

连续 Nd: YAG 激光光纤耦合效率的实验^{*}

李玉斌

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春130022)

摘要 对0.6mm 芯径3m 长光纤输出100W 连续Nd: YAG 激光的光纤耦合效率进行了实验分析。围绕光纤耦合效率相关的量: 激光模式、发散角、数值孔径、焦斑直径、精密光纤耦合器等问题进行了讨论; 并给出实验结果: 3m 长光纤输出0~ 100W 激光耦合效率典型值 87%, 最佳值为90%。

关键词: Nd: YAG 激光; 光纤; 耦合效率

1 引言

纤维光学的出现, 使光线可弯曲绕道而行。使光学仪器小型化、现代化。光导纤维作为光通信的传输媒介实现了宽频带、大容量。随着科学技术的发展, 光导纤维也进入到医学领域, 它与激光治疗紧密地联系在一起。可以制成外科手术用的光刀, 甚至可以柔软的进入膀胱、直肠、食道、支气管、胃、鼻咽腔、腹腔、心腔血管、肾脏、胆道等等。实现了很多病种的免开腔手术。

目前, 光导纤维的种类很多, 根据用途划分, 用于直观诊断、检查、拍摄、记录的光纤属低能量的光纤; 用于传输中高功率激光的, 属高能量的光纤。我们所讨论的正是这种高能量的光纤。主要用来作光刀的百瓦级光纤。

国内不少单位制造的光学纤维, 在可见、红外区域每米长度上透光率达80% 以上。由于耦合技术方面原因甚至达不到这个数值。分析提高光纤耦合效率, 可大大缩小仪器光机电体积和重量, 可提高仪器精度、稳定性、可靠性、工作寿命和工作效率等。正因为如此, 我们对百瓦级激光功率的光纤耦合效率展开了一系列分析实验。

2 光路设计结构与原理

光路结构如图1所示, Nd: YAG 激光器发出的激光经过中间过程由3m 长光纤输出

^{*} 收稿日期: 1996年12月18日
八五攻关课题

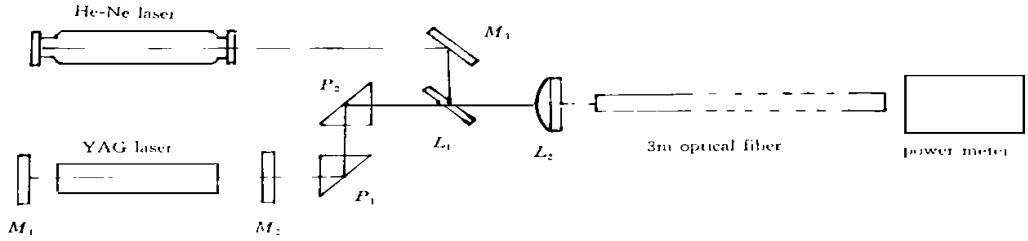


Fig. 1 The experiment system of 3 m optical fiber

0~ 100 W 连续激光。首先用几瓦的 YAG 激光与 He- Ne 激光通过 P_1 、 P_2 、 M_3 、 L_1 调成同心共轴的平行光路。 P_1 可前后串动和左右偏转, 可将光到达 P_2 斜面处任意一点。 P_2 可将光上下左右偏转, 这样可将 YAG 激光在 P_2 斜面处任意一点平行送出。调整 M_3 、 L_1 使 He-Ne 光光心在 L_1 上与 YAG 光光心重合。通过调 L_1 、 P_2 、 M_3 将两光调成同心共轴的平行光束。通过透镜 L_2 和精密光纤接头的机械部件中心。透镜 L_2 与光纤耦合器要组装成一个整体, 在基准面、接触光学件的平表面上的垂直度、平行度误差不超出公差范围。要求光束光心与固定透镜 L_2 和光纤的机械件圆孔中心重合, 且光纤进光口接近透镜焦点。将透镜、光纤调到适当位置后, 拿掉光纤, 将功率计放置透镜后, 测出光纤输入功率; 再接上光纤, 在光纤出口处测出输出功率。由两激光功率比值得出光纤耦合效率 η :

$$\eta = \frac{\text{光纤输出激光功率}}{\text{光纤输入激光功率}} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{1}$$

