

光纤准直器高回波损耗的理论分析与研究

虞国华^a 刘水华^b 方罗珍^b 江山^b 黄德修^a

a, 华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074
b, 武汉邮电科学研究院固体器件研究所, 武汉 430074

摘 要 在高斯光束传输理论的基础上, 利用矩阵光学的原理和高斯光束耦合理论得出了斜面耦合自聚焦透镜型光纤准直器的回波损耗的数学表达式。分析了改变光纤准直器的参数而引起回波损耗变化的原因。实验结果与理论分析比较吻合。

关键词 光纤准直器, 回波损耗。

1 引 言

光纤准直器在光通信系统中有着非常普遍的应用, 它由单模光纤和自聚焦透镜(GRIN)组成, 其目的主要是对光纤传输的高斯光束进行准直, 以提高光纤与光纤间的光耦合效率。光纤准直器的回波损耗是一个很重要的指标, 特别是它在光隔离器中的使用。这主要是因为光隔离器尽管可以消除背向光对光源或泵浦光的影响, 但如果隔离器本身回返光较强时, 回返光对系统的影响仍然存在, 而光隔离器本身的回返光主要来自它的光纤准直器。采用一般结构的光纤准直器, 即采用平面插针耦合自聚焦透镜的光纤准直器, 其回波损耗仅为 20~ 30 dB。为了提高光纤准直器的回波损耗值, 本文采用了斜面插针耦合自聚焦透镜结构的光纤准直器, 经理论计算: 当斜面倾角为 8°时, 光纤准直器的回波损耗值可大于 60 dB。这已基本能满足工程的实际需要。

2 光纤准直器回波损耗理论分析

斜面插针耦合自聚焦透镜结构的光纤准直器如图 1 所示, 从图 1 中可以看出, 光纤准直器的回返光主要来自于三个面的菲涅尔反射: 单模光纤端面(端面 1)的反射、自聚焦透镜前端面(端面 2)及后端面(端面 3)的反射。下面将分别讨论这三个端面的反射。

2.1 单模光纤端面的回波损耗的分析

单模光纤中传输的光可以近似用高斯波形来描述, 其归一化形式如(1)式所示^[1]:

$$Q_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_0} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right) \quad (1)$$

其中 w_0 为高斯光束的腰斑半径, x 、 y 为垂直光传输方向的平面坐标(如图 1 中坐标轴所示)。

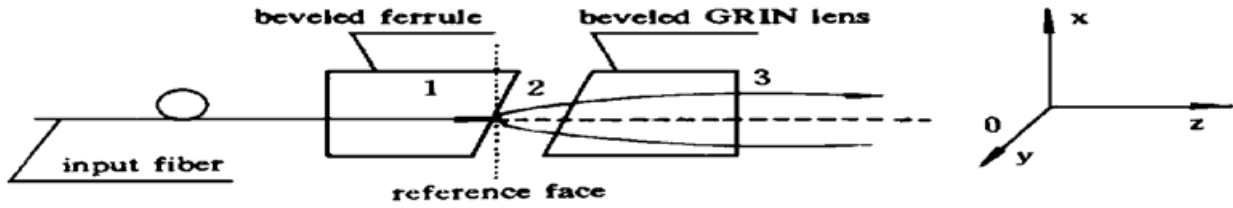


Fig. 1 Fiber collimator with beveled end-face of fiber and GRIN rod lens

把端面 1 的中心点作为坐标原点，以图 1 中标记的参考面为参考面，则经斜端面 1 反射后的高斯光束，在 $x-y$ 平面内投影的场分布为：

$$\varphi_1 = \sqrt{\frac{2R_{01}}{\pi}} \frac{1}{w_0} \exp\left(-\frac{x^2 \cos^2 2\theta + y^2}{w_0^2}\right) \exp(-in_1 kx \sin 2\theta) \quad (2)$$

$$R_{01} = (n_1 - n_2)^2 / (n_1 + n_2)^2 \quad (3)$$

式中 θ 为斜面倾斜角， n_1 为光纤纤芯的折射率， n_2 为光纤与自聚焦透镜间介质的折射率， k 为传输光的波矢。

根据模场耦合理论，光场分布为 φ_1 的高斯光束 1 与 φ_2 的高斯光束 2 的耦合效率为^[2]：

$$\eta = \frac{|\iint \varphi_1 \varphi_2^* ds|^2}{\iint |\varphi_1|^2 ds \iint |\varphi_2|^2 ds} \quad (4)$$

