c) + (dy/dz)|_{z=0}(c/g) \sin(gz/c), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $c = [n(x_0, y_0)/n_0] \cos \theta_0 = [n(x, y)/n_0] \cos \theta$ 是与入射条件相联系的一个常数; x_0 与 y_0 是在 $z=0$ 处光线的位置坐标; θ_0 与 θ 是光线在透镜内部 $z=0$ 与 $z=z$ 处与 Z 轴的夹角。为

了便于应用矩阵光学的理论,我们对式(2)作了一些变换。设光线轨迹曲线切线矢量 τ 与 Z 轴夹角为 θ , 在 X - Y 平面方位角为 φ , 则有

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dz} &= \frac{\cos \varphi \sin \theta}{(dz/ds)} = \cos \varphi \operatorname{tg} \theta, \\ \frac{dy}{dz} &= \frac{\sin \varphi \sin \theta}{(dz/ds)} = \sin \varphi \operatorname{tg} \theta, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

定义

$$\left. \begin{aligned} t_x &= n(x, y) \cos \varphi \sin \theta, \\ t_y &= n(x, y) \sin \varphi \sin \theta, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

并利用(3)式可将(2)式化为如下的描述光线轨迹的矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} x \\ t_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(gz/c) & \sin(gz/c)/n_0g \\ -n_0g \sin(gz/c) & \cos(gz/c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ t_{x0} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} y \\ t_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(gz/c) & \sin(gz/c)/n_0g \\ -n_0g \sin(gz/c) & \cos(gz/c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_0 \\ t_{y0} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

对于子午光线, (4)、(5)和(6)式变为

$$t = n(r) \sin \theta, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} r \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(gz/c) & \sin(gz/c)/n_0g \\ -n_0g \sin(gz/c) & \cos(gz/c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_0 \\ t_0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

下面,我们首先利用(8)式来讨论自聚焦透镜的成像特性。

设透镜的长度为 z_l , 物与像到透镜的端面距离分别为 l_1 和 l_1' , 利用(8)式并取近轴近似 $C=1$, 得到透镜的成像矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} r' \\ t' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_1' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(gz_l) & \sin(gz_l)/n_0g \\ -n_0g \sin(gz_l) & \cos(gz_l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ t \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中右侧中间的二维方阵是透镜的“系统矩阵”, 记作

$$S = \begin{bmatrix} C & -D \\ -A & B \end{bmatrix}. \quad (10)$$

根据矩阵光学的理论^[4], 易得

(1) 像放大率 β

$$\beta = (r'/r) = (B + Al_1)^{-1} = [\cos(gz_l) + n_0gl_1 \sin(gz_l)]^{-1}; \quad (11)$$

(2) 角放大率 γ

$$\gamma = (t'/t) = B + Al_1 = \cos(gz_l) + n_0gl_1 \sin(gz_l); \quad (12)$$

(3) 主点位置

$$\left. \begin{aligned} l_{H'} &= [(C-1)/A] = [\cos(gz_l) - 1]/n_0g \sin(gz_l), \\ l_{H'} &= [(1-B)/A] = [1 - \cos(gz_l)]/n_0g \sin(gz_l); \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

(4) 焦点位置

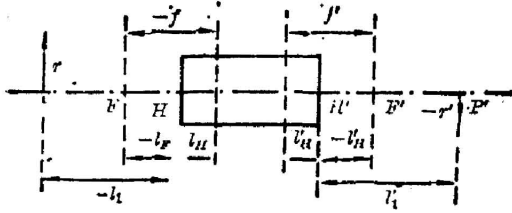
$$\left. \begin{aligned} l_{F'} &= (C/A) = [\cos(gz_l)/n_0g \sin(gz_l)] = \operatorname{ctg}(gz_l)/n_0g, \\ l_{F'} &= (-B/A) = [-\cos(gz_l)/n_0g \sin(gz_l)] = -\operatorname{ctg}(gz_l)/n_0g; \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

(5) 焦距

$$\left. \begin{aligned} f' &= (1/A) = [n_0 g \sin(gz_l)]^{-1}, \\ f &= (-1/A) = [-n_0 g \sin(gz_l)]^{-1}; \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

