

光纤-反射器耦合的后向反射功率耦合系数

王 效 敬
(杭州大学物理系)

提 要

在非相干光和激光(高斯光束)传输情况下,分别导出了光纤-反射器耦合的后向反射功率耦合系数的一般表示式。并且,给出光纤与几种典型反射器耦合的后向反射功率耦合系数的表示式以及当反射器沿光纤-反射器系统的轴向移动时耦合系数的曲线分布。还对光纤-平面镜和光纤-“猫眼”反射器的后向反射功率耦合系数的曲线分布作了实验测量。

一、引 言

光纤的有源和无源耦合问题,在光纤通信和光纤传感技术中占有相当重要的地位。早在七十年代初期,光纤-光纤的直接耦合技术^[1];光纤-光纤或光纤-光源通过透镜或微透镜的耦合技术^[2]已被人们所采用。近年来又发展了许多单模光纤定向耦合技术^[3~7],这些都是前向传输光的耦合问题。在光纤传感技术中除了前向传感耦合外,还要涉及后向反射耦合问题。例如干涉型光纤传感器^[8]往往需要自光纤输出的光通过反射器反射再耦合回原光纤。一些传光型光纤传感器如果采用后向反射耦合,既可节省光纤及光学元件又可使其结构紧凑。本文分别在非相干光和激光(高斯光束)传输情况下,导出了光纤-反射器耦合的后向反射功率耦合系数的一般表示式。并且以典型情况将一般表示式具体化,进行了理论计算与实验测量结果作比较,结果基本相符。

二、后向反射功率耦合系数

在光纤输出端附近放置一个反射器,使它与光纤共轴,组成光纤-反射器耦合(如图1所示)。取轴线坐标为 Z 轴,且设光纤端面位于 $z=0$ 处,于是 z 就是光纤端面到反射器界面的距离,使反射器的有效孔径 D 大于所接受的光束直径。如果使用小数值孔径光纤,则光纤-反射器耦合系统的光线传输就可取傍轴光线近似,并可应用光线传输矩阵方法分析。下面分别对非相干光和激光(高斯光束)传输情况下,后向反射功率耦合系数进行推导。

1. 非相干光的耦合

图1(a)表示光纤输出端发射的非相干光束经反射器反射回到光纤的耦合情况。图中 a_0 为光纤芯的半径, θ_0 为输出光束的发散角, θ_r 为反射光束的发散角, r 为反射光束回到光纤端面处的光束半径。将光纤输出的非相干光近似看作朗伯发射,且亮度分布为

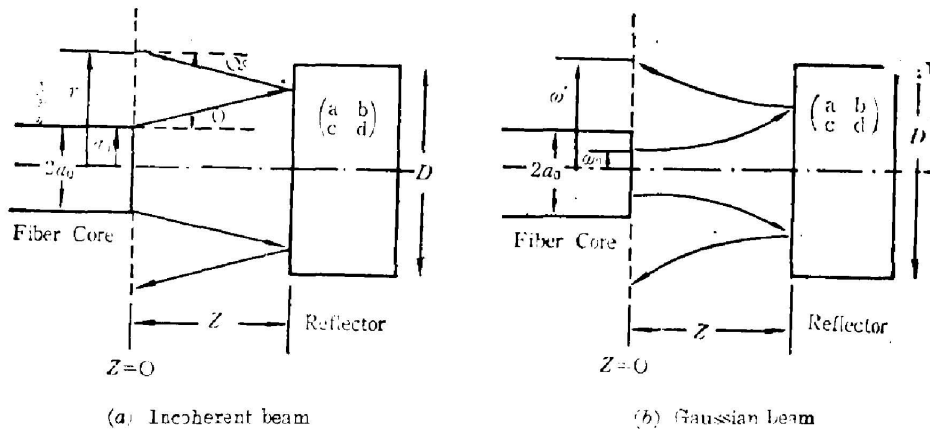


Fig. 1 Retroreflective coupling between fiber end and a reflector

$$B(\theta) = \begin{cases} B_0 & (\theta \leq \theta_0), \\ 0 & (\theta > \theta_0). \end{cases} \quad (1)$$