将(1)、(2)式代入(4)式，并利用积分公式

$$\int \exp[-(ax^2 + bx + c)] dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \exp\left(\frac{b^2 - 4ac}{4a}\right) \quad (5)$$

可得到端面 1 的回波损耗值 r_1 为：

$$r_1 = \frac{2R_{01} \cos 2\theta}{1 + \cos^2 2\theta} \exp\left[-\frac{\sin^2 2\theta}{2(1 + \cos^2 2\theta)} (n_1 k w_0)^2\right] \quad (6)$$

在斜面倾角 θ 较小时，可得到文献[3]中的回波损耗公式。

2.2 斜面自聚焦透镜前端面的回波损耗的分析

从图 1 中可以看到，光纤输出的高斯光束经光纤端面折射后，不再沿原来的光轴传输，

而是有一个偏转角，如图 2 所示。这就给计算带来困难，为了解决这一问题，必须采用如下的方法：将传播的高斯光束分为 x 方向、 y 方向，并分别进行计算，最终再合并。由矩阵光学的理论，可以得到高斯光束传输到端面 2 再反射到端面 1 时， x 、 y 方向的传输矩阵分别为^[4]：

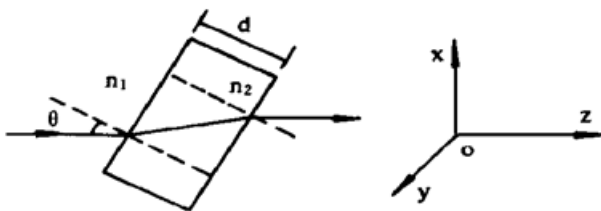


Fig. 2 Schematic diagram of Gaussian light beams transmission in different axes

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_x = \begin{bmatrix} 1 & L_x \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_y = \begin{bmatrix} 1 & L_y \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中

$$L_x = \frac{2n_2^2(1 - \sin^2 \theta) d}{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta)^{3/2}}, \quad L_y = \frac{2dn_1}{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \quad (7)$$

式中 d 为斜面插针与自聚焦透镜的间距。

以图 1 中标记的参考面为计算参考面, 则由(1)式描述的高斯光束经端面 2 反射后, 回到参考面光场分布为:

$$\begin{aligned} \varphi_2 = & \sqrt{\frac{2R_{02}}{\pi}} \frac{1}{w_0} \sqrt{\frac{1}{(1+\epsilon_x^2)(1+\epsilon_y^2)}} \exp \left\{ -(\cos^2 2\theta)(x+L)^2 \left[\frac{1}{w_0^2(1+\epsilon_x^2)} + \frac{ik\epsilon_x^2}{2L_x(1+\epsilon_x^2)} \right] \right. \\ & \left. - in_1 kx \sin 2\theta - y^2 \left[\frac{1}{w_0^2(1+\epsilon_x^2)} + \frac{ik\epsilon_y^2}{2L_y(1+\epsilon_y^2)} \right] \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\epsilon_x = \frac{L_x}{\pi w_0^2/\lambda}; \quad \epsilon_y = \frac{L_y}{\pi w_0^2/\lambda} \quad (9)$$

式中 λ 为传输光的波长。

$$L = \frac{2dn_1 \sin \theta}{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \quad (10)$$

$$R_{02} = (n_2 - n_3)^2 / (n_2 + n_3)^2 \quad (11)$$

将(1)、(8)式代入(4)式, 求积分得到端面 2 的回波损耗值 r_2 为:

$$r_2 = \sqrt{\frac{1}{[\epsilon_x^2 + (1 + \cos^2 2\theta)^2](4 + \epsilon_y^2)}} \exp \left[-\frac{A}{\epsilon_x^2 + (1 + \cos^2 2\theta)^2} \right] \quad (12)$$

其中

$$A = \frac{4L^2 \cos^2 2\theta}{w_0^2} + 2Ln_1 k \cos^2 2\theta \sin 2\theta (1 + \cos 2\theta)^2 + \frac{1}{2} n_1^2 k^2 \sin^2 2\theta (1 + \epsilon_x^2 + \cos^2 2\theta)$$

