

# 光纤-自聚焦棒-反射器耦合系统 的后向耦合系数\*

王 效 敬

(杭州大学 物理系)

## 提 要

用光线矩阵方法推导了光纤-自聚焦棒-反射器在共轴耦合情况下的后向耦合系数;分析了它与耦合系统结构参数之间的关系。用计算机模拟画出了反射器为平面镜的系统的后向耦合系数和后向耦合损耗的曲线分布,计算曲线与实验结果大致符合。

关键词: 后向耦合系数, 光线矩阵, 共轴耦合自聚焦透镜。

## 一、引 言

某些光纤传感器采用光纤-自聚焦棒-自聚焦棒-光纤耦合系统<sup>[1]</sup>,它与光纤-光纤耦合比较耦合系数增大了,且允许较大的传感器件插入。如果在光纤-自聚焦棒后加一个反射器,构成一个光纤-自聚焦棒-反射器的后向耦合系统,除了具有前者的优点外,它还能节省一路光纤。而且传感器件可直接与反射器结合,使其结构紧凑。

当光纤芯径比光波波长长很多时,可以用几何光学理论分析包含光纤的各种耦合系统的耦合系数和耦合损耗<sup>[2,3]</sup>。这种处理方法虽然不够严格,但足以说明问题。本文用光线矩阵方法推导了光纤-自聚焦棒-反射器在共轴耦合情况下的后向耦合系数表示式;分析系统结构参数之间的关系;用计算机模拟描绘了曲线分布,确定最佳耦合结构。实验结果与理论分析大致相符。

## 二、光纤-自聚焦棒-反射器的后向耦合系数

图1表示一个光纤-自聚焦棒-反射器共轴耦合系统。自聚焦棒的左右端面选为参考面,于是坐标 $z_1$ 和 $z_2$ 就分别为光纤端面和反射器反射面各自与自聚焦棒左右端面之间的距离。 $z_1$ 自 $O_1$ 点向左为正; $z_2$ 自 $O_2$ 点向右为正,按此规定 $z_1$ 和 $z_2$ 只能为正。 $a_0, \theta_{nf}$ 分别为光纤芯的半径和与数值孔径对应的孔径角, $b_0, \theta_{ns}$ 分别为自聚焦棒的半径和与数值孔径对应的孔径角,自聚焦棒选用 $1/4$ 节距长的,其焦距用 $2f=L$ 表示。 $r_0, \theta_0; r_1, \theta_1; r_2, \theta_2$ 及 $r_3, \theta$ 分别表示光纤端面、自聚焦棒左右端面及反射器反射面处的右传光束半径和发散角(简称为光束参量); $r'_3, \theta'_3; r'_2, \theta'_2; r'_1, \theta'_1$ 及 $r'_0, \theta'_0$ 分别表示反射器反射面、自聚焦棒左右端面及光纤端面处的左传(即后向)光束参量。

收稿日期: 1989年11月17日; 收到修改稿日期: 1990年2月19日

• 国家自然科学基金资助的项目。

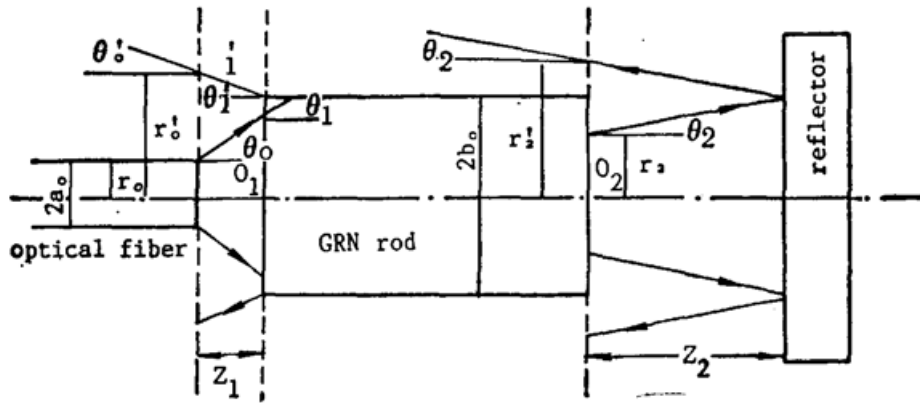


Fig. 1 Schematic of fiber-grin rod-reflector retrocoupling configuration

从光纤芯端面射出的光束,可近似看作朗伯发射,如果不考虑器件及其界面的吸收、散射和反射等损耗,在傍轴光线近似下,有关三个端面处的光功率耦合系数<sup>[3]</sup>:右传光束进入自聚焦棒左端面的分数  $K_1$ ,左传光束进入自聚焦棒右端面的分数  $K_2$ ,和左传光束进入光纤端面的分数  $K_3$ ,应分别为