则光纤输出的光功率^[9]应为

$$P_0 = 2\pi^2 a_0^2 B_0 \int_0^{\theta_0} \sin \theta d\theta = 4\pi^2 a_0^2 B_0 \sin^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right), \quad (2)$$

以 θ_r 为半锥角的立体角 Ω 内反射的光功率密度为

$$\frac{P_0}{\Omega} = R\pi a_0^2 B_0 \frac{\sin^2(\theta_0/2)}{\sin^2(\theta_r/2)}, \quad (3)$$

式中 R 表示反射器的功率反射系数, 于是以光纤的孔径角 θ_n 为半锥角的立体角 Ω_n 内的光功率为

$$P_n = 2R\pi^2 a_0^2 B_0 \frac{\sin^2(\theta_0/2)}{\sin^2(\theta_r/2)} \int_0^{\theta_n} \sin \theta d\theta = 4R\pi^2 a_0^2 B_0 \frac{\sin^2(\theta_0/2) \sin^2(\theta_n/2)}{\sin^2(\theta_r/2)}. \quad (4)$$

设光纤端面的透射系数为 T , 又考虑到在光纤端面处受光面积与传光面积之比为 (a_0^2/r^2) , 因此, 实际进入光纤芯内的光功率为

$$P = \frac{T a_0^2 P_n}{r^2} = \frac{4RT a_0^4 B_0 \sin^2(\theta_0/2) \sin^2(\theta_n/2)}{r^2 \sin^2(\theta_r/2)}, \quad (5)$$

只要输入光束与光纤的同轴性好, 光纤端输出的光束发散角就近似地等于光纤的孔径角, 即 $\theta_0 = \theta_n$ 。即在小数值孔径的光纤耦合下, 后向反射功率耦合系数由(5)式与(1)式相比, 并对 RT 作归一化, 求得

$$K = \frac{k}{RT} = \frac{P}{P_0 RT} = \frac{a_0^2 \theta_0^2}{r^2 \theta_r^2}. \quad (6)$$

根据光线传输矩阵^[10]可知

$$\begin{pmatrix} r \\ \theta_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

式中 $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 为光线在光纤端面与反射器之间往返一次的传输矩阵, 即

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a+cz & b+(a+d)z+cz^2 \\ c & d+cz \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中 $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ 为反射器的光线变换矩阵。将(8)式代入(7)式,求得 r 和 θ_r ,然后把它们代入(6)式得

$$K = \frac{a_0^2 \theta_0^2}{\{(a+cz)a_0 + [b+(a+d)z+cz^2]\theta_0\}^2 [ca_0 + (d+cz)\theta_0]^2} \quad (9)$$

(9)式为非相干光耦合下,光纤-反射器耦合的后向反射归一化功率耦合系数的一般表示式。对于某种耦合结构的归一化耦合系数的具体表示式,只要把该结构的反射器的光线变换矩阵元 a 、 b 、 c 、 d 代入(9)式就可求得。

在(6)式中如果 $r\theta \leq a_0\theta_0$,则 $K_{\max} = 1$,此为最佳耦合。在(9)式中令 $K = K_{\max}$,就可求得反射器与光纤的最佳耦合距离 z_{opt} 。表1列出几种典型反射器与光纤耦合的后向反射归一化功率耦合系数,耦合系数的最大值及最佳耦合距离。

