

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0371-04

球透镜准直器耦合效率的研究*

柯昌剑 刘德明 胡必春 李 玟 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

提要 利用传输矩阵和高斯光束的有关理论,建立了准直器耦合系统附加损耗与位置失配关系的数值解模型。计算表明:耦合系统的附加损耗对角向倾斜和横向偏离两种位置失配十分敏感。实验结果很好地验证了理论模型的正确性。

关键词 准直器, 球透镜准直器, 耦合效率, 附加损耗

中图分类号 TN2 **文献标识码** A

Study on the Coupling Efficiency of Spherical-lens Collimators

KE Chang-jian LIU De-ming HU Bi-chun LI Bin HUANG De-xiu

(Department of Optoelectronics Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

Abstract A theoretical model about the relationship of misalignment and coupling efficiency is set up by using method of transfer matrix and Gaussian optics. Numerical analysis shows that excess loss is sensitive to the angular tilt and the lateral offset. The measured results offer reasonable agreement with the analysis presented in this paper.

Key words collimator, spherical-lens collimator, coupling efficiency, excess loss

1 引言

随着无源器件的迅速发展,准直器这一基础元件的作用越来越突出。由于棒透镜准直器采用普通的光学材料加工而成,具有易于量产,在长工作距离下附加损耗小等特点,目前在阵列准直器、MEMS 以及光交叉波长波分复用器(Interleaver)等领域得到广泛的应用,并且有逐步取代自聚焦透镜准直器的趋势。本文利用传输矩阵和高斯光束的有关理论,对影响球透镜准直器耦合效率的因素进行了分析,建立了耦合效率与角向位置失配和横向位置失配关系的理论数值解模型。

2 理论分析

为了建立一个比较精确的模型来描述位置失配对附加损耗的影响,首先我们根据球透镜准直器的传输矩阵,求出在某一个确定面上由输入光纤出射的高斯光束 q 参数的变化情况,并得出对应光斑的大小。然后用同样的方法得到输出光纤出射高斯光

束在同一个平面上的光斑特性。最后利用二重积分的方法计算两个高斯光斑的重叠面积,从而求出耦合效率和对应的附加损耗。

由厚透镜的传输矩阵出发,可以得到球透镜准直器的传输矩阵。为了分析的简便,不考虑楔角对球透镜传输矩阵的影响(在准直器的设计中,为了优化器件的回损特性,往往将端面加工成 $6^\circ \sim 8^\circ$ 的楔角^[1])。设两个球透镜的半径大小相等,均为 r ($r > 0$),材料折射率 n_1 相同。

在图 1 中,球透镜的传输矩阵可以分别写成

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= \begin{bmatrix} 1 & L/n_1 \\ (1-n_1)/r & 1-L(n_1-1)/n_1r \end{bmatrix} \\ T_2 &= \begin{bmatrix} 1-L(n_1-1)/n_1r & L/n_1 \\ (1-n_1)/r & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

若光纤头和透镜之间的间距为 d ,对应空气隙的传输矩阵可以写为

$$T_0 = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

因此在准直器耦合系统中输入端准直器和输出端准直器的传输矩阵可以分别写为

* 武汉市科委重大科技攻关计划资助课题。

$$M_1 = T_1 T_0, \quad M_2 = T_0 T_2 \quad (3)$$

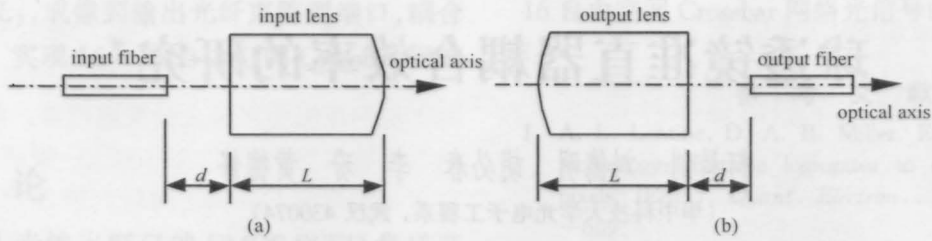


图 1 球透镜准直器耦合系统示意图

Fig. 1 Schematic of the coupling system with spherical-lens collimators. (a) Input collimator; (b) Output collimator

