

文章编号: 1007-5461(2004)01-0060-04

钬 (Ho:YAG) 激光细光纤传输研究

吴先友, 刘佩田

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 本文讨论了 Ho:YAG 激光在细纤芯光纤传输的最佳方式, 研究了耦合透镜、入射光斑、发散角之间的相互影响和最佳匹配方法; 讨论了激光器的设计中, 激光棒的热透镜效应对系统参数的影响, 提出了修正方法, 推导出了相应的修正公式; 并通过实验对理论研究进行了验证。

关键词: 纤维与波导光学; 耦合; 匹配; 修正

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

1 引 言

掺钬钇铝石榴石 (Ho:YAG) 可发射 $2.1 \mu\text{m}$ 激光, 人体组织对 $2.1 \mu\text{m}$ 激光吸收率高, 几乎比 Nd:YAG 高 3 个数量级。所以用 Ho:YAG 激光器进行医疗手术时, 不但可以提高手术效率和精度, 而且可使热损伤区域减至更小。钬晶体产生的自由光束可消除脂肪而不会产生过大的热量, 从而减少对健康组织产生的热损伤。

我国 $2.1 \mu\text{m}$ 激光晶体的水平已达到国际水平, 钬激光治疗机可广泛用于骨科、普外科、五官科、泌尿科、妇科、口腔科、心血管科及胸腹腔, 椎间盘突出等疾病治疗。由于钬激光输出功率 25 W 左右时发散角达 15 mrad, 光束经过聚焦后焦斑较大, 用光纤传输时面临的最大难点是细纤芯光纤耦合问题。在一些特殊用途纤芯需要用 $365 \mu\text{m}$, 国外已经用于临床, 但国内只能做到在 $500 \mu\text{m}$ 传输水平^[1]。

本文从光纤最佳传输的角度出发, 研究了耦合透镜、入射光斑、发散角之间的相互影响和最佳匹配方法; 重点讨论了激光器的设计中, 激光棒的热透镜效应对系统参数的影响以及对被影响参数的修正方法。通过对 $365 \mu\text{m}$ 纤芯的光纤进行传输实验, 达到了满意的效果。

2 原 理

2.1 光纤耦合^[2]

从工程角度考虑, 图 1 中对于光束 I (入射角 α), 在光纤所能承受的功率密度范围内, 除反射光 I_0 外

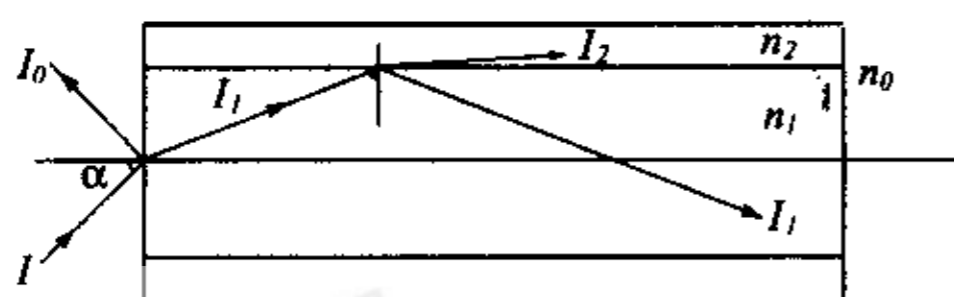


Fig.1 Fiber transmission principle

能最大限度地将折射光 I_1 传输至终端输出, 使 $I_2 = 0$ 。对于子午光纤且不考虑光发散时, 基本要求为入射光 I 在纤芯范围内, 且入射角要满足数值孔径条件:

$$\sin\alpha \leq N.A. = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (n_0 = 1). \quad (1)$$

收稿日期: 2003-03-17; 修改日期: 2003-06-03

E-mail: ptliu@aiofm.ac.cn

2.2 耦合透镜设计

2.2.1 理论计算

为满足数值孔径条件, 设计耦合透镜时必须首先分析入射光斑的直径 D 、耦合透镜焦距 f_0 、发散角 δ 这三个因素之间的相互关系。

图 2 是发散光束经过耦合透镜聚焦的情形, 设焦斑直径为 d , 由图 2 得:

$$d = 2\sqrt{D^2/4 + f_0^2} * \sin(\delta/2) \approx \delta\sqrt{D^2/4 + f_0^2}. \tag{2}$$