2. 高斯光束的耦合

图1(b)表示光纤输出端发射的高斯光束经反射器反射回到光纤的耦合情况。假设一束简正模高斯光束自光纤一端同轴输入,经过传输到达光纤另一端输出的仍为高斯光束,且束腰位于光纤端面^[11]。如果以 ω_0 表示束腰半径,则光束发散角为 $\theta_0 = \lambda/\pi\omega_0$;以 ω'_0 表示光束经反射器变换后的束腰半径,其相应的发散角为 $\theta_r = \lambda/\pi\omega'_0$, ω' 为反射光束在光纤端面处的半径。用 I_0 和 I' 分别表示出射和返回光束在光纤端面 Z 轴上的光强,光纤端输出的光功率^[11]为

$$P_0 = 2\pi \int_0^{a_0} I_0 \exp(-2r^2/\omega_0^2) r dr = \frac{\pi\omega_0^2 I_0}{2} [1 - \exp(-2a_0^2/\omega_0^2)] \quad (10)$$

反射光束能够进入光纤芯的光功率为

$$P_f = RT2\pi \int_0^{a_0} I' \exp(-2r^2/\omega'^2) r dr = \frac{RT\pi\omega'^2 I'}{2} [1 - \exp(-2a_0^2/\omega'^2)] \quad (11)$$

假设 θ_0 与光纤的孔径角相等的话, θ_r 就不一定与光纤孔径角相等,所以,有效耦合功率应该等于 P_f 乘以一个反映发散角与光纤孔径角相匹配的比例因子 η 。考虑到发散角与光斑半径成反比,因此有

$$\eta = \frac{2\pi \int_0^{a_0} I' \exp(-2r^2/\omega'^2) r dr}{2\pi \int_0^{a_0} I \exp(-2r^2/\omega^2) r dr} = \frac{\omega'^2 I' [1 - \exp(-2a_0^2/\omega'^2)]}{\omega^2 I [1 - \exp(-2a_0^2/\omega^2)]} \quad (12)$$

式中 ω 和 I 假设为光束被反射后发散角不变时回到光纤端面处的光束半径和轴线上的光强。后向功率耦合系数应为

$$k = \eta P_f / P_0$$

根据高斯光束的传播规律容易证明: $I'\omega'^2 = I\omega^2 = I_0\omega_0^2$,于是可得高斯光束耦合下,后向反射归一化功率耦合系数的一般表达式为

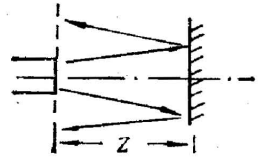
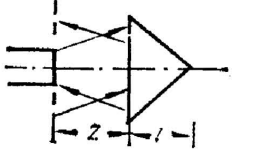
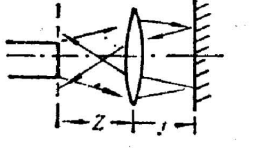
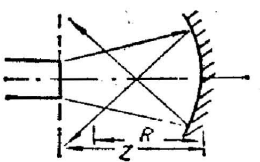
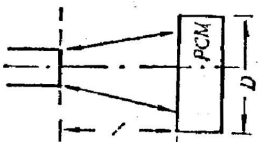
$$K = \frac{[1 - \exp(2a_0^2/\omega'^2)]^2}{[1 - \exp(-2a_0^2/\omega_0^2)] [1 - \exp(-2a_0^2/\omega^2)]}$$

式中 ω' 和 ω 可由 $ABCD$ 定律^[11]求得,即有

$$\omega'^2 = \omega_0^2 [A^2 + (\lambda^2/\pi\omega_0^4) B^2], \quad \omega^2 = \omega_0^2 [1 + (\lambda^2/\pi\omega_0^4) B^2] \quad (13)$$

如果要得到某种耦合结构的归一化耦合系数的具体表达式,只要把该耦合结构的光线传输矩阵元 A 和 B 代入(13)式,再将其代入(12)式就可求得。如果 $\omega' \leq a_0$,则 $K_{\max} = 1$ 。表2列

Table 1 Ray path diagrams and major parameters for the retroreflective coupling between fiber and some typical reflectors under incoherent beam coupling condition