从上述表达式中可以看出, 端面 2 的回波损耗值包括三个方面, 即两高斯光束的角向耦合损耗、离轴耦合损耗和纵向分离耦合损耗。

2.3 斜面自聚焦透镜后端面回波损耗的分析

计算这个端面的回波损耗时, 同样采用上述方法, 将高斯光束分为 x 、 y 两方向进行分别考虑, 然后再组合, 同样可以得到从单模光纤输出的高斯光束经端面 3 反射后, 在参考面的光场分布为:

$$\begin{aligned} \varphi_3 = & \sqrt{\frac{2R_{03}}{\pi}} \frac{1}{w_0} \sqrt{\frac{1}{(1+\epsilon_x^2)(1+\epsilon_y^2)}} \exp \left\{ -(x+L)^2 \left[\frac{1}{w_0^2(1+\epsilon_x^2)} + \frac{ik\epsilon_x^2}{2L_x(1+\epsilon_x^2)} \right] \right. \\ & \left. - y^2 \left[\frac{1}{w_0^2(1+\epsilon_x^2)} + \frac{ik\epsilon_y^2}{2L_y(1+\epsilon_y^2)} \right] \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

则类似可以得到端面 3 的回波损耗值 r_3 的表达式如下:

$$r_3 = \sqrt{\frac{1}{(4 + \epsilon_x^2)(4 + \epsilon_y^2)}} \exp \left[-\frac{4L^2}{(4 + \epsilon_x^2)w_0^2} \right] \quad (14)$$

$$R_{03} = (n_4 - n_3)^2 / (n_4 + n_3)^2 \quad (15)$$

式中的 n_3 为自聚焦透镜的轴心折射率, n_4 为空气折射率。

通过对以上三个端面回返光的分析, 就可得到整个光纤准直器的回波损耗值 r 为:

$$r = -10 \log (r_1 + r_2 + r_3) \quad (16)$$

3 计算结果与实验

利用计算机分别对(6)、(12)、(14)式进行计算, 得到图 3 所示的计算结果。横坐标表示

倾斜面角度的大小, 单位为度, 纵坐标表示端面的回波损耗值 (r), 单位为分贝。其中曲线 1、2、3 分别为端面 1、2、3 的回波损耗与斜面倾角的关系曲线。计算参数为: $n_1 = 1.5, n_2 = n_4 = 1.0, n_3 = 1.59, w_0 = 5 \mu\text{m}$, 单模光纤与自聚焦透镜间的间距 d 为 $20 \mu\text{m}$ 。从图 3 可以看出: 1) 光纤准直器端面 2 的回波损耗随倾斜面角度增大而增大的幅度最大, 端面 1 的次之, 端面 3 最小, 而且其值也最小, 仅为 20~30 dB。这说明在斜面耦合自聚焦透镜时, 在端面 3 镀增透膜是非常关键和必要的。2) 端面 2 的回波损耗很大, 相对另外两个面来说, 该面的回波损耗可以忽略。而且, 在倾角大于 8° 时, 端面 1 的回波损耗也可忽略。

图 4 为整个光纤准直器的回波损耗与斜面倾角的关系曲线。计算中假定端面 3 镀了反射率为 0.01% 的增透膜, 其它参数与图 3 一致。如图所示: 1) 光纤准直器的 r 随斜面倾角的增大而大幅度提高。当斜面倾角为 8° 时, 光纤准直器的 $r > 60 \text{ dB}$, 当斜面倾角为 0° 时, 即为平面插针耦合自聚焦透镜时, r 仅为 18 dB。2) 在斜面倾角小于 7° 时, 光纤准直器的 r 与波长相关性较大, 工作波长为 1310 nm 光纤准直器的 r 比 1550 nm 的要大, 而在斜面倾角大于 7° 时, 光纤准直器的 r 与波长相关性不大。这是因为根据(6)式和(15)式可得: 端面 1 的回返光的大小是与波长相关的, 端面 3 的 r 与波长无关。而当斜面倾角小于 7 度时, 光纤准直器的回波损耗取决于端面 1 和端面 3 的回波损耗, 当斜面倾角大于 7° 时, 光纤准直器的回波损耗取决于端面 3 的回波损耗。

