

自聚焦棒透镜准直系统的装配误差引起的附加耦合损耗分析*

胡卫生 曾庆济

(上海交通大学电子信息学院宽带光网技术研究开发中心 上海 200030)

摘要 一对 1/4 节距自聚焦棒透镜构成的准直系统通常存在三种装配误差: 错位、间隔和倾斜, 由此产生一定的附加耦合损耗。理论分析和数值计算结果表明, 损耗与装配误差在小范围内近似呈平方递增关系, 增幅与透镜聚焦参数有关。根据具体装配工艺选取合适的自聚焦棒透镜, 能显著降低耦合损耗。

关键词 自聚焦棒透镜, 准直系统, 装配误差, 耦合损耗, 光纤通信

1 引言

在光纤通信器件中普遍使用自聚焦棒透镜耦合光路^[1~4]。一对 1/4 节距的自聚焦棒透镜构成准直系统, 通常存在三种可能的装配误差^[5]: (1) 错位(Offset): 表示为两自聚焦棒透镜的横向位移 X_0 (mm); (2) 间隔(Separation): 表示为两自聚焦棒透镜的间距 Z_0 (mm); (3) 倾斜: 表示为两自聚焦棒透镜光轴的夹角 θ (弧度或度)。如图 1 所示。装配误差产生一定的附加耦合损耗(Excess Loss)。

单模光纤中传输的是基模高斯光束, 用几何光学方法来处理高斯光束在自聚焦棒透镜中的传输是欠妥的, 结果也不甚准确^[5]。本文将采用高斯光学方法为主来讨论准直系统的损耗问题, 给出具体的理论分析和数值计算结果, 更接近于已报道的实验结果。并进一步讨论如何根据装配工艺的要求来选择合适的自聚焦棒透镜。

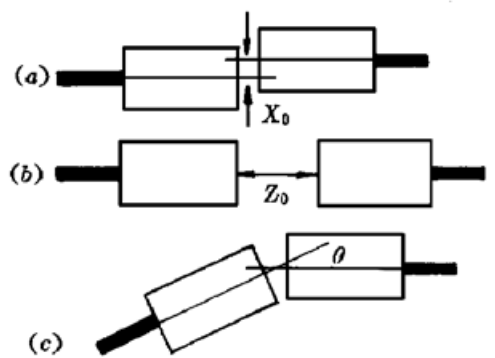


图 1 三种失配误差示意图

(a) 错位 X_0 ; (b) 间隔 Z_0 ; (c) 倾斜 θ

Fig. 1 Schematic of three kinds of misalignments

(a) lateral offset X_0 ; (b) longitudinal separation Z_0 and (c) angular tilting θ

2 理论基础

2.1 光束在自聚焦棒透镜中的传输

自聚焦棒透镜的折射率呈梯度分布, 中心折射率为 n_0 , 离轴 r 处的折射率为

* 国家高技术 863 资助项目。

$$n(r) = n_0 \left[1 - \frac{1}{2} A r^2 \right] \quad (1)$$

式中聚焦参数 \sqrt{A} 表示折射率的变化程度。长度 Z 的自聚焦棒透镜的成像规律为^[6, 7]

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ n_0 r_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \sqrt{A} Z & \sin \sqrt{A} Z / n_0 A \\ -n_0 A \sin \sqrt{A} Z & \cos \sqrt{A} Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ n_0 r_1' \end{bmatrix} \quad (2)$$

此处 $\sqrt{A} Z = \pi/2$; r' 是 r 的导数, 表示光线斜率。一束平行光以 θ 角斜入射至自聚焦棒透镜, 汇聚后的光点将移至离轴 D_θ 处, 由(2) 式得到

$$D_\theta = \tan \theta / n_0 \sqrt{A} \quad (3)$$

2.2 高斯光束的传输

高斯光束的束斑半径 w , 曲率半径 R , 复曲率参数 q 满足^[7]

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} + \frac{i\lambda}{\pi w^2} \quad (4)$$

高斯光束在自聚焦棒透镜中的传输满足 $ABCD$ 定律, 即

$$q^2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (5)$$

式中 q_1 和 q_2 为自聚焦棒透镜两端参考平面处的 q 值, A, B, C 和 D 为(2) 式中光线矩阵的四个矩阵元。单模光纤中高斯光束的束斑半径 $w_0 = 5.25 \mu\text{m}$ ^[5], 经自聚焦棒透镜准直后变成

$$w_1 = \frac{\lambda}{\pi n_0 \sqrt{A} w_0} \quad (6)$$

高斯光束继续在均匀介质(空气) 中传输一段距离 Z_0 后, 束斑半径和曲率半径分别变成

$$w_2^2 = w_1^2 \left[1 + \left[\frac{\lambda Z_0}{\pi w_1^2} \right]^2 \right] \quad (7)$$

$$R_2 = Z_0 \left[1 + \left[\frac{\pi w_1^2}{\lambda Z_0} \right]^2 \right] \quad (8)$$