A	G	$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$	K	Z_{opt}	K_{max}
B		$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\frac{a_0^2}{(a_0 + 2z\theta_0)^2}$	0	1
C		$\begin{pmatrix} -1 & -\frac{2l}{n} \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	$\frac{a_0^2}{\left[a_0 + 2 \left(z + \frac{l}{n} \right) \theta_0 \right]^2}$	0	$\frac{a_0^2}{\left(a_0 + \frac{2l}{n} \right)^2}$
D		$\begin{pmatrix} -1 & 2f \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	$\frac{a_0^2}{[2(f-z)\theta_0 - a_0]^2}$	$f \geq Z_{opt} \geq f - \frac{a_0}{\theta_0}$	1
E		$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{pmatrix}$	$\frac{a_0^2}{\left[\left(1 - \frac{2z}{R} \right) a_0 + 2 \left(z - \frac{z^2}{R} \right) \theta_0 \right]^2} \times \frac{\theta_0^2}{\left[\left(1 - \frac{2z}{R} \right) \theta_0 - \frac{2}{R} a_0 \right]^2}$	0 or $R \geq Z_{opt} \geq R - \frac{a_0}{\theta_0}$	1
F		$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	1	$\frac{D}{2\theta_0} \geq Z \geq 0$	1

A: Reflector; B: Planar Mirror; C: Corner-Cube Prism; D: Cat's-Eye Reflector; E: Concave Mirror; F: Phase-Conjugated Mirror; G: Fiber-Reflector Configuration

Table 2 Ray path diagrams and major parameters for the retroreflective coupling between fiber and some typical reflectors under Gaussian beam coupling condition

A	G	$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$	ω' give ω	K	Z_{opt}	K_{max}
B		$\begin{pmatrix} 1 & 2z \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\omega'^2 = \omega_0^2 (1 + 4z^2/z_0^2)^*$ $\omega = \omega'$	$\frac{1 - \exp(-\frac{2\alpha_0^2}{\omega'^2})}{1 - \exp(-\frac{2\alpha_0^2}{\omega_0^2})}$	$0 \leq Z_{opt} < \xi^{**}$	1
C		$\begin{pmatrix} -1 & -2(\varepsilon + \frac{l}{n}) \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	$\omega'^2 = \omega_0^2 [1 + 4(\varepsilon - \frac{l}{n})^2 / \varepsilon_0^2]$ $\omega = \omega'$	$\frac{1 - \exp(-\frac{2\alpha_0^2}{\omega'^2})}{1 - \exp(-\frac{2\alpha_0^2}{\omega_0^2})}$	0	$2 \frac{1 - \exp(-\frac{2\alpha_0^2}{\omega_0^2})}{\exp(-\frac{2\alpha_0^2}{\omega_0^2})}$
D		$\begin{pmatrix} -1 & 2(f-z) \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	$\omega'^2 = \omega_0^2 [1 + 4(f-z)^2 / z_0^2]$ $\omega = \omega'$	$\frac{1 - \exp(-\frac{2\alpha_0^2}{\omega'^2})}{1 - \exp(-\frac{2\alpha_0^2}{\omega_0^2})}$	$f - \xi < Z_{opt} < f + \xi$	1
E		$\begin{pmatrix} 1 - \frac{2z}{R} & 2z(1 + \frac{z}{R}) \\ -\frac{2}{R} & 1 - \frac{2z}{R} \end{pmatrix}$	$\omega'^2 = \omega_0^2 \left[\left(1 - \frac{2z}{R}\right)^2 + 4z^2 \left(1 - \frac{z}{R}\right)^2 / z_0^2 \right]$ $\omega^2 = \omega_0^2 \left[1 + 4z^2 \left(1 - \frac{z}{R}\right)^2 / z_0^2 \right]$	$\frac{[1 - \exp(-\frac{2\alpha_0^2}{\omega'^2})]^2}{[1 - \exp(-\frac{2\alpha_0^2}{\omega^2})][1 - \exp(-\frac{2\alpha_0^2}{\omega_0^2})]}$	$0 \leq Z_{opt} < \xi$ or $R - \xi < Z_{opt} < R + \xi$	1
F		$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	$\omega' = \omega = \omega_0$	1	$0 < Z_{opt} < Z_0$ $\sqrt{\frac{1}{4\omega_0^2} - 1}$	1