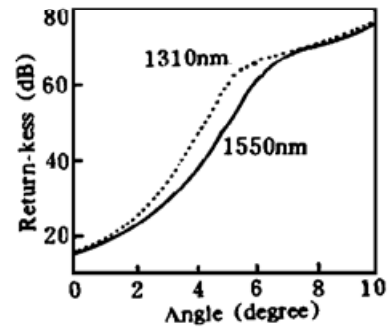
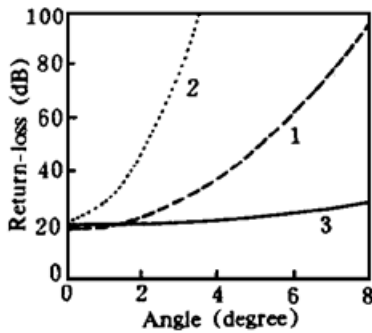


Fig. 3 Three end-face of fiber collimator return loss vs beveled angle

Fig. 4 Fiber collimator return loss vs beveled angle

光纤准直器的回波损耗还与端面 1 和端面 2 间的间距 d 及填充端面 1 和端面 2 间的介质折射率 n 有关。图 5 为光纤准直器的 r 与 n 的关系曲线。不同的斜面倾角有不同的最佳值 n 。斜面倾角为 4° 时, 最佳折射率值 n 为 1.44, 斜面倾角为 7° 时, 最佳折射率值 n 为 1.60。图 6 为

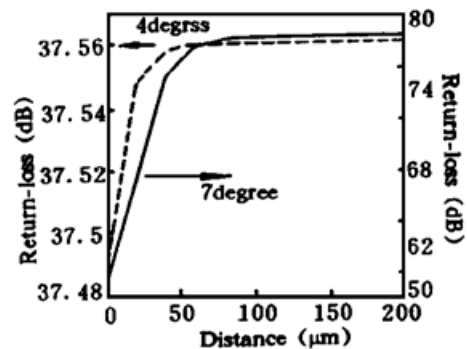
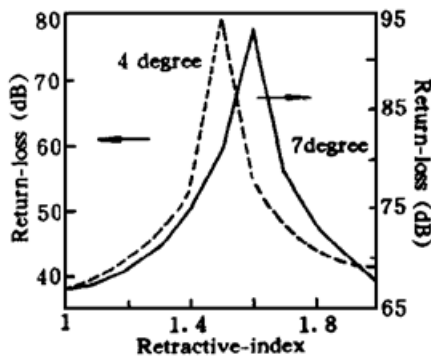


Fig. 5 Fiber collimator return loss vs refractive-index between fiber end-face and GRIN lens

Fig. 6 Fiber collimator return loss vs distance between fiber end-face and GRIN lens

光纤准直器的 r 与 d 的关系曲线。不同的斜面倾角光纤准直器对改变 d 所引起的 r 变化度不一样: 倾角小时, 改变 d 所引起的 r 变化小, 反之, 则 r 变化大。当倾角为 4° , d 从 0 变化到 0.2 mm, r 从 37.48 dB 变化到 37.88 dB。倾角为 7° 时, d 为同样的变化量, 则 r 从 58 dB 变化到 80 dB(有关的计算参数与图 4 一致)。这主要是因为根据(6)式和(15)式可得: 改变 d 只能改变端面 3 的 r , 而不能改变端面 1 的 r 。

实验测试装置如图 7 所示。图中的 1 是型号为 FITE L RX3000 的回损仪, 测试范围为 0~ 80 dB; 2、4 为标准连接器, 其 $r > 65$ dB; 3 为标准法兰盘; 5 为被测器件。被测光纤准直器自聚焦透镜镀有透射率为 99.9% 的增透膜, 光纤与自聚焦透镜间的介质折射率为 1.51、间距为 $20 \mu\text{m}$ 左右, 单模光纤纤芯折射率为 1.458、模场半径为 $4.5 \mu\text{m}$, 自聚焦透镜的轴心折射率为 1.59。测试结果如表 1 所示。从实验结果可以看出, 采用 8° 斜面的光纤准直器能实现高回波损耗, 而且, 此时对波长为 1310 nm 和 1550 nm 来说, 回波损耗值相差不大。

