

自聚焦透镜在光纤准直器中的应用分析^①

朱少丽¹, 徐秋霜², 刘德森¹

1. 西南师范大学 物理学院, 重庆 400715; 2. 深圳市昊谷光电技术有限公司, 广东 深圳 510809

摘要: 分析了自聚焦透镜在光无源器件——光纤准直器中的应用, 讨论了自聚焦透镜和光纤之间的耦合及光纤准直器之间的耦合, 计算并测量了光纤准直器的损耗, 提出了改进办法。

关键词: 自聚焦透镜; 光纤准直器; 耦合; 损耗

中图分类号: TN252

文献标识码: A

光纤通信已成为当今信息社会不可缺少的神经系统^[1], 光无源器件是光纤通信设备的重要组成部分, 也是光纤传感和其它领域不可缺少的光器件。在光纤通信向大容量、高速率发展的今天, 光无源器件的重要性将更加突出^[2]。由于自聚焦透镜(GRIN)有很好的聚光、准直、成像等特性, 因此自聚焦透镜是改善光无源器件性能的一个重要部分。自聚焦透镜的研制成功大大促进了对变折射率介质的研究, 不仅促进了变折射率光学理论的迅猛发展, 而且基于自聚焦透镜制作的多种微小光学器件在光纤通信、光纤传感和光信息等领域中对各学科的发展起了重要作用^[3]。因此努力研制、开发、改进自聚焦透镜的性能, 了解自聚焦透镜的应用前景十分重要。国内外对光纤准直器等方面的研究主要集中在理论方面, 本文着重从实用的角度阐述了 GRIN 在光无源器件——光纤准直器中的应用, 讨论了自聚焦透镜和光纤之间的耦合及光纤准直器之间的耦合, 计算并测量了光纤准直器的损耗, 实验表明其实际损耗在理论损耗值允许的误差范围内, 达到了理论要求。

1 光纤准直器

根据自聚焦透镜的传光原理, 对于 1/4 节距的自聚焦透镜, 当汇聚光从自聚焦透镜一端面输入时, 经过自聚焦透镜后会转变成平行光线。自聚焦透镜的这一准直功能如图 1 所示。

光纤准直器是光纤通信系统和光纤传感系统中的基本光学器件, 它由 1/4 节距的自聚焦透镜和单模光纤组成(图 2), 其用途是对光纤中传输的高斯光束进行准直, 以提高光纤与光纤间的耦合效率。这种光纤准直器的特点是两光纤准直器间有较长的间距, 可以插入光学元件。

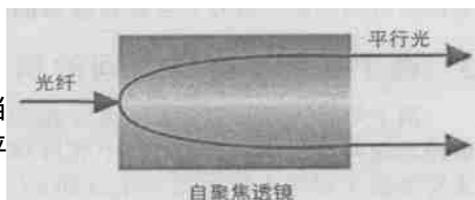


图 1 自聚焦透镜准直原理示意图

Fig. 1 The Collimated Principle Figure of a GRIN

2 光纤和自聚焦透镜的耦合

自聚焦透镜是渐变折射率透镜, 它的折射率服从平方率分布规律^[3]

$$n^2(r) = n_0^2(1 - Ar^2) \quad (1)$$

其中: n_0 为轴线折射率, r 为离轴距离, A 为自聚焦透镜的聚焦常数。

自聚焦透镜的焦距为

$$f = \left[n_0 \sqrt{A} \sin\left(\sqrt{Az}\right) \right]^{-1} \quad (2)$$

① 收稿日期: 2003-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60277017)。

作者简介: 朱少丽(1976-), 女, 山东烟台人, 硕士, 主要从事变折射率光学和微小光学方面的研究。

通讯作者: 刘德森, 教授, 博士生导师。

其中: z 为自聚焦透镜的长度.

从式(2)可见, 因为 A 是波长的函数, 所以 f 也是波长的函数. 如图 3 所示, 在给定的波长条件下, 如果 z 过长, 则焦点在透镜端面内; 反之 z 过短, 则焦点在透镜端面外. 因此, 透镜的长度误差必然会影响到光束耦合效果, 这是造成准直器损耗的主要原因之一.

