

文章编号: 0253-2239(2003)10-1200-4

# 大功率激光二极管与多模光纤耦合效率分析\*

林 彬 曾晓东 安毓英 冯■■■

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

**摘要:** 提出了一种用于大功率激光二极管与多模光纤耦合的新颖的铲形整形系统,详细分析了铲形光纤端头不同的切割角度、切割深度以及耦合距离对激光二极管与铲形光纤耦合效率的影响。提出了一种计算该系统耦合效率的方法,同时给出了耦合效率的计算实例,得出了可以最大程度地提高铲形耦合头作用的优化参量。

**关键词:** 大功率激光二极管; 多模光纤; 功率耦合; 耦合效率; 光波整形

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## 1 引 言

近年来国际上大功率半导体激光器的研究和应用(特别是在军事应用领域)都出现了快速发展的趋势。由于半导体激光器的高效率、小体积和高可靠性,已成为最具竞争力的军用激光器,发达国家为此投入了大量人力、财力竞相研究开发应用。但由于半导体激光器波导结构的特点,输出光波发散角很大。尤其是大功率激光二极管阵列单元,在平行于结平面方向发光区尺度通常在  $100\ \mu\text{m}$  左右,而在垂直于结平面方向发光区尺度约  $1\ \mu\text{m}$ ,与多模光纤的直接耦合效率一般都不高,这主要是由于激光二极管在垂直于结平面方向的大发散角与光纤数值孔

径不匹配以及激光二极管椭圆形光场与光纤圆对称模场失配造成的。虽然目前对此已有双微柱面镜组合光束整形方法<sup>[1]</sup>,对垂直及平行两个方向光场同时聚焦,但微柱面镜加工组装困难,对准容差小,价格昂贵。

本文提出了一种利用铲形光纤端头直接耦合的方式,如图 1 所示,其中的  $d$  定义为该铲形端头的切割深度,  $\alpha$  为切割角度,  $n_1$  是纤芯的折射率。理论分析及实验均表明,该系统可以较好地解决大功率激光二极管与多模光纤耦合的问题。同时本文也给出了该系统耦合效率的分析方法。

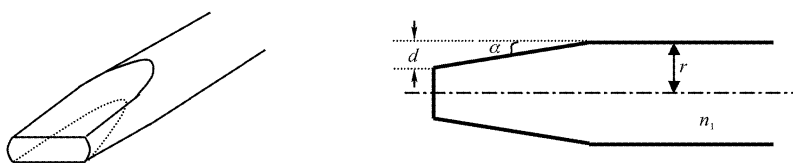


Fig. 1 Structure of screwdriver-like shaping system

## 2 铲形光纤端头与光束整形

由于激光二极管在平行于结平面方向发散角小于  $10^\circ$  (通常小于光纤收光角),在这个方向上看,只要光纤芯径大于发光区尺度而不论芯径大小都可获得良好耦合。因此,大功率激光二极管与多模光纤的耦合关键在于如何高效压缩垂直于结平面方向的发散角。我们提出的铲形结构光纤端头正是基于

此,它对发散角的压缩作用可用图 2 来说明。

铲形光纤端头为对称结构,它的加工参量有铲形斜面切割角度  $\alpha$  和斜面的切割深度  $d$ ,根据二者的关系,主要有三种切割情况:

1) 设计铲形光纤端头的目的是希望让发散角大于光纤数值孔径角的光线在铲形斜面反射,压缩

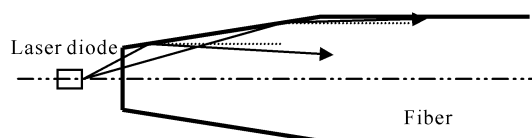


Fig. 2 The angle compression of screwdriver-like shaping system

\* 教育部高等学校骨干教师资助计划资助课题。

E-mail: ericlinbin@sohu.com

收稿日期: 2002-04-22; 收到修改稿日期: 2002-10-29

它的离轴角度,让它也能够 在光纤当中稳定传播。而在图 3(a)的情况下,由于铲形端头切割角度过大,大于数值孔径角的光线经端面折射后照不到斜面,因而铲形斜面不能起到扩大光纤收光角的作用。