$$K_1 = \frac{b_0^2 \theta_{ns}^2}{r_1^2 \theta_1^2}, \quad (1)$$

$$K_2 = \frac{b_0^2 \theta_{ns}^2}{r_2^2 \theta_2^2}, \quad (2)$$

$$K_3 = \frac{a_0^2 \theta_{nf}^2}{r_0^2 \theta_0^2}. \quad (3)$$

所以光纤-自聚焦棒-反射器的后向功率耦合系数应为

$$K = K_1 K_2 K_3. \quad (4)$$

### 1. $K_1$ 的表示式

光束参数  $r_0, \theta_0$  近似可用  $a_0, \theta_{nf}$  代替,因而

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ \theta_{nf} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

即

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= a_0 + z_1 \theta_{nf}, \\ \theta_1 &= \theta_{nf}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

根据  $r_1, \theta_1$  与  $b_0, \theta_{ns}$  之间的大小关系(1)式将有四种可能表示形式。

### 2. $K_2$ 的表示式

设反射器的反射矩阵为  $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ , 已知  $1/4$  节距自聚焦棒的光线矩阵为  $\begin{pmatrix} 0 & f \\ -1/f & 0 \end{pmatrix}$ , 则光束从自聚焦棒左端面出发传至右端面,然后到达反射器,经反射面反射,从左传回到自聚焦棒右端面的光线矩阵为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & z_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & f \\ -1/f & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

由(7)式得

$$\left. \begin{aligned} A &= -\frac{1}{f}[(a+d+cz_2)z_2+b], \\ B &= (a+cz_2)f, \\ C &= -\frac{d+cz_2}{f}, \\ D &= cf, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

于是

$$\begin{pmatrix} r'_2 \\ \theta'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

由于  $r_1, \theta_1$  与  $b_0, \theta_{ns}$  之间的大小关系,  $r'_2, \theta'_2$  将有四种取值

$$\left\{ \begin{aligned} r'_2 &= Ar_1 + B\theta_{nf} \\ \theta'_2 &= Cr_1 + D\theta_{nf} \end{aligned} \quad |r_1| < b_0, |\theta_1| < \theta_{ns}, \right\} \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} r'_2 &= Ar_1 + B\theta_{ns} \\ \theta'_2 &= Cr_1 + D\theta_{ns} \end{aligned} \quad |r_1| < b_0, |\theta_1| \geq \theta_{ns}, \right\} \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{aligned} r'_2 &= Ab_0 + B\theta_{nf} \\ \theta'_2 &= Cb_0 + D\theta_{nf} \end{aligned} \quad |r_1| \geq b_0, |\theta_1| < \theta_{ns}, \right\} \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{aligned} r'_2 &= Ab_0 + B\theta_{ns} \\ \theta'_2 &= Cb_0 + D\theta_{ns} \end{aligned} \quad |r_1| \geq b_0, |\theta_1| \geq \theta_{ns}, \right\} \quad (13)$$

每一组  $r'_2, \theta'_2$  与  $b_0, \theta$  又有四种大小关系, 因此  $K_2$  的表示式(2)式将有 16 种可能取值形式。

### 3. $K_3$ 的表示式

后向回到光纤端面处的光束参量为

$$\begin{pmatrix} r'_0 \\ \theta'_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -z_1/f & f \\ -1/f & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r'_2 \\ \theta'_2 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

把(10)~(13)式代入(14)式, 得四种表示形式, 而每一种形式确定的  $r'_2, \theta'_2$  与  $b_0, \theta_{ns}$  之间又有四种可能关系, 所以  $r'_0, \theta'_0$  最终将有 16 种可能取值。由于每一组  $r'_0, \theta'_0$  与  $a_0, \theta_{nf}$  之间也有四种耦合情况, 因此  $K_3$  的表示式(3)式就有 64 种表示形式。