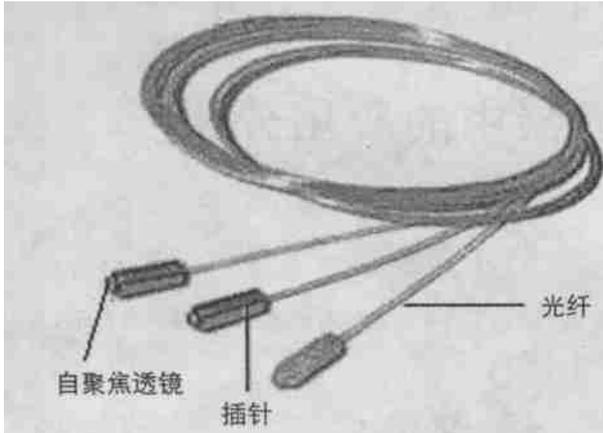


图 2 光纤准直器
Fig.2 The Figure of an Optical Fiber Collimator

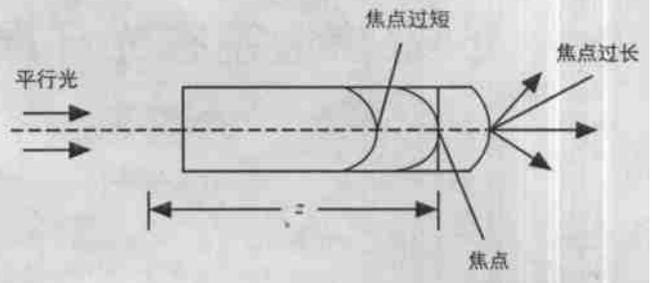


图 3 透镜焦距为波长的函数
Fig.3 The Relation Between the Len's Focus and the Wavelength

光纤准直器是由光纤和 1/4 节距的具有抗反射镀层的自聚焦透镜组成. 它们之间的耦合原理同普通透镜的耦合原理相似, 所用自聚焦透镜的长度为

$$z = \frac{P}{4} = \frac{\pi}{2\sqrt{A}} \quad (3)$$

其中: P 为自聚焦透镜的节距. 因为 P 是在近轴近似条件下, 根据子午光线遵循正弦路径传播而确定的. 同时, 自聚焦透镜的折射率分布在离轴心 0.8 mm 半径处有一拐点. 所以由式(3) 计算出的 z 值不准, 带来了耦合时的损耗; 另外, 自聚焦透镜的像差也会使耦合效率下降, 增加器件的损耗.

3 两个光纤准直器之间的耦合

两个单模光纤准直器耦合时, 准直器的失配会使单模光纤间产生附加损耗. 2 个光纤准直器间的失配主要来源于如图 4 所示的 3 个方面: (a) 光纤准直器间的偏轴距离; (b) 光纤准直器间的角度偏差; (c) 光纤准直器间的轴向间距.

当自聚焦透镜的长度为 1/4 节距时, 即 $\sqrt{A}z = \frac{\pi}{2}$, 根据模场耦合理论, 光场分布为 ϕ_1 的高斯光束与 ϕ_2 的高斯光束的耦合效率为^[2]

$$\eta = \frac{\left| \iint \phi_1 \phi_2 ds \right|^2}{\iint |\phi_1|^2 ds \iint |\phi_2|^2 ds} \quad (4)$$

运用高斯光束传输理论, 经进一步推导, 可分别得到光纤准直器在离轴耦合、偏角耦合及间距耦合 3 种情况下, 光纤与光纤间的耦合效率^[2].

(a) 两光纤准直器离轴耦合

$$\eta_a = \exp \left[- \left(\frac{n_0 \sqrt{A} J_{k0} \omega_0}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (5)$$

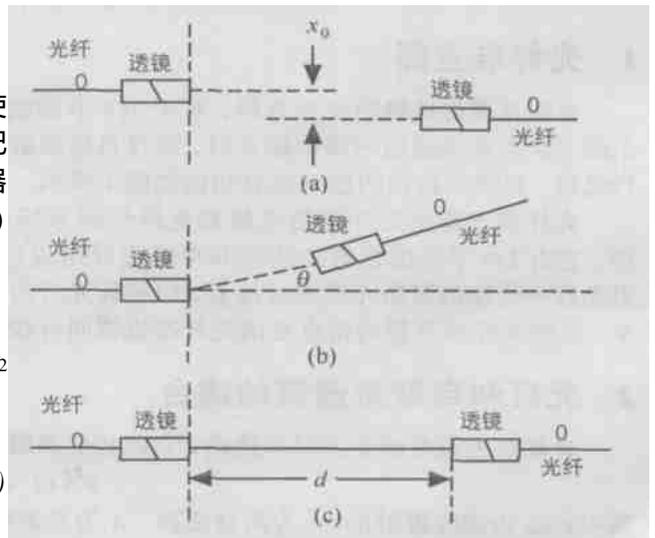


图 4 光纤准直器之间的耦合
Fig.4 The Coupling Between Two Optical Fiber Collimators

(b) 两光纤准直器偏角耦合
$$\eta_b = \exp\left[-\left(\frac{\theta}{n_0 \sqrt{A} \omega_0}\right)^2\right] \quad (6)$$

(c) 两光纤准直器间距耦合
$$\eta_c = \frac{4(1 + \varepsilon^2)}{(2 + \varepsilon^2)} \quad (7)$$

其中

$$\varepsilon = \frac{n_0^2 A \pi d \omega_0^2}{\lambda} \quad (8)$$

其中: ω_0 , λ 分别为高斯光束的模场半径和波长; d 为光纤准直器间的间距; x_0 为两光纤准直器的轴间间距; θ 为两光纤准直器间的角度.