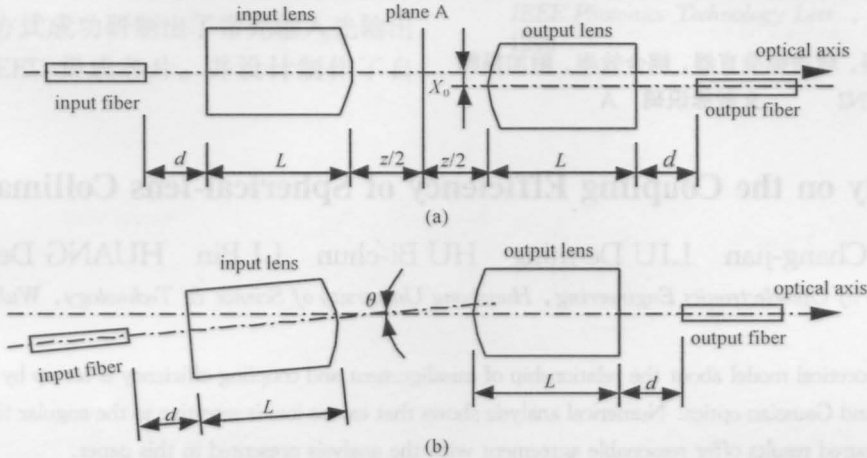


图 2 球透镜准直器耦合系统的位置失配。(a) 横向位置失配; (b) 角向位置失配

Fig. 2 Misalignment in the coupling system with spherical-lens collimators. (a) Lateral offset; (b) Angular tilt

如果输入准直器和输出准直器之间相对于最佳耦合位置产生了横向偏移,那么在输出光纤端面上将会有部分光线位于光纤的输出角之外,从而产生能量的损耗。如图 2(a)所示,在两个准直器之间垂直于轴向方向上的某一个平面 A 内计算输入准直器、输出准直器分别作为输入端时在该平面内所成高斯光斑之间重叠面积的大小就可以求得横向失配对附加损耗的影响。为了分析的简便,可以将这个平面取在两个准直器之间的中间位置上,也就是说平面 A 离开准直器端面的距离为耦合系统工作距离的一半。

输入光纤出射的高斯光束到达平面 A 时,所经光路对应的传输矩阵为

$$N_1 = T_3 M_1 = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $T_3 = \begin{bmatrix} 1 & z/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为透镜端面和平面的传输矩阵。由 ABCD 法则来求对应高斯光束 q 参数的变化情况,在平面 A 处出射的高斯光束对应的 q 参数为

$$q_1 = \frac{A_1 q_0 + B_1}{C_1 q_0 + D_1} \quad (5)$$

其中 $q_0 = i \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ 为光纤中出射高斯光束在光纤端面处的 q 参数, w_0 为模场半径, λ 为准直器的工作波长。此时高斯光束光斑的半径满足

$$\frac{1}{w_1^2} - \frac{\pi}{\lambda} \text{Im} \left\{ \frac{1}{q_1} \right\} = \frac{\pi}{\lambda} \frac{\pi w_0^2 / \lambda}{(A_1 \pi w_0^2 / \lambda)^2 + B_1^2} = \frac{\pi^2 \bar{w}_0^2}{A_1^2 \pi^2 w_0^4 + B_1^2 \lambda^2} \quad (6)$$

对于输出端准直器而言,输出光纤发出的高斯光束经过输出端透镜后在平面 A 处对应 q 参数用同样的方法可以求出。由于两个准直器到达平面 A 时高斯光束经过的传输矩阵相同,因此对应的光斑半径也相同(q 参数大小相等)。

当横向偏移为 X_0 时,球透镜准直器耦合系统对应的耦合效率为

$$E(X_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[-\frac{(x + X_0)^2 + y^2}{w_1^2} \right] \times \exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{w_1^2} \right) dx dy \quad (7)$$

设单模光纤准直器中球透镜对应的材料折射率为 $n_1 = 1.745$, 球透镜的半径 $r = 1.4$ mm, 单模光纤出射高斯光束的束腰半径为 $5.25 \mu\text{m}$, 透镜与光纤头之间的距离 $d = 0.2$ mm, 准直器出射高斯光束的束腰位置距离透镜的端面为 2.5 mm (即耦合系统的工作距离为 5 mm), 那么透镜的长度为 2.93 mm。从图 3(a) 可以看出, 随着横向偏移的增大, 附加损耗急剧增加。当横向偏移为 $100 \mu\text{m}$ 时, 耦合系统的附加损耗将达到 3 dB。