若要获得最佳耦合条件, d 必须小于纤芯直径, 且同时满足:

$$\sin(i + \delta/2) \leq N.A. , \tag{3}$$

其中 $i = \arctg \frac{D}{2f_0}$ 为半入射角, 当 $i \gg \delta/2$, 且 $2f_0 \gg D$ 时, (3) 式变为

$$\frac{D}{2f_0} \leq N.A. . \tag{3a}$$

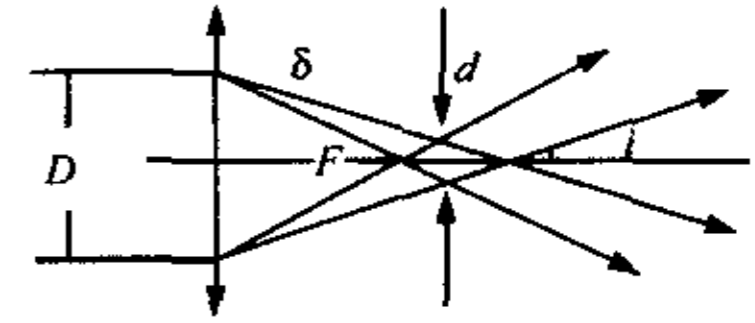


Fig.2 Lens interface principle

2.2.2 参数分析

由 (1)、(2)、(3a) 式可看出要实现细纤芯光纤耦合, 在选择发散角 δ 、入射光斑直径 D 、耦合透镜焦距 f_0 三种参数时, 要符合以下原则:

- 1) 发散角 δ 尽量小.
- 2) 在功率密度不超过光纤损伤阈值前提下, 入射光斑直径 D 越小越好.
- 3) 耦合透镜焦距 f_0 须同时满足 (2)、(3) 式, 因此选择发散角 δ 和入射光斑直径 D 时要与 f_0 匹配.

由于在实验中, 系统参数都有具体的限制, 因此在设计时还要根据实际情况来确定。

2.2.3 实验参数确定

1) 在发散角 δ 和焦距 f_0 均不变的前提下, 减小入射光斑直径 D 虽然简单, 但效果不明显, 因为焦斑直径 $d \approx \delta\sqrt{D^2/4 + f_0^2}$, 通常耦合透镜焦距 f_0 总是入射光斑直径 D 的 4 倍以上。

2) 发散角 δ 不变, 在满足数值孔径前提下, 如果同时减小入射光斑直径 D 和耦合透镜焦距 f_0 , 可以明显减小焦斑直径 d 。

3) 减小发散角 δ 是最有效的方法之一。

2.3 改善发散角 δ

发散角通常指远场发散角, 而光聚焦时, 焦点光斑直径取决于光线从入射到聚焦之间的发散程度, 不能用远场发散角来计算。共焦腔不仅输出光场模式好, 而且正位于束腰处, 发散程度小, 接近平面波, 远场才是球面波 [3], 因此适合光纤耦合的最合理腔型是共焦腔 [4]。

图 3 是共焦腔示意图。腔长为 $2L$, 输出镜 $R_1 = \infty$, 反射镜 $R_2 = 4L$, 激光棒直径 4 mm, 耦合透镜尽量靠近输出镜。如果让耦合透镜 (甚至焦点) 落在束腰处 ($Z = 0$), 那么输出镜要内移, 但 R_1 要符合共焦腔的条件。