(6) 成像位置

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \frac{(D + Cl_1)}{(B + Al_1)} = \frac{l_1 \cos(gz_l) - [\sin(gz_l)/n_0 g]}{\cos(gz_l) + n_0 g l_1 \sin(gz_l)}, \\ v_1 &= -\text{tg}(gz_l)/n_0 g \text{ (当 } l_1=0\text{)} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$



P, P' 代表物点与像点; F, F' 代表两焦点;
H, H' 代表两主点

图 1 透镜成像各物理量的意义
Fig. 1 Parameters of a lens imaging system

上述式子中各量意义如图 1 所示, 其符号规定遵从文献 [4] 所提出的符号公约。由上述式子可知, 当 $0 < gz_l < \pi$ 时, 两主点在透镜内部, 而当 $\pi < gz_l < 2\pi$ 时, 两主点在透镜外部; 当 $0 < gz_l < (\pi/2)$ 时, 两焦点在透镜之外, 当 $(\pi/2) < gz_l < \pi$ 时, 两焦点在透镜之内, 而 $gz_l = (\pi/2)$ 时, 两焦点落在透镜端面上, 称这种情形的透镜为“1/4 节距透镜”; 透镜的焦距与 g 值成反比, 且依赖于透镜长度。

此外, 当入射光纤紧贴透镜端面 ($l_1=0$) 时, 若 $0 < gz_l < (\pi/2)$, 则成虚像于透镜左侧, 得到发散光束; 若 $(\pi/2) < gz_l < \pi$, 则成实像于透镜右侧, 当满足条件

$$\pi - \text{tg}^{-1}(NA_f/R_f n_0 g) < gz_l \leq \pi, \quad (17)$$

式中 R_f 是物 (例如光纤) 的半径; NA_f 是其数值孔径。在端面与成像点之间可以得到会聚光束。

三、最佳耦合条件

利用两个自聚焦透镜可以构成如图 2 所示的准直-聚焦耦合系统, 在近轴近似条件下, 其系统矩阵为

$$S = \begin{bmatrix} C & -D \\ -A & B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(g_2 z_{l_2}) & \sin(g_2 z_{l_2})/n_2 g_2 \\ -n_2 g_2 \sin(g_2 z_{l_2}) & \cos(g_2 z_{l_2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(g_1 z_{l_1}) & \sin(g_1 z_{l_1})/n_1 g_1 \\ -n_1 g_1 \sin(g_1 z_{l_1}) & \cos(g_1 z_{l_1}) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$A = n_2 g_2 \sin(g_2 z_{l_2}) [\cos(g_1 z_{l_1}) - d n_1 g_1 \sin(g_1 z_{l_1})] + n_1 g_1 \sin(g_1 z_{l_1}) \cos(g_2 z_{l_2}), \quad (19)$$

$$B = -n_2 g_2 \sin(g_2 z_{l_2}) \{ [\sin(g_1 z_{l_1})/n_1 g_1] + d \cos(g_1 z_{l_1}) \} + \cos(g_1 z_{l_1}) \cos(g_2 z_{l_2}), \quad (20)$$

$$C = \cos(g_2 z_{l_2}) [\cos(g_1 z_{l_1}) - d n_1 g_1 \sin(g_1 z_{l_1})] - (n_1 g_1/n_2 g_2) \sin(g_1 z_{l_1}) \sin(g_2 z_{l_2}), \quad (21)$$

$$D = -\cos(g_2 z_{l_2}) \{ [\sin(g_1 z_{l_1})/n_1 g_1] + d \cos(g_1 z_{l_1}) \} - (1/n_2 g_2) \cos(g_1 z_{l_1}) \sin(g_2 z_{l_2}). \quad (22)$$

系统的成像矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ t_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & -D \\ -A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ t_1 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

这里, 已取 $l=V=0$ (即输入输出光纤均紧贴在透镜端面上)。为不失一般性起见, 设输入输出光纤具有相同芯径与数值孔径, 为了得到无耦合损耗系统, 必须要满足如下条件:

(1) 输出光束的半径 $|r_2|_{\max}$ 小于或等于接收光纤纤芯半径 R_{f_2} 。

(2) 输出光束的数值孔径 $|t_2|_{\max}$ 小于或等于接收光纤的数值孔径 NA_{f_2} 。

即必须对(23)式中的矩阵元素作适当选择。由关系式 $\gamma\beta=1$, 我们断定, 角放大率与像放大率的绝对值不可能同时小于 1, 因此 $\gamma=\beta=\pm 1$ 是理想的选择, 对应有 $C=B=\pm 1$, A 和 D 可有三种选择, 即 $A=D=0$; $A=0, D\neq 0$; $D=0, A\neq 0$ 。

第一种情形, $C=B=\pm 1, A=D=0$, 由(19)式可得

$$\operatorname{tg}(g_2 z_{i_2}) = \frac{n_1 g_1 \sin(g_1 z_{i_1})}{n_2 g_2 [n_1 g_1 d \sin(g_1 z_{i_1}) - \cos(g_1 z_{i_1})]} = \frac{(n_1 g_1 / n_2 g_2)}{n_1 g_1 d - [1 / \operatorname{tg}(g_1 z_{i_1})]}, \quad (24)$$

又由(22)式可得

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(g_2 z_{i_2}) &= -\frac{(n_2 g_2 / n_1 g_1) \sin(g_1 z_{i_1}) + n_2 g_2 d \cos(g_1 z_{i_1})}{\cos(g_1 z_{i_1})} \\ &= -(n_2 g_2 / n_1 g_1) [n_1 g_1 d + \operatorname{tg}(g_1 z_{i_1})], \end{aligned} \quad (25)$$

再由(20)式减去(21)式有

$$\operatorname{tg}(g_2 z_{i_2}) = \frac{n_1 g_1 d \sin(g_1 z_{i_1})}{(n_2 g_2 / n_1 g_1) [\sin(g_1 z_{i_1}) + n_1 g_1 d \cos(g_1 z_{i_1})] - (n_1 g_1 / n_2 g_2) \sin(g_1 z_{i_1})} \circ \quad (26)$$

由(24)与(25)式解得

$$\operatorname{tg}(2g_1 z_{i_1}) = \frac{2n_1 g_1 d (n_2 g_2)^2}{(n_1 g_1 n_2 g_2 d)^2 + (n_1 g_1)^2 - (n_2 g_2)^2}, \quad (27)$$

由(24)与(26)两式解得

$$\operatorname{tg}(g_1 z_{i_1}) = \frac{2n_1 g_1 d (n_2 g_2)^2}{(n_1 g_1 n_2 g_2 d)^2 + (n_1 g_1)^2 - (n_2 g_2)^2} \circ \quad (28)$$

要使(27)与(28)两式同时成立, 仅当 $d=0$, 且 $g_1 z_{i_1}=0$ 或 π , 这是没有意义的解。故 D 与 A 不能够同时为 0, 因此第一种情形不可能出现。

第二种情形, $C=B=\pm 1, A=0, D\neq 0$, 由(28)式代入(26)式得

$$\operatorname{tg}(g_2 z_{i_2}) = \frac{2n_2 g_2 d (n_1 g_1)^2}{(n_1 g_1 n_2 g_2 d)^2 + (n_2 g_2)^2 - (n_1 g_1)^2}, \quad (29)$$

由(22)式并利用(28)与(29)两式推出

$$D = -d \circ \quad (30)$$

这时在角向不存在光损耗, 但由于 $D\neq 0$, 接收光纤未处于清晰成像位置, 光斑发散导致了很大的径向损耗, 因此这种情形并不可取。

第三种情形, $C=B=\pm 1, D=0, A\neq 0$, 由(25)与(26)两式解得

$$\operatorname{tg}(g_1 z_{i_1}) = -\frac{n_1 g_1 n_2 g_2 d}{n_2 g_2 \pm n_1 g_1}, \quad (31)$$

(31)式代入(26)式有

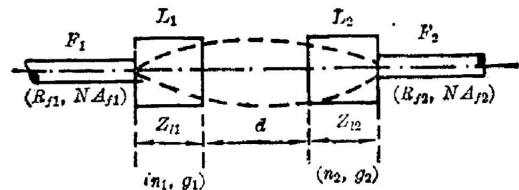


图 2 准直-聚焦系统

Fig. 2 Collimating and focussing system

$$\operatorname{tg}(g_2 z_{i_2}) = -\frac{n_1 g_1 n_2 g_2 d}{n_1 g_1 \pm n_2 g_2}, \quad (32)$$