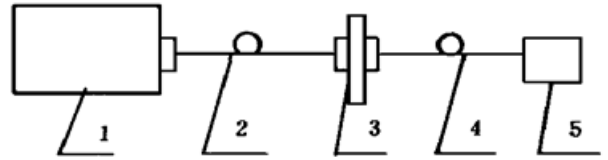


Fig. 7 Experimental setup used for fiber collimator return loss measurement

Table 1 Fiber collimator return-loss measurement result

| wavelength (μm) | angle (degree) | number | return-loss (dB) | wavelength (μm) | angle (degree) | number | return-loss (dB) |
|---------------------------------|-------------------|--------|---------------------|---------------------------------|-------------------|--------|---------------------|
| 1.31 | 0 | 1 | 24.5 | 1.55 | 0 | 1 | 24.1 |
| | | 2 | 23.9 | | | 2 | 24.4 |
| | 8 | 1 | 53.6 | | 8 | 1 | 53.8 |
| | | 2 | 54.1 | | | 2 | 53.5 |

从表 1 还可以看到, 当斜面倾角为 8° 时, 光纤准直器的 r 实际测量值为 53 dB~ 54 dB。它与理论计算值有一定的偏差。这主要是由于: 1) 理论计算的参数与实际器件的参数不一致。光纤准直器端面 3 的膜的透过率, 在理论计算时为 99.99%, 实际测量中为 99.9%。2) 端面抛光加工及耦合工艺不理想。光纤准直器 r 的进一步提高, 可改善器件制作工艺及光纤斜面插针与斜面透镜的耦合工艺, 特别是端面的镀膜技术, 而这是很难的。目前, 正在努力进行这三方面的研究工作。

从图 4 及图 5 均可看出, 斜面倾角越大, 光纤准直器的 r 值越大。但在实际中一般采用 8° 的斜面, 这主要是考虑到器件的插入损耗及加工工艺, 特别是考虑到器件的偏振损耗。因为斜面倾角越大, 器件的偏振损耗就越大。有关斜面耦合自聚焦透镜偏振损耗的理论分析, 将在另外的文章中作专门的报道。

结 论 本文在高斯光束传输理论的基础上, 利用矩阵光学的原理和高斯光束耦合理论得出了斜面耦合自聚焦透镜型光纤准直器的回波损耗的数学表达式。通过对光纤准直器回波损耗的理论分析和实验测试, 得到如下结论: 采用斜面插针耦合自聚焦透镜, 可大大提高光纤准直器的回波损耗, 当斜面倾斜角为 8° , 光纤准直器的自聚焦透镜后端面镀反射率为 0.01% 增透膜时, 光纤准直器的回波损耗可达 60 dB。分析了改变光纤准直器的参数所引起光纤准直器的回波损耗变化的原因, 从而为设计高回波损耗的光纤准直器和光隔离器提供理论依据。

感谢武汉邮电科学研究院固体器件研究所二室给予的支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] 刘德明, 向 清, 黄德修, 光纤光学, 北京, 国防工业出版社, 1995: 42~ 45
 [2] Yiqun Lu, Joseph C. Palais, Coupling efficiency of single-mode fiber compoments using GRIN-rod lenses. *Fiber and Integrated Opt.*, 1988, 7(1): 85~ 107
 [3] 江 山, 刘水华, 方罗珍等, 单模光纤斜面连接的回波损耗. 光通信研究, 1993, (3): 31~ 37
 [4] 卢亚雄, 吕百达, 矩阵光学, 大连, 大连理工大学出版社, 89: 171~ 180

Theoretical Analysis of Fiber Collimator with High Return-Loss

Yu Guohua^a Liu Shuihua^b Fang Luozhen^b
 Jiang Shan^b Huang Dexiu^a

a, Department of Optoelectronic Engineering,
 Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

b, Solid Devices Institute of the MPT,
 Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications of the MPT, Wuhan 430074

(Received 13 February 1996; revised 15 April 1996)

Abstract On the basis of the theory of Gaussian light beams transmission and applying principles of matrix optics and theory of Gaussian light coupling, a theoretical equation for calculating the return-loss of fiber collimator with beveled end-face and GRIN lens is derived. The change of return loss in fiber collimator with changing the fiber collimator's parameter is explained. Experimental results agree with the theoretical analysis.

Key words fiber collimator, return loss.