2.3 耦合效率

耦合效率表示原光束(i) 激发起新光束(j) 时的能量转换效率, 与束斑半径及曲率半径有关^[8]。在两光束曲率半径同时为 ∞ 的参考平面处耦合效率的计算很简单, 直接求两高斯函数的交叠积分即可^[5]。但曲率半径不同时, 耦合效率 κ 应由下式计算^[8]

$$\frac{4}{\kappa} = \left[\frac{w_j}{w_i} + \frac{w_i}{w_j} \right]^2 + \left[\frac{\pi w_i w_j}{\lambda} \right]^2 \left[\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_j} \right]^2 \quad (9)$$

3 装配误差引起的附加耦合损耗分析

3.1 错位 X_0

分析方法同文献[5], 但 w_1 值由(6) 式计算, 不同于文献[5] 中用几何光学方法得到的结果。一般 X_0 较小, 附加耦合损耗为

$$L_{\text{offs}}(\text{dB}) = 4.343 \left[\frac{\pi n_0 \sqrt{A} w_0 X_0}{\lambda} \right]^2 \quad (10)$$

可见, 损耗与 X_0 成平方递增关系。此外, \sqrt{A} 值越小, 损耗对错位的敏感性越低, 如图 2(a) 所示。图中比较了 4 种不同 \sqrt{A} 值情形: (\neg) $\sqrt{A} = 0.238 \text{ mm}^{-1}$, $n_0 = 1.552$; (\neg) $\sqrt{A} =$

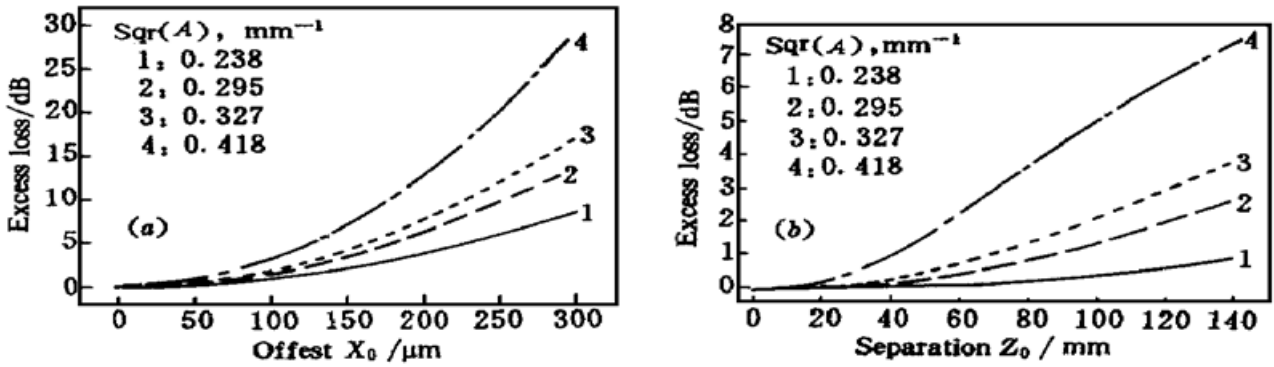


图2 错位 (a) 和间隔 (b) 引起的附加损耗。图中比较了 4 种 \sqrt{A} 值情形

Fig. 2 Lateral-offset (a) and longitudinal-separation (b) induced excess loss

It depends on \sqrt{A} value, which is listed inside the figure

0.295 mm⁻¹, $n_0 = 1.592$; (—) $\sqrt{A} = 0.327$ mm⁻¹, $n_0 = 1.592$; (---) $\sqrt{A} = 0.418$ mm⁻¹, $n_0 = 1.636$ 。取值在 $\lambda = 1.3$ μm 波段^[9]。图中曲线 — 与文献[5]比较,更接近于其实验值。

3.2 间隔 Z_0

高斯光束经过自聚焦棒透镜之间的间隔 Z_0 后扩展为 w_2, R_2 , 由 (7) 和 (8) 式计算。代入 (9) 式计算出 κ 值后,求得损耗

$$L_{\text{sep}}(\text{dB}) = 4.343 \ln(1/\kappa) \quad (11)$$

计算结果示于图 2 (b)。图中表示了 4 种不同 \sqrt{A} 值的结果。与文献[5]比较,曲线 — 更接近于其实验值。此外, \sqrt{A} 值越小,同样间隔引起的损耗越小。