式中“+”号与 $l_1 < d$ 对应; “-”号与 $l_1 > d$ 对应, l_1 由(16)式决定。

由(19)式, 利用(31)与(32)式求得 A 为

$$A = -n_1 g_1 n_2 g_2 d. \quad (33)$$

在此情况下, 接收光纤处于清晰成像位置, 在径向无光损耗; 在角向由于 $A \neq 0$, 存在着光线逸出损耗, 但这种损耗比起第二种情形要小得多, 因为由(23)与(33)式可知, 对于输入光纤端面上的坐标为 r_1 的点所发出的光线, 只要满足下列条件, 就能被接收

$$t_1 \leq N A_{f_1} - n_1 g_1 n_2 g_2 d |r_1|, \quad \left(\begin{array}{l} r_1 > 0 \\ l_1 < d \end{array} \text{ 或 } \begin{array}{l} r_1 < 0 \\ l_1 > d \end{array} \right) \quad (34)$$

或

$$t_1 \geq -(N A_{f_1} - n_1 g_1 n_2 g_2 d |r_1|), \quad \left(\begin{array}{l} r_1 < 0 \\ l_1 < d \end{array} \text{ 或 } \begin{array}{l} r_1 > 0 \\ l_1 > d \end{array} \right) \quad (35)$$

因此, 第三种情形不失为损耗最小的一种选择。尤为可取的是, 这种情况下的损耗可以通过减小 g 值得到降低。

(31)、(32)两式可作为设计最低损耗耦合系统的计算公式。

对于由两个自聚焦透镜构成的准直-聚焦耦合系统, 设计参数主要有: 透镜半径, 透镜长度与聚焦参数以及透镜间距。透镜半径由 $g = \sqrt{n_0^2 - n_a^2} / a n_0$ 与聚焦参数相联系, 而聚焦参数、长度与间距则由(31)和(32)式来决定。允许的几种选择如下所述:

(1) $n_1 g_1 = n_2 g_2$ 取负号, 则有

$$g_1 z_{i_1} = g_2 z_{i_2} = (\pi/2), \quad (36)$$

此时两个透镜同为 1/4 节距。这种选择的好处是 1/4 节距透镜容易加工, 不利因素是经准直透镜出来的光束是发散的, 这就限制了间距 d 不能过大; 此外, g_1 与 g_2 完全相等在实际上也难以达到。

(2) $n_1 g_1 > n_2 g_2$ 取负号, 有

$$\left. \begin{array}{l} g_1 z_{i_1} = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{n_1 g_1 n_2 g_2 d}{n_1 g_1 - n_2 g_2} \right), \\ g_2 z_{i_2} = \pi - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{n_1 g_1 n_2 g_2 d}{n_1 g_1 - n_2 g_2} \right), \end{array} \right\} \quad (37)$$

此时准直透镜比 1/4 节距短而聚焦透镜长于 1/4 节距, 这种选择具有和上面一种选择相同的不足之处, 即准直透镜出射的是发射光束, 导致聚焦透镜接收上的困难。

(3) $n_1 g_1 < n_2 g_2$ 取负号, 有

$$\left. \begin{array}{l} g_1 z_{i_1} = \pi - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{n_1 g_1 n_2 g_2 d}{n_2 g_2 - n_1 g_1} \right), \\ g_2 z_{i_2} = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{n_1 g_1 n_2 g_2 d}{n_2 g_2 - n_1 g_1} \right), \end{array} \right\} \quad (38)$$

此时, 准直透镜长于 1/4 节距而聚焦透镜短于 1/4 节距。显然这种选择克服了上述两种选择的不足, 其准直透镜出射的光束可以是会聚光束, 因此减小了在接收透镜端面的逸出损耗。

(4) 在(31)与(32)式中取正号, 有

$$g_1 z_{l_1} = g_2 z_{l_2} = \pi - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{n_1 g_1 n_2 g_2 d}{n_1 g_1 + n_2 g_2} \right), \quad (39)$$