* $z_0 = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$ ** $\xi = \frac{z_0}{2} \sqrt{\frac{\alpha_0^2}{\omega_0^2} - 1}$

A: Reflector; B: Planar Mirror; C: Corner-Cube Prism; D: Cat's-Eye Reflector; E: Concave Mirror; F: Phase-Conjugated Mirror; G: Fiber-Reflector Configuration

出几种典型耦合结构的归一化功率耦合系数、耦合系数的最大值及最佳耦合距离。

图 2~图 6 给出表 1 和表 2 所列各种耦合结构的 $K \sim Z$ 曲线分布的数值计算结果。图中实线表示非相干光的耦合；虚线表示高斯光束的耦合。计算中各参量的取值是： $a_0 = 25 \mu\text{m}$, $\theta_0 = 0.2 \text{ rad}$, $f = 10.4 \text{ mm}$, $n = 1.5$, $l = 1 \text{ mm}$, $R = 20.8 \text{ mm}$, $\omega_0 = 1 \mu\text{m}$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 。

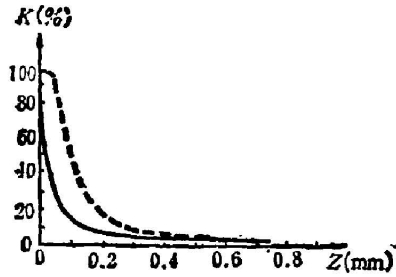


Fig. 2 $K \sim Z$ curves for the fiber coupled with a plane mirror

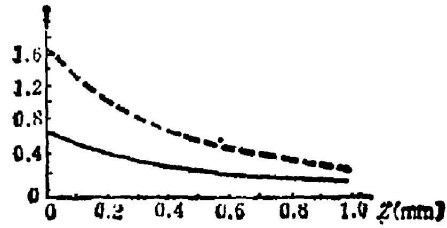


Fig. 3 $K \sim Z$ curves for the fiber coupled with a corner-cube prism

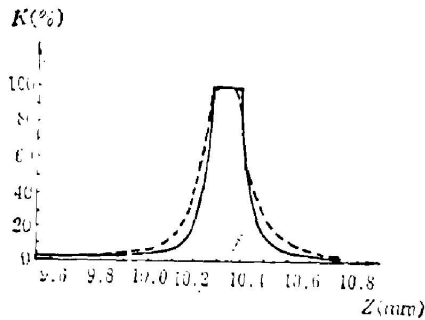


Fig. 4 $K \sim Z$ curves for the fiber coupled with a cat's-eye reflector