2) 图 3(b)的情况为虽然角度较大的光线可以照到斜面,但由于铲形的切割深度  $d$  过小,有一部分光线的角度虽然超出了光纤的数值孔径角  $\theta_{NA} = \arcsin(NA)$ ,却仍未能照到斜面。这种切割情况虽然压缩了入射角较大的那部分光线角度,却没有把离轴更近同时光能量密度又较大的那部分光线耦合进来,因而不能充分利用光能量。

3) 图 3(c)为这个光纤耦合系统的理想加工结构。大于数值孔径角的大部分光线都能够 在斜面得到反射,它们经过斜面反射后,与光纤轴线之间的夹角减小了  $2\alpha$ ,因而相应地起到了扩大光纤收光角的作用。同时,它又保证入射角度较小的尚未照到斜面的光线(这部分光通常占光场能量大部分),都在光纤数值孔径角以内,能够在光纤中稳定传播。

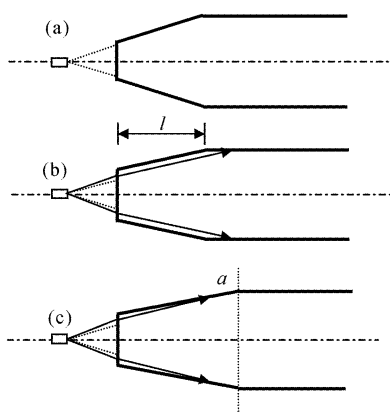


Fig. 3 Different coupling cases of screwdriver-like shaping system

综合以上,加工铲形端头,必须使切割角度小于  $\theta'_{NA}$ ,即  $\alpha < \arcsin(NA/n_1)$ ,才有可能使光纤耦合时工作在图 3(c)的情况下。

### 3 耦合效率的计算

为了使光纤斜面充分发挥扩大光纤收光角的作用,以保证有高的耦合效率,在确定了铲形光纤端头参量后,还应该使光源位置保持在一定范围内,这个范围就是图 4 中的  $Z_1 \sim Z_2$ 。点  $Z_1$  和点  $Z_2$  用下述方法确定:假定图 4 中沿铲形斜面为一条折射进纤芯中的光线,这条光线在进入光纤以前与光纤轴线的交点就为  $Z_1$ ;  $Z_2$  是轴线上以光纤数值孔径角入射,进入光纤后能够刚好到达铲形斜面起始点  $A$  的

光线的源点。

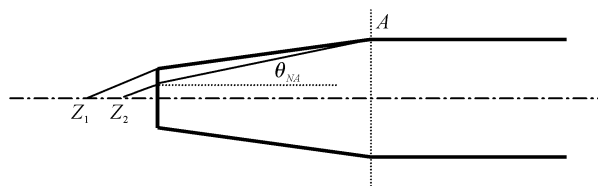


Fig. 4 The coupling distance range of screwdriver-like shaping system

我们计算光源放在这个  $Z$  范围内某一点发出的光被耦合进光纤中的光能量  $P_c$ ,再除以光源发出的总能量  $P$ ,即为这个耦合系统的耦合效率  $\eta$ :

$$\eta = P_c/P. \quad (1)$$

在垂直于结平面的方向上(见图 5),激光二极管光束有很大的发散角,属于远轴光波。根据半导体激光器的远场光分布模型<sup>[2]</sup>,在垂直于结平面的方向上( $y = 0$ ),光强分布可表为

$$I(x, 0, z) = |A|^2 \frac{1}{Z^2} \left( \frac{I_1^0}{I_1^0 + x^2} \right)^2, \quad (2)$$