图 5(a) 为光纤准直器的耦合损耗与其轴间距离的关系曲线. 增加两光纤准直器的离轴间距, 光纤准直器的耦合损耗值也增加, 而且离轴间距小于 0.05 mm 时, 改变离轴距离, 光纤准直器的耦合损耗值变化不大; 当偏轴距离大于 0.1 mm 时, 耦合损耗值与离轴距离值几乎成线性关系; 当偏轴距离为 0.5 mm 时, 理论计算得到耦合损耗为 27.31 dB.

图 5(b) 为光纤准直器的耦合损耗与其角度的关系曲线. 从该图可以看出, 光纤准直器耦合效率对角度非常敏感, 稍微给两准直器一偏离角, 其耦合损耗即发生很大变化. 当两光纤准直器的偏角为 0.3° 时, 耦合损耗就达 10.09 dB. 因此进行光纤准直器耦合时, 应特别注意两光纤准直器角度是否匹配.

图 5(c) 是光纤准直器的耦合损耗与其间距的关系曲线. 从该图可以看出, 光纤准直器的耦合对一定范围的轴向间距不太敏感. 在这一范围内, 轴向拉开两光纤准直器时, 其耦合损耗值变化很小, 此后才逐渐变大.

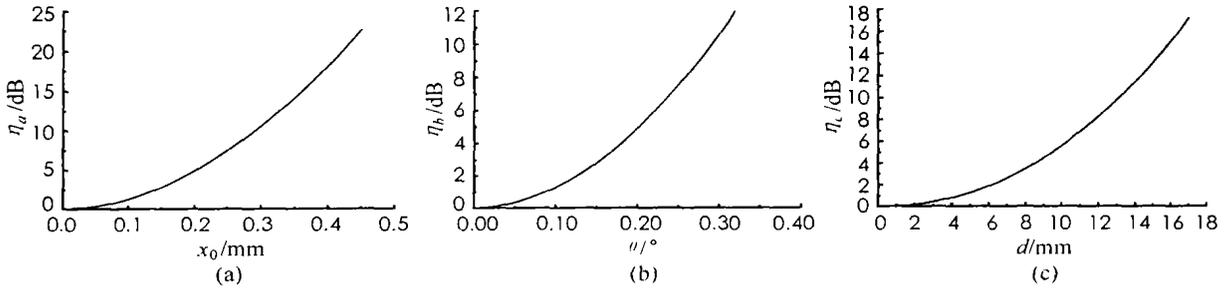


图 5 损耗 L 与其轴间距离 x_0 , 偏角 θ 和距离 d 的曲线

Fig. 5 The Curve Between the Loss L and the Distance from Axex x_0 , the Departure Angle θ and the Distance d

4 插入损耗和回波损耗的测量

光纤准直器插入损耗和回波损耗的测试方框图如图 6 所示. 测试插入损耗和回波损耗时要注意的: 光源的波长必须在工作波长范围内, 并使任何可能注入的高次模得到足够的衰减, 光纤在熔接和插入探头前必须用切割刀切好端面.

现以图 6(a) 两两对调法为例说明其测量方法及步骤.

第一步: 先启动光功率计电源, 在无光输入的情况下, 按下 ZERO 键 (自动清零) 功率计显示 0.00 mW. 将耦合器 2 端与光源熔接, 1 端插入光功率计探头中, 按下功率计 STOREF 键存储, 设定基准, 然后再按下 UNIT 键把功率单位转换为 dB.