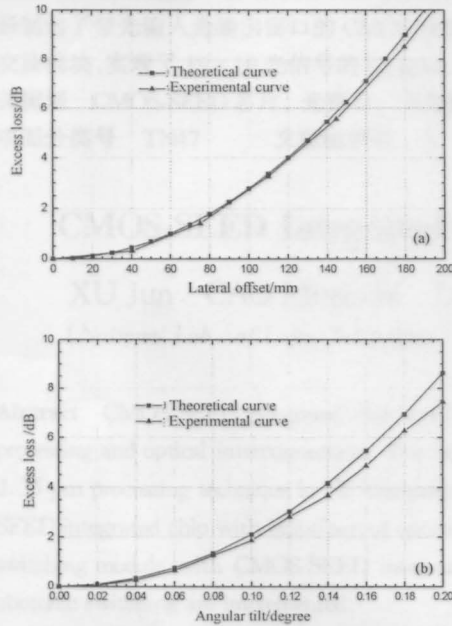


图3 球透镜准直器附加损耗与位置失配的理论 and 实验关系曲线。(a) 横向失配; (b) 角向失配

Fig. 3 Theoretical and experimental curve of excess loss versus misalignment. (a) Lateral offset; (b) Angular tilt

如果耦合系统中的两个准直器相对于最佳耦合位置发生了角向的倾斜, 那么在输出光纤的端面上入射的高斯光束光斑 (即输入光纤发出的高斯光束光斑在此处所成的像) 相对于输出光纤的模式 (也可以看成输出光纤发出的高斯光束光斑) 产生了一个横向的位移, 它会导致耦合效率的降低, 从而引起损耗, 如图 2(b) 所示。

为了分析的简便, 我们假设当输入准直器偏移最佳耦合位置 θ 角入射到输出准直器的顶点处时, 在输出光纤的端面仅是光斑的位置沿垂直于光轴的方向上移动了 d_1 , 而其他的参数均可认为基本不变。由于角向倾斜的角度非常小, 一般在 0.2° 以内, 因此两个准直器之间的空气隙的传输矩阵仍可以近似的写为

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

输入光纤出射的高斯光束到达输出光纤端面时, 所经光路对应的传输矩阵为

$$N_2 = M_2 T_3 M_1 = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

在输出光纤端面处高斯光束光斑半径满足

$$\frac{1}{w_2^2} = \frac{\pi}{\lambda} \frac{\pi w_0^2 / \lambda}{(A_2 \pi w_0^2 / \lambda)^2 + B_2^2} = \frac{\pi^2 w_0^2 / \lambda^2}{(A_2 \pi w_0^2 / \lambda)^2 + B_2^2} \quad (10)$$

输出光纤端面处高斯光束光斑的位置沿垂直于光轴的方向移动量 d_1 满足

$$d_1 = \left(\frac{L}{n_1} + d \right) \theta \quad (11)$$

所以当角向倾斜为 θ 时, 球透镜准直器耦合系统对应的耦合效率为

$$E(\theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[- \frac{(x + d_1)^2 + y^2}{w_2^2} \right] \times \exp \left(- \frac{x^2 + y^2}{w_2^2} \right) dx dy \quad (12)$$

球透镜的具体参数和前述分析中的相同, 角向倾斜和附加损耗变化之间的理论关系曲线, 如图 3 (b) 所示。从曲线上我们看出, 随着角向偏移的增大, 附加损耗急剧增加。当角向倾斜为 0.12° 时, 耦合系统的附加损耗将达到 3 dB。

3 实验研究

我们用球透镜准直器、五维调节架、宽带光源以及光功率计构成测试准直器位置失配与耦合效率关系的实验系统。为了只考虑位置失配对耦合效率的影响, 我们先把两个准直器在工作距离为 5 mm 的位置上将插入损耗调节到最小, 此时的损耗值 (一般小于 0.5 dB) 对应了耦合系统的固有损耗。在测量位置失配对准直器耦合系统耦合效率的影响时, 将不考虑这一部分损耗的作用。

附加损耗随角向和横向位置失配的理论关系曲线如图 3 所示。从该组曲线上可知, 随着横向和角向偏移的增大, 附加损耗急剧增加。在图 3 (a), 理论值和实验值吻合得比较好, 后者要略小于前者。这主要是因为准直器在横向移动时, 并不可能在完全垂直于光轴的方向上运动, 实验中显示的横向位移量要小于实际位移量, 因此引起了误差。在图 3 (b) 中, 实验值要略小于理论值。这是由于准直器发生角向倾斜时, 实验中显示的角向倾斜量要小于实际倾斜量所引起的。同样的, 自聚焦透镜准