其中,  $A = u_0 \frac{2i}{\lambda p} \sqrt{\frac{\pi}{q}}$ ,  $I_1^0 = \frac{p^2 z^2}{k^2 + p^2}$ , 这里  $u_0$  为一常量,  $p, q$  是与波导结构有关的源尺寸参量,  $k = 2\pi n/\lambda$  是介质中的传播常量。坐标系原点处于发光面中心。在该坐标系下,将  $x/z = \tan \theta$  代入(2)式,可得

$$I(\theta, z) = |A|^2 \frac{1}{Z^2} \left\{ \frac{p^2}{(k^2 + p^2) [p^2/(k^2 + p^2) + \tan^2 \theta]} \right\}^2. \quad (3)$$

这是表示在  $X-Z$  平面,  $Z$  轴坐标为某一  $Z$  值的线上满足与原点连线偏离  $Z$  轴角度为  $\theta$  的那一点的光场强度。基于半导体激光器的椭圆形光斑以及铲型端头结构的特点,我们可以根据这个表达式近似计算耦合到光纤中的光功率与激光器的总输出功率的比值,从而得到耦合效率  $\eta$ 。

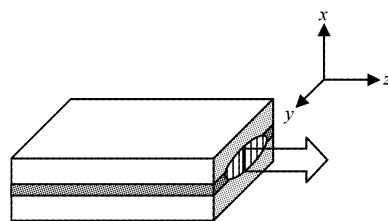


Fig. 5 LD's structure and coordinate system

显然,影响光场能量耦合进入光纤的因素可归纳为以下四个:

i) 光纤本身的数值孔径角对经过斜面反射的光线的限制; ii) 铲形光纤端面宽度对光纤收光角的限制; iii) 斜面不是全反射对光能量的泄漏;

## iv) 光纤端面对光的反射。

因此,要计算耦合效率,应该综合考虑这些因素的限制,它的最终公式可表示为

$$\eta = \frac{P_c}{P} = \frac{\int_{-\theta_1}^{\theta_1} I(\theta, z_0) R(\theta) T(\theta) d\theta}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} I(\theta, z_0) d\theta}. \quad (4)$$

这里  $R$  和  $T$  分别为铲形斜面的反射率和光纤端面的透射率,  $R(\theta)$  和  $T(\theta)$  表示的分别是光源发出的入射角度为  $\theta$  的光线折射进纤芯后在斜面上的反射率和该光线在端头的端面上的透射率, 他们与  $\theta$  的关系可以由菲涅耳公式间接得出.  $I(\theta, z_0)$  是端头端面上特定点的光强, 其中的  $Z_0$  是激光器到端面的距离. 积分限  $\theta_1$  由上述限制因素 i) 和 ii) 中的较小者确定.

作为实例, 我们对一个发散角  $\theta_{\perp} = 40^\circ$  的典型激光二极管与天津四十六所生产的  $NA = 0.16$ , 纤芯折射率  $n_1 = 1.54$ , 纤芯直径为  $130 \mu\text{m}$ , 外径为  $250 \mu\text{m}$  的大芯径光纤在不同铲形切割角度  $\alpha$  以及切割深度  $d$  和不同耦合距离  $Z$  的情况下的耦合效率进行了模拟计算, 得到耦合效率  $\eta$  与  $\alpha$ 、 $d$ 、 $z$  关系如图 6、图 7、图 8 所示.