此时两个透镜都比 1/4 节距长。这是一种比较灵活的选择, 允许 $n_1 g_1 = n_2 g_2$, 也允许两个透镜的参数不同。

上述四种选择比较起来, 以后两种为佳, 下文的计算分析将证实这一点。显然, 不允许两个透镜都比 1/4 节距短的选择。

四、耦合损耗综合分析

在上面的讨论中, 只涉及到交轴光线而没有考虑到偏斜光线的影响。在实际的加工中, 棒料的选择与透镜的研磨都有可能满足不了最佳耦合系统的要求。那么, 这些因素对于耦合损耗的影响程度究竟如何呢? 我们利用光线追迹法, 对耦合损耗进行了综合分析。

1. 光线追迹法

将输入光纤端面近似看作一个均匀发光的平面光源, 沿径向从中心向外等间隔地截取 8 个圆周, 并在每个圆周上等间隔地取 $6M$ 个点 ($M=1, 2, \dots, 8$) 作为“点源”, 总共有 217 个这样的点源, 它们彼此之间大致相等, 因此在端面上呈均匀分布; 每一点源在与 Z 轴成 θ 角的方向发射一簇锥形光线, 光线的方位角彼此相差 $(\pi/4)$ (除 $\theta=0$, 只取一根光线以外, 其余角度都取 8 根光线); 光线的发射角从 0 到 θ_m 等间隔地分为 5 份, θ_m 与光纤的数值孔径 NA_1 相对应。

利用 (5) 与 (6) 式, 在近轴近似条件下, 得到每一点源发出的每一根光线的传播轨迹为

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1 \\ t_{x_1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(g_1 z_{l_1}) & \sin(g_1 z_{l_1})/n_1 g_1 \\ -n_1 g_1 \sin(g_1 z_{l_1}) & \cos(g_1 z_{l_1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ t_{x_0} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} y_1 \\ t_{y_1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(g_1 z_{l_1}) & \sin(g_1 z_{l_1})/n_1 g_1 \\ -n_1 g_1 \sin(g_1 z_{l_1}) & \cos(g_1 z_{l_1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_0 \\ t_{y_0} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} x_2 \\ t_{x_2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ t_{x_1} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} y_2 \\ t_{y_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ t_{y_1} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} x_3 \\ t_{x_3} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(g_2 z_{l_2}) & \sin(g_2 z_{l_2})/n_2 g_2 \\ -n_2 g_2 \sin(g_2 z_{l_2}) & \cos(g_2 z_{l_2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ t_{x_2} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} y_3 \\ t_{y_3} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(g_2 z_{l_2}) & \sin(g_2 z_{l_2})/n_2 g_2 \\ -n_2 g_2 \sin(g_2 z_{l_2}) & \cos(g_2 z_{l_2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_2 \\ t_{y_2} \end{bmatrix}. \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

上述式子中各量的意义已在图 3 中示出, 利用这些式子可以求出相应的 r 值与 t 值为

$$\left. \begin{aligned} r_k &= \sqrt{x_k^2 + y_k^2}, \\ t_k &= \sqrt{t_{x_k}^2 + t_{y_k}^2}. \quad (k=0, 1, 2, 3) \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

当满足下述条件时, 光线即可被输出端的光纤完全接收

$$\left. \begin{aligned} t_0 &< NA_{l_1}, \quad r_2 < R_{l_2}, \quad t_2 < NA_{l_1}, \\ r_4 &< R_{f_1}, \quad t_4 < NA_{f_1}, \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

式中 NA_{l_1} 与 NA_{f_1} 分别是两个透镜的数值孔径。

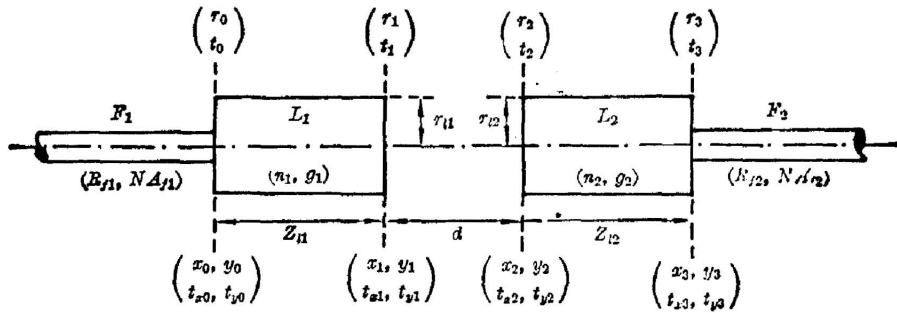


图3 准直-聚焦系统中各参量的意义

Fig. 3 Parameters of a collimating-focussing system

$$\left. \begin{aligned} NA_{i1} &= \sqrt{(r_{i1}^2 - r_0^2) n_1^2 g_1^2} \\ NA_{i2} &= \sqrt{(r_{i2}^2 - r_2^2) n_2^2 g_2^2} \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