从以上分析可知, 总的后向功率耦合系数应该有 64 种可能表示式。在实际中可根据耦合系统的器件参数和结构参数来决定所用的具体表示式, 并给出其适用条件。

本节所得的结果是光纤-自聚焦棒-反射器共轴耦合系统后向耦合系数的一般表示式。

## 三、光纤-自聚焦棒-平面镜的后向耦合系数和耦合损耗

为了便于分析, 给定器件参数, 且只分析后向耦合系数和耦合损耗与结构参数  $z_1$  和  $z_2$  的关系。在本节的分析与计算中, 光纤选用芯径为  $130 \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.32 的阶跃光纤; 自聚焦棒选用半径为 0.95 mm, 数值孔径为 0.37, 焦距  $f=2.29 \text{ mm}$  的  $1/4$  节距自聚焦棒。已知平面镜的反射矩阵为

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

为了尽可能地降低耦合损耗, 应使  $|r_1| \leq b_0$  及  $|\theta_1| \leq \theta_{ns}$ , 由此可得

$$z_1 \leq \frac{b_0 - a_0}{\theta_{nf}} \quad (16)$$

因  $\theta_1 = \theta_{ns}$ , 所以  $\theta_1 < \theta_{ns}$  总成立。因此, (1) 式的四种可能表示中只有  $K_1 = 1$  成立。而  $r'_2$ ,  $\theta'_2$  只能由 (10) 式确定, 并考虑到 (15) 式则

$$\left. \begin{aligned} r'_2 &= f\theta_{nf} - \frac{2z_2}{f}(a_0 + z_1\theta_{nf}), \\ \theta'_2 &= -\frac{1}{f}(a_0 + z_1\theta_{nf}). \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

因而在  $K_2$  的 16 个表示式中只有两个成立, 即

$$K_2 = 1, \quad |r'_2| \leq b_0, \quad |\theta'_2| \leq \theta_{ns}, \quad (18)$$

$$K_2 = \frac{b_0^2 f^2}{[f^2 \theta_{nf} - 2z_2(a_0 + z_1\theta_{nf})]^2}, \quad |r'_2| > b_0, \quad |\theta'_2| \leq \theta_{ns}, \quad (19)$$

在  $|r_1| < a_0$ ,  $|\theta_1| < \theta_{ns}$  及  $|r'_2| < b_0$ ,  $|\theta'_2| < \theta_{ns}$  的条件下, 由 (14) 和 (17) 式得

$$\left. \begin{aligned} r'_0 &= \left( \frac{2z_1 z_2}{f^2} - 1 \right) (a_0 + z_1\theta_{ns}) - z_1\theta_{ns}, \\ \theta'_0 &= \frac{2z_2}{f^2} (a_0 + z_1\theta_{nf}) - \theta_{nf}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

在  $|r_1| < a_0$ ,  $|\theta_1| < \theta_{ns}$  及  $|r'_2| > b_0$ ,  $|\theta'_2| \leq \theta_{ns}$  的条件下, (14) 式中令  $r'_2 = b_0$ ,  $\theta'_2$  仍由 (17) 式表示, 于是得

$$\left. \begin{aligned} r'_0 &= -\left( \frac{z_1 b_1}{f} + a_0 + z_1\theta_{nf} \right), \\ \theta'_0 &= -\frac{b_0}{f}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

从 (20)、(21) 式判断  $r'_0$ ,  $\theta'_0$  与  $a_0$ ,  $\theta_{nf}$  的大小关系可知  $K_3$  的 64 个表示式中, 只有三个成立, 即

$$K_3 = \frac{f^4 a_0^2}{[(2z_1 z_2 - f^2)(a_0 + z_1\theta_{ns}) - z_1\theta_{ns} f^2]^2}, \quad |r'_0| > a_0, \quad |\theta'_0| \leq \theta_{nf}, \quad (22)$$

$$K_3 = \frac{f^4 \theta_{nf}^2}{[2z_2(a_0 + z_1\theta_{nf}) - f^2 \theta_{nf}]^2}, \quad |r'_0| \leq a_0, \quad |\theta'_0| > \theta_{nf}, \quad (23)$$

$$K_3 = \frac{f^2 \theta_{nf}^2}{b_0^2}, \quad |r'_0| \leq a_0, \quad |\theta'_0| < \theta_{nf}, \quad (24)$$