3.3 倾斜 θ

倾斜光束通过自聚焦棒透镜后的会聚点平移量由 (3) 式计算。不难得到^[5]

$$L_{\text{tilt}}(\text{dB}) = 4.343 \left[\frac{\tan \theta}{n_0 \sqrt{A} w_0} \right]^2 \quad (12)$$

在 θ 较小时,损耗与 θ 近似成平方递增关系。此外, \sqrt{A} 值越小,损耗对倾斜的敏感性越强烈,如图 3 所示。图中比较了不同 \sqrt{A} 值的结果。

总之,损耗对三种装配误差的敏感性与 \sqrt{A} 值的依赖关系不同,存在两种截然相反的情形。如果要求有较大的间隔 Z_0 或错位 X_0 ,应优先选用较小 \sqrt{A} 值的自聚焦棒透镜。相反,如果允许稍大的倾斜误差,应选用较大 \sqrt{A} 值的自聚焦棒透镜。

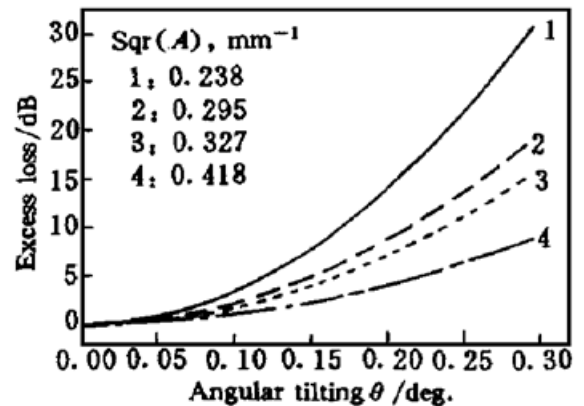


图3 倾斜引起的附加损耗。图中比较了 4 种

\sqrt{A} 值情形

Fig. 3 Angular-tilting induced excess loss. It

depends on \sqrt{A} value, which is listed inside the figure

参 考 文 献

- 1 Y. Fujii, J. Minowa, T. Aoyawa *et al.*. Low-loss 4×4 optical matrix switch for fibre-optic communication. *Electron. Lett.*, 1979, **15**(14): 427~ 428
- 2 J. Minowa, Y. Fujii, Y. Nagata *et al.*. Nonblocking 8×8 optical matrix switch for fibre-optic communication. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(11): 422~ 423
- 3 M. A. Scobey, D. E. Spock. Passive DWDM components using microplasma optical interference filters. *Opt. Fib.*

- Commun.*, Tech. Digest, Marlborough, MA, 1996. ThK1, 242~ 243
- 4 Liu Deming, Liu Wenda, Liu Shuqi. Coupling system of Grin rod lenses in WDM. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1985, **5**(12): 1118~ 1126 (in Chinese)
- 5 R. W. Gilsdorf, J. C. Palais. Single-mode fiber coupling efficiency with graded-index rod lenses. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(16): 3440~ 3445
- 6 Yin Zongming. Guided-Waves in Optic Fibers——Theory and Devices. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1995. 162~ 185 (in Chinese)
- 7 A. Gerrand, J. M. Burch. Introduction to matrix methods in optics. London: John Wiley & Sons, 1975. Chap. 1 and 2
- 8 H. Kogelnik. Coupling and conversion coefficients for optical modes. *Proc. Symp. on Quasi-Optics*, Microwave Res. Inst. Symp. Series, Brooklyn: Polytech. Press of Polytech. Inst. Brooklyn, 1964, **1**: 333~ 337
- 9 SELFOC[®] Product Guide, NSG America, Inc., Somerset, N.J., 1992. 1~ 26

Misalignment-induced Excess Loss in Gradient-index-rod Lens Collimating Systems

Hu Weisheng Zeng Qingji

(BONTECH R&D Center, Faculty of Electronic and Information,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract In a collimating system formed by a pair of quarter-pitch gradient-index-rod (GRIN) lenses, there exist three kinds of assembling misalignments: lateral offset, longitudinal separation and angular tilting. Excess coupling losses so arise. The losses increase quadratically with the misalignment amounts when they are small, depending on the focusing parameter of the GRIN lens. It is possible to reduce the excess losses greatly by choosing an appropriate lens in accordance with the practical assembling conditions.

Key words gradient-index-rod, collimating system, assembling misalignment, coupling loss, optical fiber communications