3 技术的关键性问题

为了获得小的光斑面积, 必须用透镜将激光束聚焦。因为入射到透镜上的激光束具有一定的发散角, 所以在透镜的焦平面上不是一个光点, 而是具有一定面积的光斑。我们希望激光束聚焦在一个尽可能小的范围, 这就要求激光器能在基模 (TEM_{00}) 状态下工作, 这对一般的激光器来说还是比较困难的。所以, 激光模式、发散角决定了聚焦光斑直径的大小, 而聚焦光斑直径的大小又决定了选择光纤芯径的大小和光纤截面单位面积承受的能量密度。以及透镜、光纤加工要求, 机械同心度、平行、垂直度公差, 耦合器的精度等等。

3.1 聚焦透镜

一束发散角为 θ 光束直径为 D 的激光束, 经过焦距为 f 的透镜聚焦后, 在焦平面上的光点直径 d 以及焦深 z 可表示为^[1]

$$d = \frac{4f\theta}{\pi D} = f\theta \tag{2}$$

$$z = \pm \frac{0.32\pi d^2}{\lambda} \tag{3}$$

此处焦深 z 定义为焦斑直径变化5% 两焦斑间距。如图2所示。

则在焦平面上的功率密度为

$$F = \frac{4P}{\pi d^2} = \frac{4P}{\pi(f\theta)^2} \quad (4)$$

式中, F 为焦点处光束的功率密度; P 为激光输出功率。式中 θ 的单位为 $m\ rad$, f 为 mm , p 为百瓦级, 因此焦点处功率密度可达 $10^5 \sim 10^6\ W/cm^2$ 。

聚焦透镜采用平凸透镜, 对平凸透镜, 有 $r_1 > 0$, $r_2 = \infty$, 所以其焦距公式写为^[2]

$$f = \frac{r_1}{n - 1} > 0 \quad (5)$$

由应用光学透镜的基点(面)分析推导, 此时有

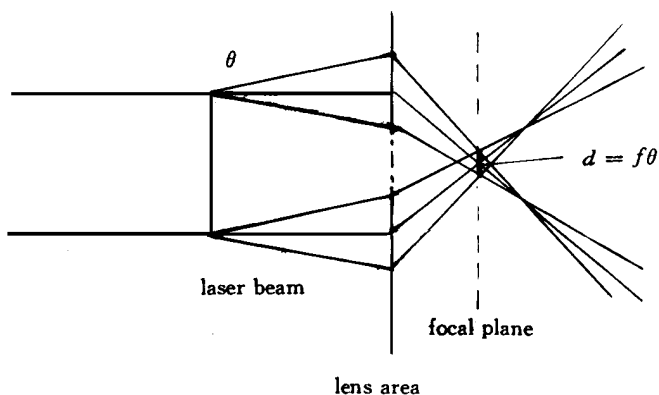


Fig 2 Divergence angle and focused beam

$$l_H = -\frac{d}{n} \quad (6)$$

$$l_H = 0$$

图3表示了平凸透镜基点(面)的分布情况。即平凸透镜的像方焦点位于透镜内部, 其物方主面和球面顶点相切。

平凸聚焦透镜加工, 由于 $1.06\ \mu m$ 的激光波长距可见光波段较近, 可选用溶石英和 K9 玻璃。透镜直径 $D = 14\ mm$, 通光口径 $\varphi = 12\ mm$, 中心厚度 $3\ mm \sim 5\ mm$, 焦距 $f = 25\ mm$, 光学表面光洁度 $P = III$, 光学表面的面型误差的光圈 $N = 1$, 局部误差的光圈的不规则度 $\Delta N = 0.2$, 中心精度(偏心) $C = 0.01\ mm$, 双面镀中心波长 $1.06\ \mu m$ 的增透膜。