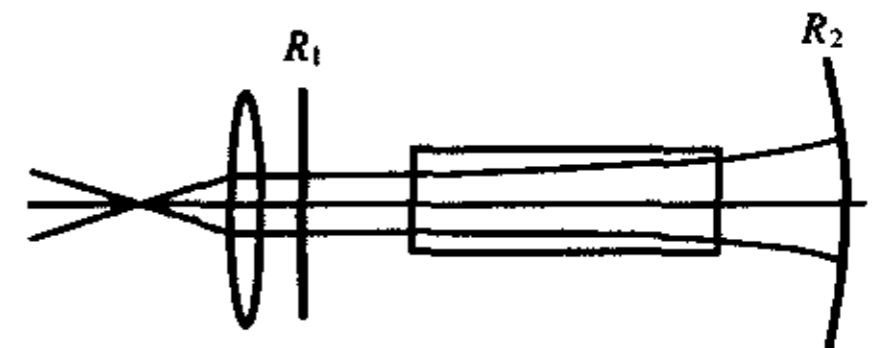


Fig.3 Equivalent spherical optical resonator and lens interface

以上仅限于空腔的情况, 而实际的实验系统中, Ho:YAG 激光泵浦功率通常在 2 kW 以上, 热负透镜效应非常明显。达到热稳态时测量出棒的热透镜等效 f 值, 然后对腔的结构和后腔曲率半径等参数加以修正, 才是完备的系统设计。

2.4 激光棒热透镜效应及其修正

1) 无激光介质时的腔体参数

为了便于比较, 首先计算空腔的参数。图 4 是共焦腔示意图, 其中 $R_1 = \infty, R_2 = 4L$, 腔长为 $2L$, 得:

$$\begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 2L \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2L} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 2L \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 2L \\ -\frac{1}{2L} & 0 \end{vmatrix}.$$

因为 $0 < (1 - \frac{2L}{R_1})(1 - \frac{2L}{R_2}) = 0.5 < 1$, 且 $|\frac{D_1 + A_1}{2}| \leq 1$, 所以为稳定的等效共焦腔.

2) 热透镜效应对腔体参数的影响

强泵浦时, 因为激光介质热透镜效应的影响, 原来的关系不再成立. 首先我们计算其影响的程度. 图 5 是共焦腔插入透镜示意图, 设棒的热透镜等效焦距为 f , $R_2 = 4L$ 不变, 得到参数矩阵:

$$\begin{vmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2L} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{vmatrix} =$$

$$\begin{vmatrix} \frac{3L^2}{2f^2} - \frac{5L}{2f} & \frac{3L^3}{2f^2} - \frac{4L^2}{f} + 2L \\ \frac{3L}{2f^2} - \frac{1}{2L} - \frac{1}{f} & \frac{3L^2}{2f^2} - \frac{5L}{2f} \end{vmatrix}.$$

按高斯光束稳定条件: $|\frac{D_2 + A_2}{2}| \leq 1$, 即 $|\frac{3L^2}{2f^2} - \frac{5L}{2f}| \leq 1$, 得 $0 \leq L \leq (-f)$, 其中 $f < 0$.

若令 $A_2 = D_2 = 0$, 得 $L = \frac{5}{3}(-f)$, 显然 $R_2 = 4L$ 关系不再成立. 为满足总体参数在激光介质热透镜效应影响的前提下, 仍然符合共焦腔条件, 必须重新确定新的 R_2 和 L 之间的关系.

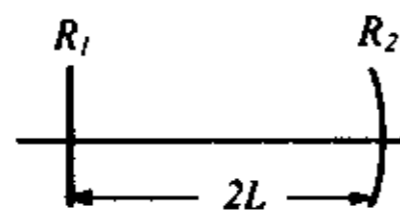


Fig.4 Equivalent spherical optical resonator

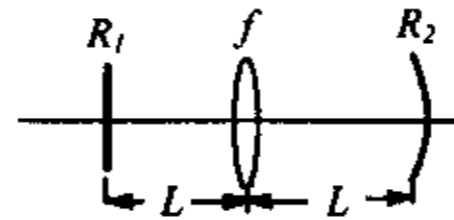


Fig.5 Equivalent spherical optical resonator with rod ($R_2 = 4L$)

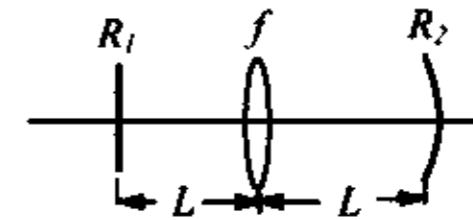


Fig.6 Correct equivalent spherical optical resonator with rod ($R_2 \neq 4L$)