综合以上分析, 根据 (3) 式可求得总的后向耦合系数为

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{f^4 a_0^2}{[(2z_1 z_2 - f^2)(a_0 + z_1\theta_{nf}) - z_1\theta_{nf} f^2]^2}, & 0 \leq z_2 < U_1 \\ K &= \frac{f^4 \theta_{nf}^2}{[2z_2(a_0 + z_1\theta_{nf}) - \theta_{nf} f^2]^2}, & U_1 \leq z_2 \\ U_1 &= \frac{f^2 \theta_{nf}}{a_0 + z_1\theta_{nf}}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

设  $P_{\text{out}}$  表示光纤端出射的光功率,  $P_{\text{in}}$  表示后向耦合进入光纤端面的光功率, 用分贝表示的

后向功率耦合损耗则为

$$L = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}} \right) = -10 \lg K. \quad (26)$$

图 2(a)是在不同  $z_1$  下,用计算机模拟描绘的  $K \sim z_2$  曲线;图 2(b)是与之对应的损耗曲线。从中看出  $z_1$  越小,  $z_2$  低耦合损耗的范围就越大。显然,当  $z_1 = 0$  时,其耦合结构为最佳。但是在光纤与自聚焦棒的接合工艺中,很难达到完全没有间隙,这就是说,在实际中  $z_1$  不等于零,因而最低耦合损耗只对应坐标  $z_2$  的一个点,为了验证这点,采用如图 3 所示的装置进行了实验,在 Y 型定向耦合器的 1、2、3 各端分别与自聚焦棒、光电二极管( $P_{\text{in}}$ )及发光二极管(LED)直接耦合,自聚焦棒右侧放置一个平面反射镜,平面镜被安装在一个微调坐标平台上,自发光二极管发射的光进入 Y 型定向耦合器的 3 端经 1 端通过自聚焦棒投射到平面镜上,其反射光再次通过自聚焦棒进入 1 端并传至 2 端的  $P_{\text{in}}$  后向耦合光功率由与  $P_{\text{in}}$  相连接的精密光功率计测定。图 4(a)和(b)分别为  $z_1 = 0.2 \text{ mm}$  (光缆与自聚焦棒已封牢)时,  $K \sim z_2$  和  $L \sim z_2$  的实验曲线(点线,点代表测值)与计算曲线(虚线)的比较。实验测值包含系统的所有损耗,为了突出结构耦合损耗的特性,实验测得的耦合系数都进行了归一化处理。从图 4 中看出实验与计算结果的最佳耦合点是一致的,  $K$  随  $z_2$  的变化趋向大致相似。

