

文章编号: 1001-3806(2004)02-0181-03

高斯光束在光纤间的耦合

吴俊芳 王 英 张 凌

(华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 高斯光束在光纤之间的耦合方式有多种,常用的一种是准直-聚焦的透镜耦合系统。为确定耦合系统的参数,首先分析单透镜对高斯光束的变换,从变换后束腰半径的表达式中看出它受到多个变量的影响,通过作图找到了束腰半径的变化规律。然后把这一规律应用于准直-聚焦透镜组成的耦合系统中,得到了确定耦合系统参数的一般方法。最后给出了一个光纤间耦合的实例。

关键词: 高斯光束;耦合;光纤;透镜

中图分类号: O435 **文献标识码:** A

The coupling of Gaussian beam between fibers

WU Junfang, WANG Ying, ZHANG Ling

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: There are several means for Gaussian beam to couple between optical fibers. One of these is collimating-focusing system using lenses. To decide the parameters of the coupling system, the Gaussian beam's change through a single lens is studied. It indicates that the waist width passing through the lens is decided by several variables, which is illustrated. By analyzing the illustration, the general principle to select the parameters is found. At last, the conclusion is used to resolve an instance.

Key words: Gaussian beam; coupling; fiber; lens

引 言

现代通信领域中对信息的传输速率和带宽的要求已越来越高,传统的传输媒质——电线已接近其潜在的极限,很难再有较大改善,而光纤却有着巨大的带宽资源,并且传输速率高,所受干扰小,再加上体积小、重量轻等优点使光纤备受关注,在实际中已有了广泛应用。光纤中传输的信号是经过调制的激光,激光不同于普通的几何光束,而是高斯光束,它有着自己的一些传播规律。

实际中的不同应用就要求使用不同规格的光纤,而同一个信号要经历这不同的光纤从源地址到达目的地址,就需要从一种光纤耦合到另一种光纤。而不同光纤的芯径和数值孔径均不匹配,若将它们直接焊接,必然产生很大的连接损耗,因此考虑用透镜完成耦合。

高斯光束经透镜的耦合变换中,不仅受到所用

光纤的参数限制,还要考虑一些实际条件,使之具有可行性。

1 透镜对高斯光束的变换

沿 z 轴传播的基模高斯光束,以其束腰位置为原点,等相位面的光斑半径由下式^[1]确定:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/f)^2} \quad (1)$$

式中, w_0 为基模高斯光束的束腰半径, f 为高斯光束的共焦参数,且 $f = \pi w_0^2 / \lambda$ 。

基模高斯光束在自由空间传播时是由束腰逐渐向两边发散的,发散程度用发散角 θ_0 来衡量,其定义^[1]为:

$$\theta_0 = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{2w(z)}{z} = \frac{2\lambda}{\pi w_0} \quad (2)$$

如果高斯光束在空间传输时遇到透镜,光束参数就要改变。图 1 所示为透镜对高斯光束的变换。图中, w_0 为入射高斯光束束腰半径, w_0' 为出射高斯光束束腰半径, l 为 w_0 与透镜 L 的距离, l' 为 w_0' 与透镜 L 的距离。它们之间满足下面关系^[1]:

$$w_0' = \frac{Fw_0}{\sqrt{(F-l)^2 + f_0^2}} \quad (3)$$

基金项目:国家八六三课题资助项目(2002AA312280)

作者简介:吴俊芳(1977-),女,硕士,现从事喇曼激光放大器件及光纤激光器的研究。

E-mail: wujunfang6@eyou.com

收稿日期:2003-05-12;收到修改稿日期:2003-09-08

$$l' = F + \frac{(l - F)F^2}{(l - F)^2 + f_0^2} \quad (4)$$

式中, F 为透镜的焦距, λ 为高斯光波长。

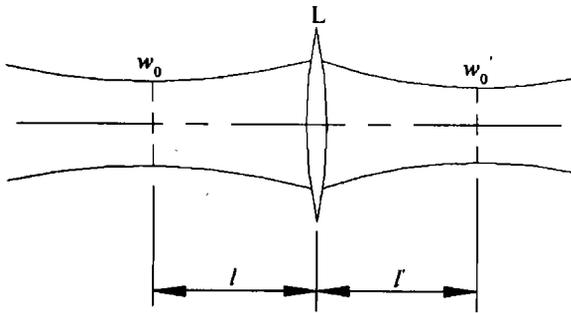


Fig. 1 Gaussian beam's change through lens

(3)式、(4)式表征了高斯光束的成像规律,即物高为 $2w_0$,物距为 l 的高斯光束经过焦距为 F 的透镜的变换规律。

由(3)式可看出,像方束腰半径 w_0' 由物方束腰半径 w_0 、焦距 F 、物距 l 及共焦参数 f_0 共同决定。为方便地研究 w_0' 随各变量的变化,可进行归一化处理,从而得到:

$$\frac{w_0'}{w_0} = \frac{1}{(l/F - 1)^2 + (f_0/F)^2}$$

按上式作出相应曲线^[2]。图2所示为归一化束腰半径随归一化物距的变化。

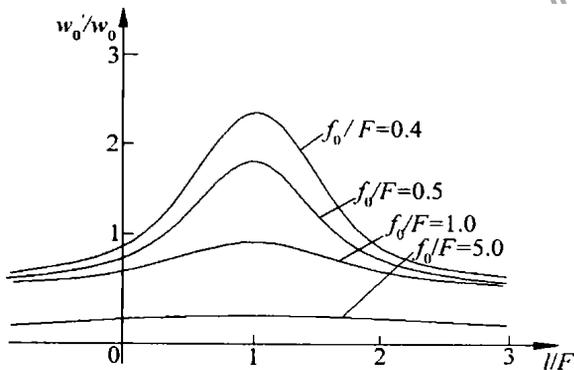


Fig. 2 Changing curves of normalized Gaussian waist for several parameters

2 光束在光纤间的透镜耦合

光纤之间光束耦合的最简单方案是使用一片单透镜,但单透镜不可避免地要产生像差,因此很难将一束有发散角的光会聚到很小的范围内。若使用组合聚焦透镜,不仅能将光束会聚成很小的光斑,还能因为它本身的结构而减小像差。为配合聚焦透镜,需要在它之前放置准直透镜。图3所示为光纤之间光束耦合的原理图。图中用一片单透镜等效代替了组合聚焦透镜。

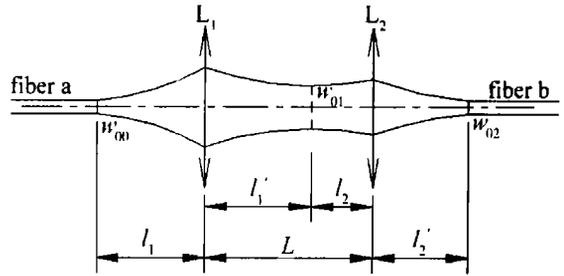


Fig. 3 Fiber coupling system with two lens

图3表示了这样的过程:光纤 a 发出的束腰半径为 w_{00} 、数值孔径为 NA_0 的高斯光束,经准直透镜 L_1 、聚焦透镜 L_2 作用后,束腰半径和数值孔径分别变为 w_{02} 和 NA_2 ,再由光纤 b 接收。而光纤 b 只能接收满足 $w_{02} \leq w_{0b}$ 和 $NA_2 \leq NA_b$ 的光束,其中 w_{0b} 和 NA_b 由光纤 b 决定。

为将光纤 a 发出的光全部耦合进光纤 b,需要确定合适的物距 l_1 ,像距 l_2' ,透镜间距 L ,准直透镜焦距 F_1 和聚焦透镜焦距 F_2 。

2.1 束腰半径对耦合参数的影响

首先研究光束经 L_2 的变换。在这一过程中, F_2, l_2, w_{01} 均为待定量,目的是得到小的会聚光斑,即小的 w_{02} 。

下面根据图2来分析当 w_{01} 固定时, w_{02} 随 F_2, l_2 的变化,以及当 F_2, l_2 固定时, w_{02} 随 w_{01} 的变化。具体来说就是当参数 f_1/F_2 ($f_1 = \pi w_{01}^2/\lambda$,代表了 w_{01}) 确定后, w_{02}/w_{01} 从 $l_2 = F_2$ 处向两边递减,且当 $l_2 \gg F_2$ 时, w_{02} 趋近于0;而当 l_2, F_2 确定后, w_{02} 随 f_1 的增大而减小。所以, w_{01} 越大, F_2 越小, l_2 越大,则会聚后的光斑半径 w_{02} 越小。

再来研究 L_1 对光束的变换。在这一过程中, w_{00} 已给定,需要确定 l_1, F_1 。 L_1, L_2 通过 w_{01} 联系起来的, w_{01} 既是 L_2 的物,也是 L_1 的像。由前面的分析可知,为了得到好的聚焦效果,需要大的 w_{01} 。再根据图2可知,应将 l_1 取在 F_1 处。此时 w_{01} 的值可由(3)式计算:

$$w_{01} = \lambda F_1 / \pi w_{00} \quad (5)$$

(5)式表明,当 $l_1 = F_1$ 时, w_{01} 与 F_1 或 l_1 成正比。因此 L_1 应选大焦距。

综上所述, F_2 越小, l_2 越大, F_1 或 l_1 越大,则会聚后的光斑半径 w_{02} 越小。但高斯光是有一定发散角的,其传播距离越长,光斑就越大,所以更大的 l_1, l_2 就要求 L_1, L_2 有更大的直径来接收,而透镜的直径又受到自身曲率半径,进而受到焦距的限制,不能任意增大;而且光斑越大,就越偏离光束及系统的轴