3) 后腔参数修正

图 6 中 R_2 是任意值, 参数矩阵为:

$$\begin{vmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

得
$$A_3 = D_3 = 1 - \frac{4L}{f} + \frac{2L^2}{f^2} - \frac{2L}{R_2} \left(2 - \frac{3L}{f} + \frac{L^2}{f^2} \right).$$

为了满足高斯光束稳定条件, 且与图 4 的 A_1, D_1 参数一致, 令 $A_3 = D_3 = 0$, 得

$$R_2 = \frac{2L(2f^2 - 3Lf + L^2)}{f^2 - 4Lf + 2L^2}. \quad (4)$$

公式 (4) 得出的是考虑了激光介质热透镜效应之后, R_2-L 关系式, 由此参数设计的激光系统, 修正了激光介质热透镜效应的影响, 是完全等效的共焦腔, 输出发散角小且接近平面波的高质量光束, 为细光纤传输提供了可靠的保证.

3 实验结果

3.1 激光系统

实验所用激光系统参数为: 棒直径 4 mm, 腔长 $2L=400$ mm, 输出镜 $R_1 = \infty$, 测出 $f = -2$ m, 由修正

公式 (4) 设计 $R_2=800$ mm .

激光器工作重复频率 10 Hz, 单脉冲能量 1 J, 连续工作 2 h, 基本稳定, 光束质量较好, 基本呈高斯分布. 测量光斑直径, 结果如表 1 所示.

表 1 不同输出距离的光斑直径对比

输出距离 (mm)	10	100	200	300	400
光斑直径 (mm)	3.4	3.6	5.0	6.5	8.1

对以上数据进行计算分析得:

1) 在 100 mm 以内, 发散角 $\delta=2$ mrad, $D=3.6$ mm, 光纤数值孔径 $N.A.=0.22$, 根据 (3a) 式设计耦合透镜 $f_0=10$ mm, 相应焦斑直径 $d \approx \delta \times \sqrt{D^2/4 + f_0^2} = 20 \mu\text{m}$.

2) 在 100~200 mm 之间, $D=5.0$ mm, 发散角 $\delta=15$ mrad, 设计耦合透镜 $f_0=15$ mm, 焦斑直径 $d \approx \delta \sqrt{D^2/4 + f_0^2} = 240 \mu\text{m}$.

3) 越往远场, 发散角几乎不变 (在 15 mrad 左右), 焦斑直径逐步增大.

3.2 耦合系统

实验所用光纤数值孔径 $N.A.=0.22$, 纤芯 $365 \mu\text{m}$, 耦合透镜 $f_0=15$ mm, 安装位置距离输出镜 200 mm, 传输效率达 80% .

4 结 论

通过研究说明对钬激光器, 设计合理的共焦腔结构, 经修正可以消除棒 ($\phi 4$ mm) 热透镜效应对腔体参数的影响, 近场输出接近平面波, 然后靠近输出镜放置耦合透镜, 完全可以做到对纤芯 300 mm 以内的细光纤进行最佳耦合传输.

参考文献:

- [1] www.cnlaser.net/yyjg/js.htm (中国光网)[OL].
- [2] Minghai, Zhang Gaoping. *Photoelectronics Technology* (光电子技术) [M]. University of Science and Technology of China Press, 1998. (in Chinese).
- [3] Koechner W. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Springer-Verlag, 1976
- [4] Yariv A. *Quantum Electronics* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1975.

Ho:YAG Laser Thin Fiber Transmission System

WU Xian-you, LIU Pei-tian

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In this paper, a method is introduced for Ho:YAG laser transmission in thin fiber. Effects and the best match method are studied about interface lens, facula, and divergent angle of Ho:YAG laser. The impact of heating of rod on system parameter is discussed, correction method has been proposed, and correction formula is inferred. The experimental results are in accordance with the theory.

Key words: fiber and waveguide optics; interface; match; correct

作者简介: 吴先友 (1966 -), 男, 在读硕士, 副研究员, 1986 年开始, 一直从事激光应用方面的研制工作.