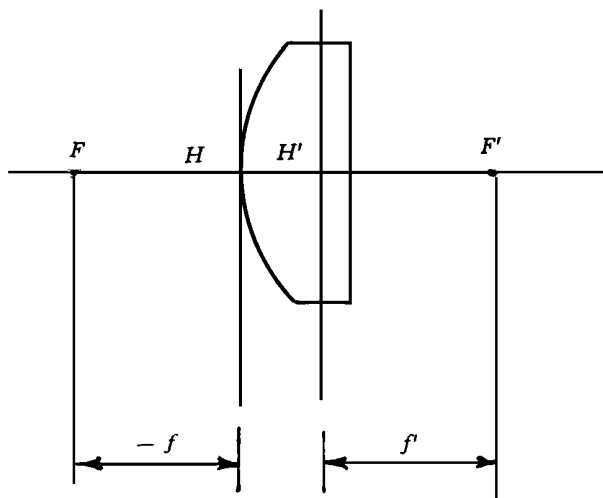


Fig 3 The cardinal points(area)of a plano-convex lens

透镜的数值孔径^[3], 如图4所示, 则它的数值孔径可表示为

$$NA_{\text{透}} = n_0 \sin \alpha = \frac{\varphi}{2f} = \frac{1}{2\left(\frac{f}{\varphi}\right)} \quad (7)$$

式中 φ 为通光口径, f 为透镜焦距, 将 $\varphi = 12 \text{ mm}$, $f = 25 \text{ mm}$ 代入, 即知透镜的数值孔径 $NA = 0.24$ 。

对于一般的激光器而言, 激光的发散角还是比较大的。这里将我们的 YAG 激光发散角为 10 mrad 进行粗略估算, 这样得到的在焦平面上聚焦点光斑直径会更大一些, 像考虑机械公差一样, 以便在选择光纤芯径方面留有余地。依公式 (2)

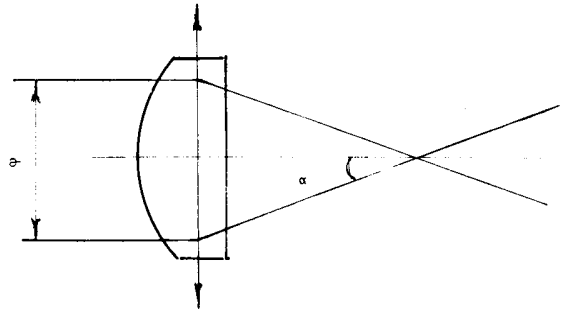


Fig 4 Numerical aperture of lens

$$d = \frac{4\lambda f}{\pi D} = f \theta$$

将 $f = f = 25 \text{ mm}$, $\theta = 10 \text{ mrad}$ 代入上式, 求出焦平面上的聚焦点光斑直径 $d = 250 \mu\text{m}$ 。

图4, α 角一定, $f = 25 \text{ mm}$ 距离, 变化高度 $\varphi = 12 \text{ mm}$, 离开焦平面光纤前后调整范围 $\pm 1 \text{ mm}$, $12 \text{ mm} / 25 = 0.48 \text{ mm}$, 即光斑直径变化到 $480 \mu\text{m}$ 。

3.2 光纤

在传输高功率、大能量激光方面, 最适合用塑料包层光纤, 它用石英玻璃作纤芯材料, 并用塑料包层, 它的传输能力已达到: 连续功率 $(1.06 \mu\text{m}) 2 \text{ kW}$, 峰值功率 120 kW , 芯径的损伤阈值为 10^8 W/cm^2 。当入射在光学纤维端面上的光线的入射角小于一定的角度 β 时, 光线才能在光学纤维中经过多次内全反射后而从一端传递到另一端, 光纤的数值孔径定义为^[3]

$$NA_{\text{子}} = n_0 \sin \beta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \tag{8}$$

$$NA_{\text{斜}} = n_0 \sin \beta_o = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\cos \gamma} \tag{9}$$

式中 n_0 是入射光线所处媒质的折射率, n_1 和 n_2 分别为光学纤维芯和涂层的折射率, β_c 和 β_o 分别定义为子午光线和斜光线的孔径角, γ 是斜光线的倾角。图5是光学纤维数值孔径。我们选用的光纤, 材料为硅橡胶包层高纯石英光纤, 芯径 0.6 mm , 外径 1 mm , 数值孔径 $NA = 0.37$ 。