第二步: 任意取两个准直器固定在微调架上, 将其中一准直器光纤线

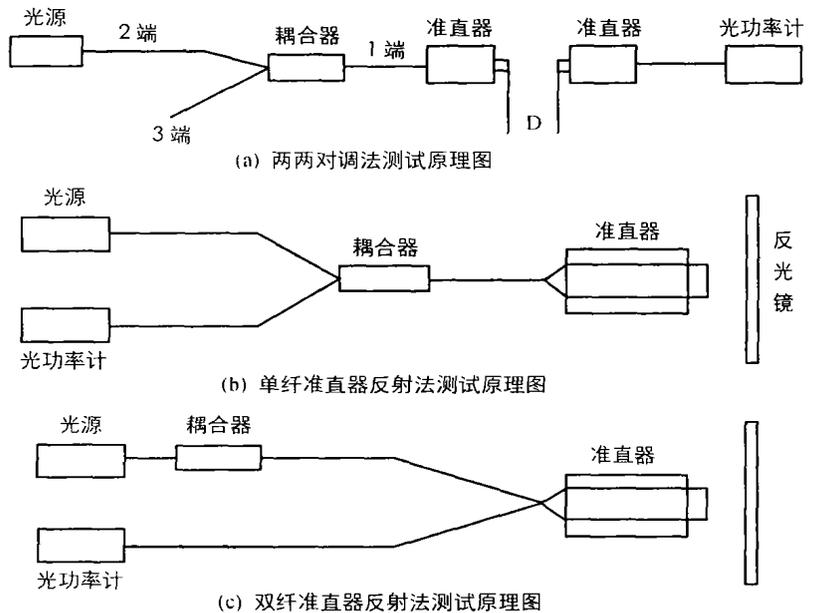


图 6 插入损耗和回波损耗测试方框图

Fig. 6 The Figure of the Insert Loss and the Reflect Loss

与耦合器 1 端熔接, 另一准直器光纤线插入功率计探头中, 工作距离 D 视实际情况而定。

第三步: 调节微调架, 直到光功率计显示最小值为止, 此值即为此对准直器的插入损耗 L_I (dB)。

第四步: 将耦合器 3 端插入功率计探头中, 移开另一准直器微调架, 根据功率计显示值, 对照回波损耗计算表, 确定与耦合器 1 端熔接在一起的准直器的回波损耗 L_R (dB)。

第五步: 将耦合器 1 端与另一准直器熔接, 用同样方法测此准直器的回波损耗 L_R (dB)。图 6(b) 和图 6(c) 是另一种方法反射法的测试原理图, 其测试插损的值要大, 原因是由于反光镜所引入的损耗, 记录时要用测得值减去平面镜损耗值。在实际应用中, 插入损耗越小越好, 回波损耗越大越好, 以减少反射光对光源和系统的影响。但当自聚焦透镜长度变长时, 即由 $0.23P$ 逐渐接近 $0.25P$ 时, 插损和回损都会逐渐变小, 特别是用 $0.25P$ 的自聚焦透镜做成的准直器, 回损很难达到大于 65 dB, 所以实验中寻找一个平衡点使得插损和回损都比较理想, 日本规定标准为 $0.23P$ 。实验温度 $23\text{ }^\circ\text{C}$, 透镜长度 $0.23P$, 单模单纤准直器从 100 个产品中取样 10 个, 单模双纤准直器从 200 个产品中取样 10 个, 实验结果见表 1。

表 1 插入损耗和回波损耗的测量结果

Table 1 The Result of the Inset Loss and the Reflect Loss

产品名称 产品编号	单模单纤准直器		单模双纤准直器	
	L_I / dB	L_R / dB	L_I / dB	L_R / dB
1	0.12	> 65	0.14	> 65
2	0.12	> 65	0.14	> 65
3	0.11	> 65	0.15	> 65
4	0.14	> 65	0.14	> 65
5	0.14	> 65	0.15	> 65
6	0.08	> 65	0.14	> 65
7	0.10	> 65	0.14	> 65
8	0.08	> 65	0.13	> 65
9	0.10	> 65	0.13	> 65
10	0.10	> 65	0.13	> 64
合格要求	< 0.15	> 60	< 0.15	> 60

5 结 论

由于光纤准直器又是制作光隔离器、WDM 器件和光衰减器的基础元件, 而光纤准直器的插入损耗和回波损耗主要是自聚焦透镜的损耗, 所以改善自聚焦透镜的性能是关键, 现在一般采用二次离子交换法^[4,5]进行改进。随着自聚焦透镜性能的不断改进, 各种光无源器件的实用价值也越来越高。

参考文献:

- [1] 黄章勇. 光电子器件和组件 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.
- [2] 林学煌, 方罗珍, 姚建, 等. 光无源器件 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1998.
- [3] 刘德森, 高应俊. 变折射率介质的物理基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1991. 1- 2, 36- 38.
- [4] 周自刚, 刘德森. 制作铊玻璃自聚焦透镜的两步离子交换工艺分析 [J]. 光子学报, 1999, 28(5): 451- 454.
- [5] 周自刚, 刘德森, 刘晓东. 铊玻璃自聚焦透镜边缘折射率分布的改进 [J]. 光子学报, 1999, 28(10): 943- 946.

The Analysis of GRIN in Optical Fiber Collimator

ZHU Shao-li¹, XU Qiu-shuang², LIU De-sen¹

1. School of Physics, Southwest China Normal University, Chongqing 400715, China;

2. Augoo Fiber Technologies CO., LTD, Shenzhen Guangdong 510809, China

Abstract: The application of GRIN in optical fiber collimators is analyzed. The coupling between the GRIN and the fiber and the coupling between two optical fiber collimators are discussed, the loss of the optical fiber collimators is calculated and measured, furthermore an improve method is put forward.

Key words: gradient index lens (GRIN); optical fiber collimator; coupling; loss

责任编辑 潘春燕