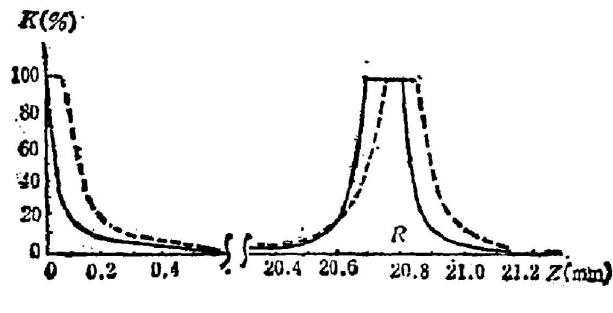


Fig. 5 $K \sim Z$ curves for the fiber coupled with a concave mirror

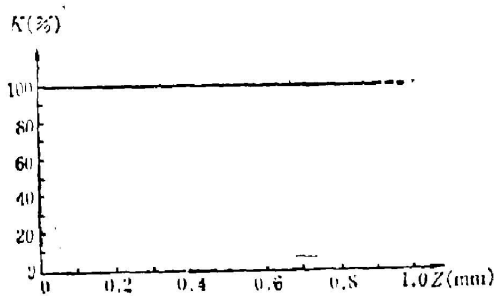


Fig. 6 $K \sim Z$ curves for the fiber coupled with a phaseconjugate mirror

从各图中的曲线分布看出,不同的耦合结构,它们的最大归一化功率耦合系数和最佳耦合距离各不相同。显然,高斯光束的 $K \sim Z$ 曲线比非相干光的变化要缓慢些,但对光纤-相位共轭镜耦合来说,它们是重迭的。

三、实验结果

我们用图 7 所示的装置分别对光纤-平面镜和光纤-“猫眼”反射器耦合的后向反射功率耦合系数随反射器与光纤之间距离的变化进行了测量。所用光纤为梯度光纤,其芯径为 $50\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.2;光源分别用白炽灯和氦氖激光器;“猫眼”反射器中透镜的焦距为 $10.4\ \text{mm}$ 。反射器安装在迈克耳逊干涉仪放置动镜的平台上,以便作微小位移的调节,最小位移的可靠读数为 $1\ \mu\text{m}$;后向耦合光功率用 GY-44IV 型光功率计探测,最低功率的可靠读数为 $1 \times 10^{-10}\ \text{W}$ 。

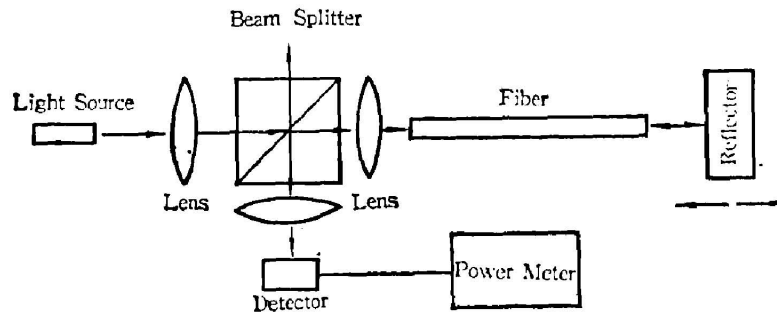


Fig. 7 Setup for measuring the power coupling coefficient $k(Z)$

图 8 和图 9 分别为两种耦合结构在非相干光和高斯光束耦合下,测得的后向功率耦合系数与其最大值之比(用 K 表示)随距离 Z 变化的曲线(实线)。图中虚线为对应的 $K \sim Z$ 计算曲线。可以看出两者的变化规律是一致的。由于光纤的非简正模传输及端面不平整所引起的局部散射、衍射和干涉会使光模畸变,因此,输出光束不是理想的朗伯发射或高斯光束。另外在所测得的后向耦合功率中还包含了光纤传输损耗和输入端损耗。所有这些因素