光纤加工, 我们采用光学套圈的方法磨光纤。由于光纤是由石英材料拉制成的, 故选用石英材料做光学套圈。首先在一个直径 $\varnothing 30 \text{ mm}$, 等厚 10 mm 的粗磨的石英材料圆心上, 用空心钻头、金钢沙加水钻一个 $\varnothing 3 \text{ mm}$ 的中心孔。我们选用 1 mm 外径的光纤, 所以在石英套圈的上面用胶

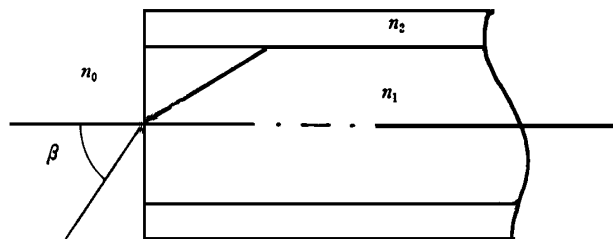


Fig 5 Numerical aperture of optical fiber

封接一个内直径 $\varphi 1 \text{ mm}$, 孔口导角内壁光滑, 外径不作要求, 高 15 mm 的金属通孔棒, 主要对 $\varphi 1 \text{ mm}$ 外径的光纤插入后起定位作用。把待磨的光纤头用蜡封在套圈里, 用光学冷加工方

法,可将套圈加工表面磨到 $N = 2$ 个光圈。我们这样做的目的,是使光纤入射光截面能达到比较高的光学表面要求,并把它作为光纤耦合效率的标准。若以后用工具掰或切出来的光纤的耦合效率跟它比较接近,也就说明我们掰的或切出来的光纤是成功的。

3.3 精密光纤耦合器

在整个光学系统中,光纤耦合器对光纤的定位精度起着非常重要的作用。它的重复性接插耦合精度,应在一定的误差范围内,越小越好。光纤耦合器的连接损耗,同光纤损耗一起计入转换参量。

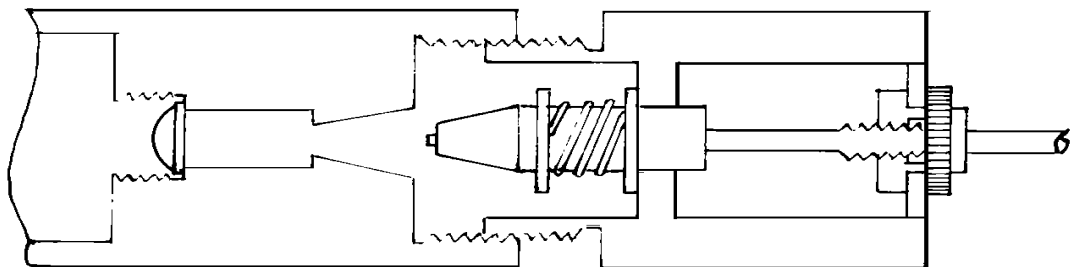


Fig 6 Precision optical fiber coupler

图6是精密套筒型单光纤插接接头^[4]。表面略带锥形,以减少磨损,并便于插入。二氧化硅环氧树脂适合这种套筒型插件材料。用它做成的插接接头,机械牢固性和抗磨损性都很好。二氧化硅环氧树脂膨胀系数很少,故该插接接头可在很宽的温度范围内使用。

套筒型插头的关键部分是精密套子,它圆柱对称,并且中心有一导孔,导孔相对于锥面轴的同轴度小于零点几微米。

4 实验结果与分析

我们用智能化连续 Nd:YAG 激光器做 3 m 长光纤耦合效率实验。激光波长 $1.06 \mu\text{m}$,激光器输出功率 $0 \sim 130 \text{ W}$,功率稳定度变化 $\pm 1.5\%$ 。用取平均值办法,得出下面的实验结果。图7是 3 m 长光纤 $0 \sim 130 \text{ W}$ 连续 Nd:YAG 激光耦合效率实验结果。