线。因此要综合考虑各个因素,选取合适的参数。

2.2 数值孔径对耦合参数的影响

数值孔径 NA 的表达式为:

$$NA = n \sin \frac{\theta}{2} = n \sin \frac{\lambda}{\pi w} \quad (6)$$

式中, n 为光波所在介质的折射率。可见,对于一定的光波长,束腰半径与数值孔径的变化趋势是相反的。

把(6)式代入(3)式,得到数值孔径经透镜的变换规律:

$$\arcsin NA' = \arcsin NA_0 \times \sqrt{1 - \left(\frac{l}{F}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{F \pi \arcsin^2 NA_0}\right)^2} \quad (7)$$

$$l' = F + \frac{(l - F) F^2}{(l - F)^2 + (\lambda / \pi \arcsin^2 NA_0)^2} \quad (8)$$

上面两式中的 n 取为 1。

把数值孔径与束腰半径联系起来,并根据前面的分析可得出这样的结论:当耦合系统参数按前面所述原则确定后,可知 w_{02} 越小,则 w_{01} 越大,再由(5)式得 w_{01} 越大则 w_{00} 越小。即 w_{02} 随 w_{00} 是递增的。又由(6)式可得 NA_2 随 NA_0 是递减的。因此,初始的 w_{00} 越小,同时 NA_0 越大,经这个耦合系统变换后的 w_{02} 就越小, NA_2 越大。反之亦然。

选择一组耦合系统参数 F_1, F_2, l_1, l_2, L , 根据光纤 a 所发光束的参数 w_{00}, NA_0 计算出到达光纤 b 时光束的参数 w_{02}, NA_2 。再用 w_{0b}, NA_b 检验,若不满足 $w_{02} \leq w_{0b}, NA_2 \leq NA_b$, 就需重新选择一组耦合系统参数,直到检验后满足要求为止。

3 耦合系统实例

用上面的方法、原则来解决这样一个问题:简化的光路图仍如图 3 所示。光纤 a 发出的光波长为 980nm,其纤芯直径和数值孔径分别为 300 μ m, 0.22, 光纤 b 的纤芯直径和数值孔径分别为 130 μ m, 0.45。为了将光纤 a 发出的光耦合进光纤 b,选取耦合系统的部分参数如下:

$$F_2 = 35\text{mm} \quad (9)$$

$$F_1 = l_1 = 55\text{mm} \quad (10)$$

$$l_2 = 0\text{mm} \quad (11)$$

如果经过耦合系统后最终能够满足 $w_2 \leq \frac{130}{2} \mu\text{m} = 65 \mu\text{m}, NA_2 \leq 0.45$, 则光纤 a 发出的全部光束都能

耦合进光纤 b。下面分别计算 w_2, NA_2 。

把(10)式代入(4)式,可知,不论物方束腰半径是多大,都可得到:

$$l_1' = F_1 = 55\text{mm} \quad (12)$$

再由(11)式得:

$$L = l_1' + l_2 = 55\text{mm} \quad (13)$$

先考虑束腰半径。由(3)式~(5)式,得到光束经 L_1, L_2 变换后的束腰半径、像距: $w_{01} = 256.95 \mu\text{m}, w_{02} = 41.94 \mu\text{m}, l_{2,A}' = 30.755\text{mm}$ 。式中, $l_{2,A}'$ 为按束腰半径计算得到的像距。

再考虑数值孔径。由(7)式, (8)式可得光束经 L_1, L_2 变换后的数值孔径及像距: $\arcsin NA_1 = 0.4465, \arcsin NA_2 = 19.97, l_{2,B}' = 35\text{mm}$ 。式中, $l_{2,B}'$ 为按数值孔径计算得到的像距。

从而有:

$$NA_2 = 0.3415 < 0.45 \quad (14)$$

取整个系统的像距为 35mm, 即 $l_2' = l_{2,B}' = 35\text{mm}$, 则束腰 w_{02} 传输到光纤 b 时的光斑半径由(1)式计算:

$$w_2 = 52.5 \mu\text{m} < 65 \mu\text{m} \quad (15)$$

由(14)式、(15)式可知,当把耦合系统设计为 $F_1 = 55\text{mm}, F_2 = 35\text{mm}, l_1 = 55\text{mm}, l_2' = 35\text{mm}, L = 55\text{mm}$ 时,可以完成光束从光纤 a 到光纤 b 的耦合。

4 小结

高斯光束经过透镜后参数发生了改变。改变后的束腰半径 w_0 由多个变量决定,通过归一化处理,描绘出 w_0 的变化曲线,可以清晰地看出 w_0 随各变量的变化规律。将这一规律应用在两光纤之间光束的耦合中,发现要得到更小的会聚光斑,就必然意味着系统的结构尺寸增大和传输过程中光斑直径的增大,从而对透镜提出了相互矛盾的要求。因此在实际中应综合考虑各因素的影响,同一个问题可以用多种方案解决。

然后给出了一个用透镜进行光纤间耦合的具体实例。按前面的基本方法选定耦合系统后,从束腰半径和数值孔径两方面考虑,证明了这套方案的可行性。

参 考 文 献

- [1] 周炳琨,高以智,陈倜嵘 *et al.* 激光原理. 4 版,北京:国防工业出版社,2000. 70~71.
- [2] 吕百达. 激光光学. 成都:四川大学出版社,1986. 89.