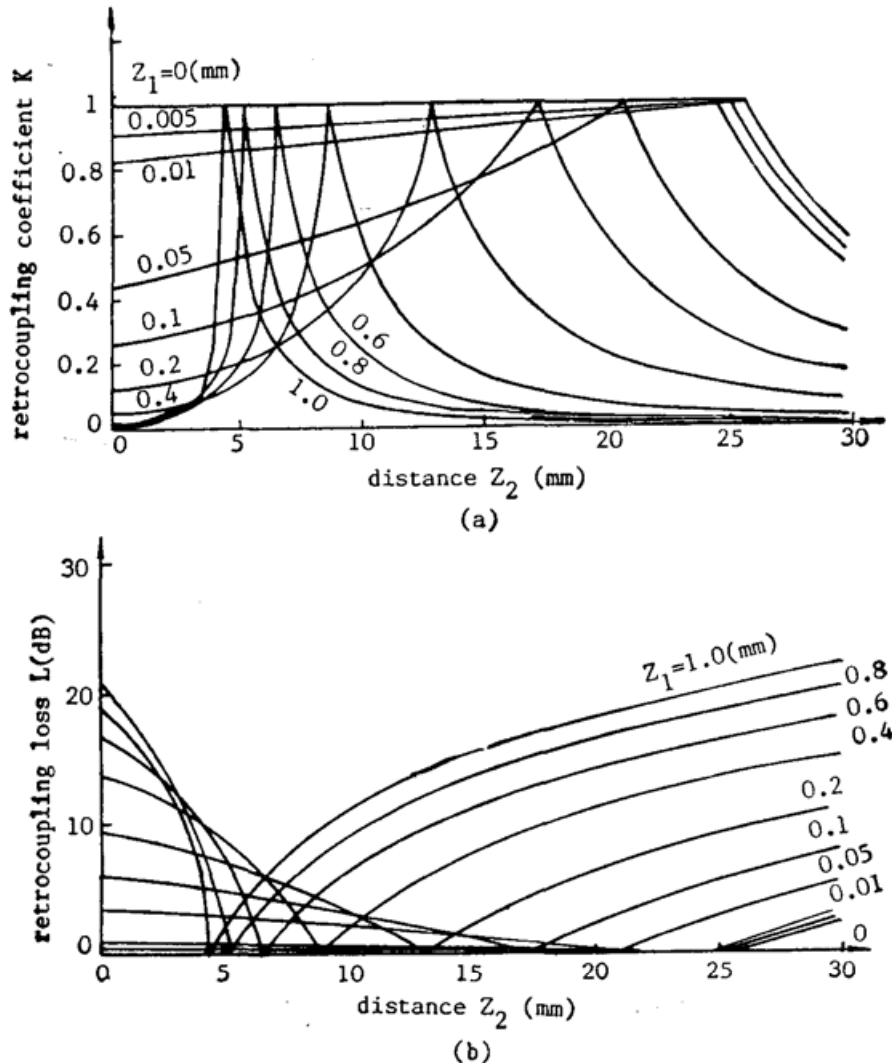


Fig. 2 Distributions of (a) retrocoupling coefficient and (b) retrocoupling loss with distance  $z_2$  for the different distance  $z_1$

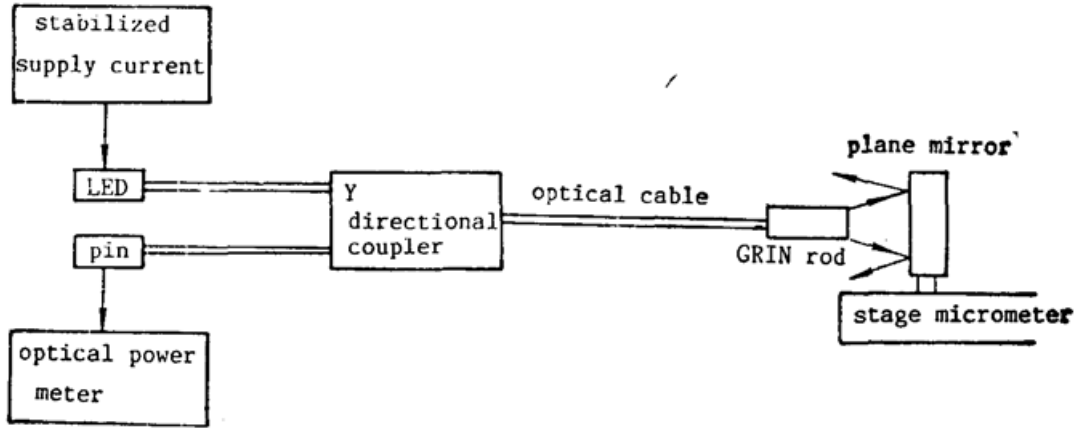
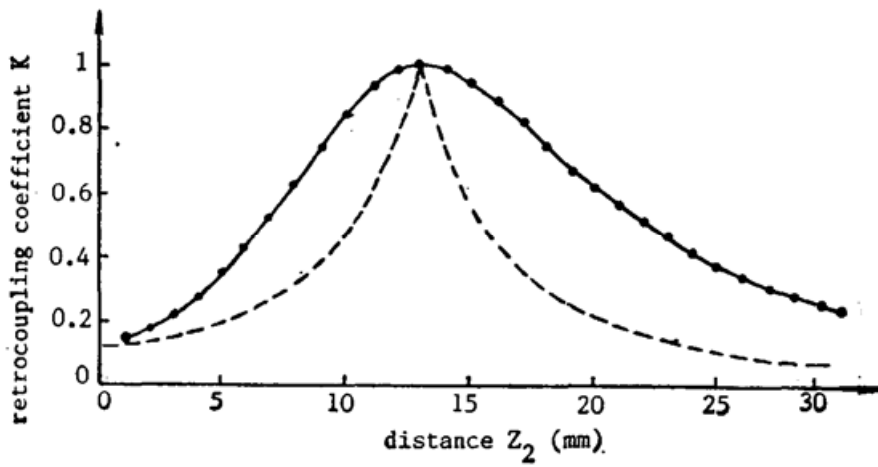
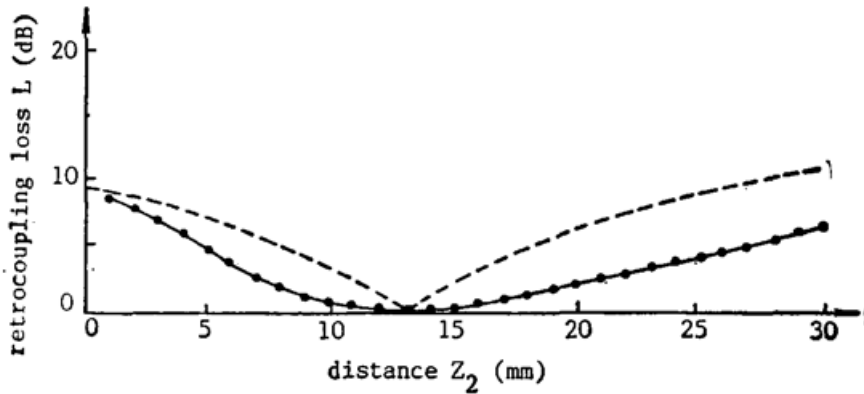