计算由输入光纤发出的光线数目与输出光纤接收到的光线数目, 然后利用下述式子来计算耦合损耗:

$$\left. \begin{aligned} L &= -10 \lg \varepsilon, \\ \varepsilon &= \frac{\sum_i \sum_j n_{ij} \omega_j}{\sum_i \sum_j N_{ij} \omega_j}, \\ \omega_j &= \exp[-(j/5)^2 \ln 10], \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

式中 N_{ij} 是某一点源沿某个角度发出的光线锥所含光线数目, n_{ij} 是相应的接收到的光线数目; i 为点源分划计数, j 为角度分划计数; ω_j 是角向高斯权重因子。

我们以上述各点为依据编制了 Fortran 程序, 并在 VAX/780 小型机上进行了运算。

2. 计算结果

(1) 光纤芯径的影响:

从图4可知, 输入光纤比输出光纤芯径($50 \mu\text{m}$)略小一点(如 $44 \mu\text{m}$ 到 $48 \mu\text{m}$), 可使损耗降低 0.8 db 左右, 但继续减小输入光纤芯径就收效甚微了, (对较小的 g 值尤为如此)。输出光纤的芯径与数值孔同时增大, 可以使芯径同时增大, 可以使耦合损耗降低, 然而由于采用大芯径大数值孔径的粗光纤有很多不便之处, 不宜在 WDM 系统中使用。

(2) 聚焦参数的影响:

图5示出了聚焦参数的变化对耦合损耗产生的影响。随着 g 值的增大损耗也变大, 当 g 值大于 0.3 mm^{-1} 之后, 损耗几乎是线性增加。此外, g_1 与 g_2 的比值对损耗的影响甚大, 当 g_2 等于或略大于 g_1 时, 可取得较低的损耗。

(3) 透镜半径的影响:

图6给出了耦合损耗随两透镜半径变化的曲线, 这些曲线表明, 透镜半径增大到一定限度时, 将对耦合损耗不产生影响, 因此, 企图以增大透镜半径来降低损耗是得不偿失的。

(4) 透镜长度的影响:

图7表明, 透镜的长度对系统的耦合损耗影响比较大, 尤其是在 $g r_{i1}$ 小于 $(\pi/2)$ 时, 损耗呈线性增加; 而在 $g r_{i1}$ 大于 $(\pi/2)$ 时, 损耗变化较小。

(5) 间距的影响:

间距的变化对损耗产生的影响也示于图7之中。总的讲, 随着间距的增大, 损耗也变

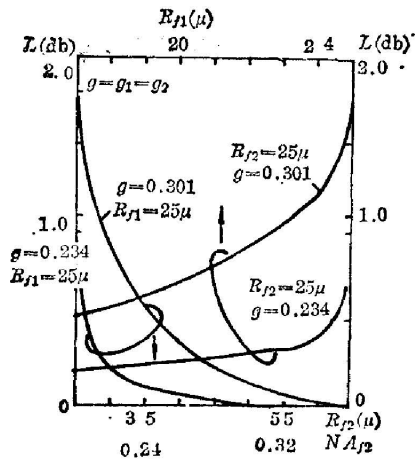


图 4 光纤芯径对损耗的影响
Fig. 4 Influences of core diameter on loss

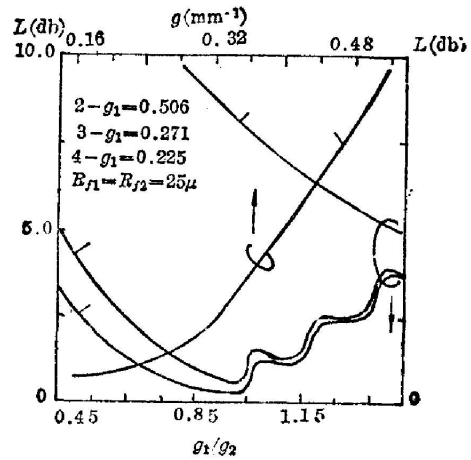


图 5 聚焦参数对损耗的影响
Fig. 5 Influences of gradient on loss

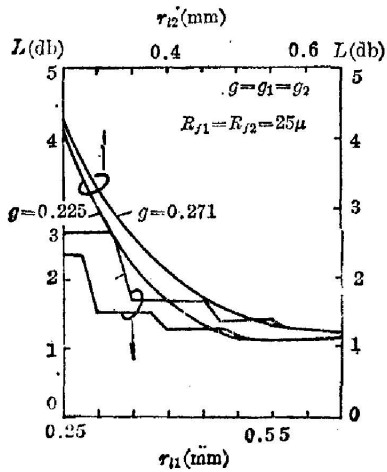


图 6 透镜半径对损耗的影响
Fig. 6 Influences of lens radius on loss

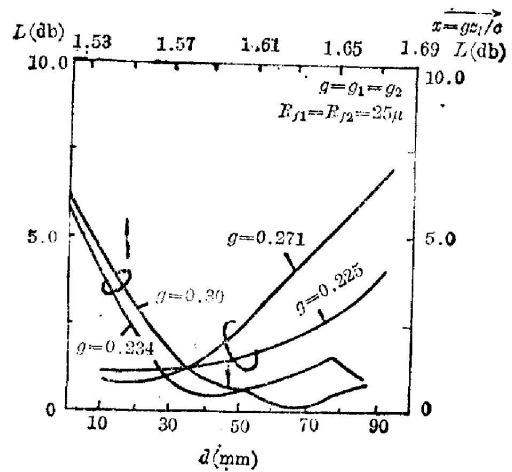


图 7 长度与间距对损耗的影响
Fig. 7 Influences of length and space on loss

大,但图 7 的曲线 3、4 表明,在 d 小于 45 mm 时,间距的变化对损耗的影响很小。

3. 结论

从以上计算结果可知,在设计 WDM 耦合系统时,对耦合损耗影响较大的两个因素是透镜的长度与其聚焦参数,而透镜的半径和间距以及光纤的芯径影响要小得多。应当指出,上述计算是在假定了耦合系统的调整误差损耗(即透镜耦合系统轴位移与倾斜引起的损耗)可以忽略的前提下进行的。在一般情况下,这是允许的,因为对于一个信道损耗低于 3 db 的 WDM 器件,其耦合系统损耗只允许有一个多 db,由调整误差引起的损耗一般应小到可以忽略不计。

五、结 语

自聚焦透镜具有和普通透镜类似的成像特性。以两个自聚焦透镜构成 WDM 耦合系

统时,为了得到比较低的损耗,必须根据最佳耦合条件对透镜的聚焦参数、长度和间距作适当选择。

根据本文计算的结果,我们研制了一种新型结构的 WDM 分路器,其耦合损耗最低的达到 0.79 db,整个器件的信道损耗低于 3.4 db,串扰衰减大于 20 db,接近于国外同类器件的一般水平^[5]。

参 考 文 献

- [1] W. J. Tomlinson; *App. Opt.*, 1977, **16**, No. 8 (Apr), 2180.
- [2] Hiaeki ISHIO; *IOOC*, 1983, p. 274C4-3.
- [3] Koichi ASATAN; *IEEE Trans. on Commu.*, 1982, **30**, No. 9 (Sep), 2172.
- [4] Nussbaum; in "Contemporary Optics for Scientists and Engineers", Englewood Cliffl, N. J. Prentice-Hall, 1976.
- [5] 刘德明,刘文达,刘树杞;《激光杂志》,(待发表)。

Coupling system of Grin rod lenses in WDM

LIU DEMING LIU WENDA AND LIU SHUQI

(Chengdu Institute of Radio and Engineering)

(Received 18 January 1985; revised 10 June 1985)

Abstract

The theory of matrix-optics is used to discuss the imaging characteristics of Grin rod lenses. Formulas for designing low-loss coupling systems are developed and effects of parameters of a coupling system on the coupling loss are analyzed.