图7中 a、b、c 三条线, a 为标准值曲线, b、c 为实验结果曲线。

光纤的转换参量表示在光纤的一端入射光功率,与在光纤的

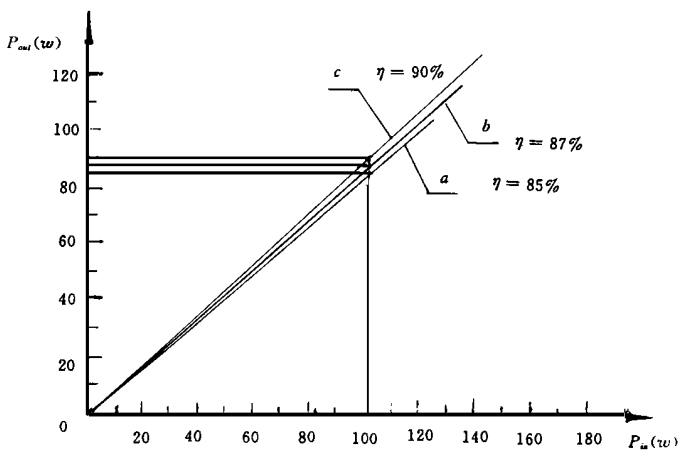


Fig 7 The coupling efficiency of 3 m optical fiber

另一端出射光功率间的关系。因为光纤的损耗随波长而变,所以一根光纤的转换参量在每个谱域内各不相同^[5]。除此之外,还有几方面重要原因。

(1) 光纤端面反射损耗。当电场矢量与边界平面平行时,传输系数和反射系数随入射角的变化而变。^[5]。垂直入射时传输系数为最大值,并由下列简式表示

$$T_E = \frac{4n_1 \cdot n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (10)$$

而对于垂直入射时反射系数为最小值,可由另一简式表示

$$R_E = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (11)$$

对于 $n_1 > n_2$ 或 $n_1 < n_2$ 这两式均成立。象大家熟知的,如果是玻璃与空气的界面, $n_1 = 1, n_2 = 1.5$ 时, $R_E = 4\%$ 。

(2) 光纤的吸收。光纤吸收与光纤材料的共振有关,吸收因子是材料中的杂质,并以发热形式消耗。

(3) 散射损失。散射损失是由材料密度的微观变化,成分起伏及制造过程中产生结构不均匀性或缺陷引起的。它们使玻璃内折射率变化,引起瑞利散射。

(4) 辐射损耗。当光纤弯曲时,会产生辐射损耗,损耗量随半径减小而增加。达到一定值时,会出现效率急剧下降,它由光纤弯曲时,内部材料均匀性破坏改变了全反射条件所引起。

以上各种损耗中,反射损耗影响最大,由于进入光纤的激光是通过透镜聚焦的,与入射端面法线有一定的角度,且光纤表面未镀增透膜,即使将其它损耗忽略不计,这种损耗也约占10%。

从分析的角度看,只要能超过 a 曲线的结果,就算是比较理想的。我们的实验做出3 m 长光纤的耦合效率 87%,而且最佳值竟高达90%,由分析表明,这已经实现了光纤耦合效率的最高值。

参 考 文 献

- [1] 王家金等 激光加工技术 北京:中国计量出版社,1992 73
- [2] 高凤武等 应用光学 北京:解放军出版社,1986 66
- [3] 刘德森等 纤维光学 北京:科学出版社,1987 50
- [4] 美国高锟,中国梁郭泰等译 光纤系统—工艺、设计与应用 北京:中国友谊出版公司,1987 161
- [5] 美国高锟,中国梁郭泰等译 光纤系统—工艺、设计与应用 北京:中国友谊出版公司,1987 14, 19 26

Experimental Analysis of the Coupling Efficiency of an Optical Fiber From CW Nd: YAG Laser

Li Yubin

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

Abstract

The experimental analysis of the coupling efficiency of an optical fiber from three meters long of 0.6 mm optical fiber with diameter with output 100W CW Nd: YAG laser. The quantity in relation to the coupling efficiency of an optical fiber: lasing mode, divergence angle, numerical aperture, focal diameter and precision optical fiber coupler are discussed. The results of experiment: three meters optical fiber output 0~100W laser, typical coupling efficiency 87%, optimum value is 90% are given.

Key words: Nd: YAG laser, Optical fiber, Coupling efficiency

李玉斌 男, 1951年11月生, 1978年9月毕业于四川大学物理系光学专业, 工程师。毕业后一直从事激光技术研究工作。