Fig. 3 Experimental set-up for measuring the retrocoupling optical power in fiber-grin rod- mirror coupling system



(a)



(b)

Fig. 4 Distributions of (a) retrocoupling coefficient and (b) retrocoupling loss with distance  $z_2$  at distance  $z_1=0.2$  mm (The dot line and dashed line shows the results in experiment and in computer model respectively)

### 四、讨 论

(1) 本文所给的后向耦合系数表示式,是在假设光纤输出端为朗伯发射,且每个耦合端面为均匀受光的条件下<sup>[3]</sup>导出的。因此,图4中计算曲线在最大值左右  $K$  随  $z_2$  出现陡峻的变化是可以预料的。然而在实验中所用发光二极管的发光亮度可表示为  $B=B_0 \cos^m \theta$ , 当

$m=0$ 时, 亮度不随方向变化(朗伯发射)。但一般情况是  $m>0$  亮度随方向变化(非朗伯发射), 且越靠近发光面的法线方向, 亮度越高。随着  $m$  的增大而光束变窄。

(2) 由于光纤、自聚焦棒的数值孔径角的限制, 在它们之间存在间隙的情况下, 耦合端面的每部分受光不一定均匀, 一般是中心部分比边缘部分受光较强。这些原因使耦合系数  $K$  在最大值附近随  $z_2$  的变化显得不太陡峻; 在远离最大值的区域,  $z_2$  变化对  $K$  的影响减小, 实验曲线与计算曲线趋于一致。图 4 说明了这点。

(3) 如果要求计算曲线与实验曲线符合得很好, 应以非朗伯发射的假设为前提, 根据光度学概念另行推导后向耦合系数的表示式。那么光线矩阵方法就无能为力了, 这说明用光线矩阵方法推导耦合系数是有局限性的。尽管如此, 它还是可以方便地分析光纤耦合系数的损耗特性及规律, 尤其能有效地确定系数的最佳耦合结构。这在光纤传感技术中, 有重要的实用意义。

(4) 在实际应用中, 总希望把各个光学器件调成共轴耦合系统。但由于调节机构和技术的完善性, 光轴或多或少总有点失调, 对此现象, 原则上可利用失调光线矩阵方法<sup>[4]</sup>加以分析, 我们准备另文讨论。

沈钊峰同志认真地完成了上机画图工作, 在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] W. B. Spillman Jr.; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 3 (Feb), 465~470.
- [2] P. Divita, R. Vannucci; *Appl. Phys.*, 1975, **7**, No. 4 (Aug), 249~253.
- [3] 王效敬;《光学学报》, 1986, **6**, No. 6 (Jun), 549~557.
- [4] Wang Shaomin, L. Ronchi; «E. Wolf. *Progress in Optics*», Vol. XXV, (Elsevier science publishers B. V., 1988), 305~310.

## Retrocoupling coefficient of Fiber-GRIN rod-reflector\*

WANG XIAOJING

(Department of Physics, Hangzhou University)

(Received 17 November 1989; revised 19 February 1990)

### Abstract

The expression of retrocoupling coefficient of fiber-GRIN rod-reflector in coaxial coupling is derived by ray-matrix method. The relation between coupling coefficient and geometrical parameters of the coupling system is analysed in detail. The curves of retrocoupling coefficients and retrocoupling losses are traced by computer in the case that reflector of coupling system is a plane mirror. The calculated results by computer is roughly accord with the experiments.

**Key words:** retrocoupling coefficient; ray matrix; coaxial coupling; selfoc lens.

\* The Project Supported by National Natural Science of Foundation of China.