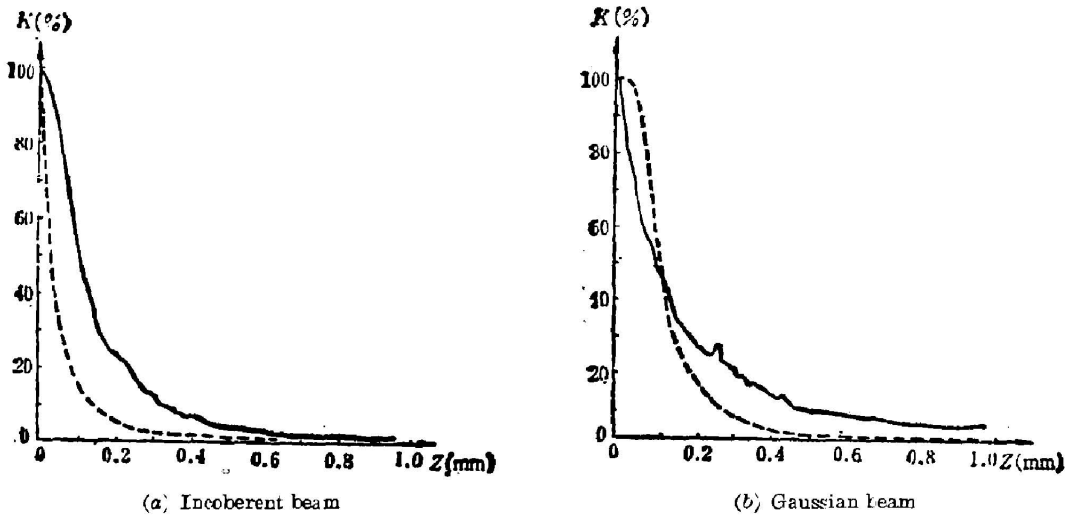


Fig. 8 $K \sim Z$ curves for the fiber-plane mirror coupling (Solid curve—experimental results; Dash curve—calculated results)

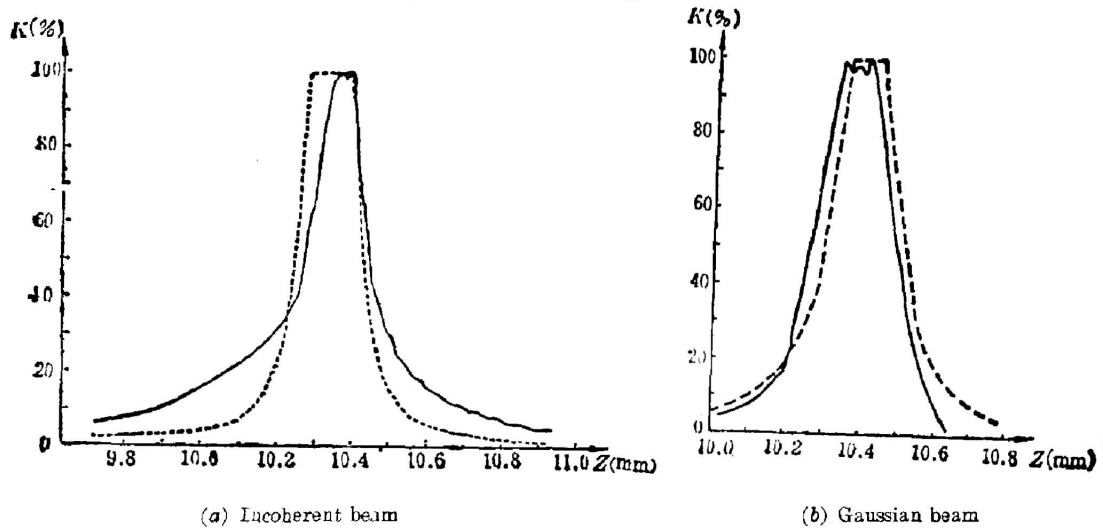


Fig. 9 $K_r \sim Z$ curves for the fiber-cat's eye reflector coupling (Solid curve—experimental results; Dash curve—calculated results)

使得测出的最大后向功率耦合系数比理论计算值要小，因而在某些距离范围出现 K_r 大于 K 的情况。

计算和实验结果表明：不同反射器与光纤耦合，它们的后向反射功率耦合系数的最大值及对应的距离（反射器至光纤端的最佳耦合距离）范围是不同的。在实际应用中，可根据具体需要来选择光纤-反射器耦合的类型以及最佳耦合距离。

四、讨 论

归一化功率耦合系数 K 只是一个反映耦合结构特性的量。如果要增大绝对功率耦合系数 k 的值，还需提高反射器的功率反射系数 R 及光纤端面的透射系数 T 。修整光纤端面的平整度，把光纤端面浸入折射率与光纤芯相匹配的液体内都能够降低透射损耗。

一般来说，平面镜适于十分靠近光纤端面的耦合应用。如果把光纤端面垂直于母线加工成平面并镀以全反射膜，这就是 $z=0$ 的光纤-平面镜耦合结构。可以认为，这种结构的 R 和 T 均接近于 1，因而就能获得最大的后向反射功率耦合系数。不过这种情况仅适用于反射器相对于光纤端不动的传感测量中。但是，某些传感测量要求反射器与光纤端相隔一段距离，并且能沿轴向移动，“猫眼”反射器（在 $z=f$ 附近）、凹面镜（在 $z=R$ 附近）及相位共轭镜（对朗伯发射，在 $0 \leq z \leq (D/2\theta_0)$ 范围；对高斯光束，在 $0 \leq z \leq \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} \sqrt{\frac{D^2}{4\omega_0^2} - 1}$ 范围。）都能达到这种应用目的。

相位共轭镜除了归一化功率耦合系数在一定距离内保持不变 ($K=1$) 外，它的功率反射系数还可以大于 1，因此，它具有良好的功率耦合效果。同时，它对光纤传输引起的光模畸变还有补偿作用。所以，相位共轭镜无疑是一种理想的光纤后向反射合作耦合器。但是效果良好的相位共轭镜具有装置复杂、费用昂贵的缺点。如果采用简单、廉价的磨相位共轭镜（例如玻璃微珠列阵等）作为光纤的后向反射合作耦合器^[12]也可获得较好的效果。它的缺

点是功率反射系数太小,相位共扼性能较差。

只有光纤和反射器保持同轴耦合,才能获得较好的功率耦合效果。所以,在实际应用中,一定要仔细地调整同轴,使耦合系统的轴失调量尽可能的减小。

本文的实验工作得到林强同志的很多协助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] C. G. Someda; *Bell Syst. Tech. J.*, 1973, **52**, No. 4 (Apr), 583.
- [2] L. G. Gohen *et al.*; *App. Opt.*, 1974, **13**, No. 1 (Jan), 89.
- [3] S. K. Sheem *et al.*; *App. Phys. Lett.*, 1979, **35**, No. 2 (Feb), 131.
- [4] R. A. Bergh *et al.*; *Electron. Lett.*, 1980, **16**, No. 7 (Mar), 260.
- [5] B. S. Kawasaki *et al.*; *Opt. Lett.*, 1981, **6**, No. 7 (Jun), 327.
- [6] C. A. Villarruel *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 988.
- [7] S. A. Newton *et al.*; *Opt. Lett.*, 1983, **8**, No. 1 (Jan), 60.
- [8] R. B. Dyott; *Microwaves Opt. Acoust.*, 1978, **2**, No. 1 (Jan), 13.
- [9] M. Young; *«Optics and Lasers»*, (Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1977), 47.
- [10] H. Kogelnik, T. Li; *App. Opt.*, 1966, **5**, No. 10 (Oct), 1550.
- [11] Joseph T. Verdeyen; *«Laser Electronics»*, (Prentice-Hill Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1981), 60.
- [12] Mark Johnson; *Opt. Lett.*, 1983, **8**, No. 11 (Nov), 593.

Retroreflective power coupling coefficients of fiber coupled with a reflector

WANG XIAOJING

(Department of Physics, Hangzhou University)

(Received 10 September 1985; revised 9 December 1985)

Abstract

The general expressions for the retroreflective power coupling coefficients of a fiber coupled with a reflector have been derived for propagation of both incoherent light and a laser beam Gaussian beam. Furthermore, expressions of retroreflective power coupling coefficients for several different reflectors coupled with the fiber and when the reflector is moved along the axis of the fiber-reflector system are also shown. Curves of the retroreflective power coupling coefficients for both fiber-plane mirror and fiber-“cat's eye” reflector systems have been measured experimentally.