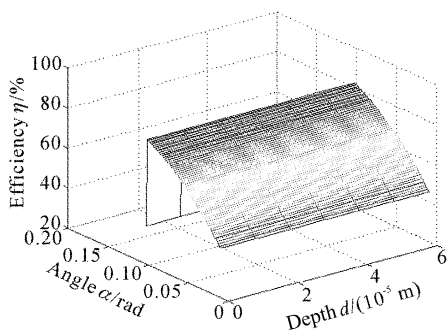


Fig. 6 The coupling efficiency varies with  $\alpha$  and  $d$

图 6 为不同  $\alpha$  与  $d$  情况下激光器光源放在以上所述  $Z$  范围内的  $Z_2$  点时, 耦合效率随  $\alpha$ 、 $d$  的变化情况. 由图可见, 对于相同的切割角度  $\alpha$ , 切割深度  $d$  对耦合效率的影响较小. 在切割深度相同的情况下, 耦合效率总体上是随着切割角度  $\alpha$  的增加而增加, 但当切割角度接近  $\theta'_{NA} = \arcsin(NA/n_1)$  时, 由于此时大于数值孔径角且可以在斜面上反射的光能量开始减小, 因而耦合效率随着  $\alpha$  的增加急速减小 (当  $\alpha = \theta'_{NA}$  时, 将激光器放在  $Z_2$  点处的耦合效率与未对端头进行铲型加工时的耦合效率相同. 不过由于斜面反射的作用, 此时将激光器放在  $Z$  比  $Z_2$  小的地

方的耦合效率会比在该点的更大).

图 7 为切割角度相同但是切割深度不同的几种耦合效率的变化情况. 从图中可以看出, 在切割角相同时, 耦合效率的变化趋势大体相同, 切割深度只是改变了有效的耦合距离. 我们发现, 对于每一种切割深度都有一段距离  $Z$  范围, 在这个范围内它的耦合效率保持着最大值, 这个范围在切割深度等于

$$d = r \cot[\arcsin(NA/n_1)] \tan \alpha, \quad (5)$$

时最大, 即当切割的深度能够让以下条件成立: 光纤端面中心点发出的以数值孔径角入射进光纤的光线能够刚好射到图 4 中的  $A$  点, 这时可使对准容差最大.

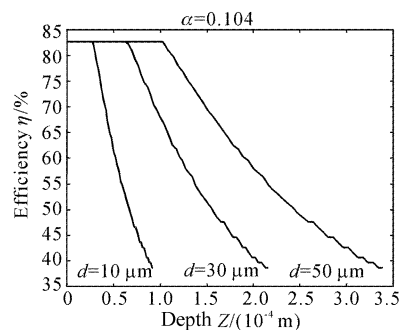


Fig. 7 The relations between  $d$  and coupling efficiency

图 8 为切割深度相同, 但切割角度不同的几种情况, 由图可见切割角度可以很大程度地改变耦合效率.

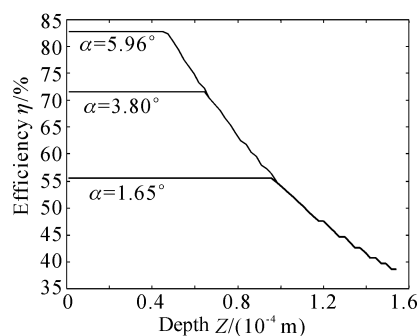


Fig. 8 The relations between  $\alpha$  and coupling efficiency

为了验证这种铲型耦合系统的作用, 我们对现有的芯径为  $200 \mu\text{m}$ , 外径为  $600 \mu\text{m}$  ( $NA = 0.16$ ,  $n_1 = 1.54$ ) 的铲型光纤端头做了实验. 虽然由于加工工艺的不够精确, 两个斜面的切割角度经实测分别为  $6.71^\circ$  与  $3.15^\circ$  (理论上的理想值应该皆为  $5.92^\circ$ ), 耦合效率只达到了  $73.5\%$  (理论值为  $82.4\%$ ), 但这已经可以说明这种结构的端头对于提高光纤耦合效率具有很大的改善作用. 当选用小功率激光二极管耦合时, 耦合效率未见明显变化, 这也

表明在平行于结平面的方向看, 光纤芯径对耦合效率确实无影响。

**结论** 通过将光纤端头加工成铲形的这种耦合方式, 可以极大地提高光纤的耦合效率, 根据以上的光纤以及激光场分布的假设情况, 如果采用直接耦合, 它的最大耦合效率只有 38.6%, 而通过对光纤端头进行铲形加工, 使它的最大理论耦合效率提高到了 82.4%。

影响该系统耦合效率的因素, 除了光源的光场分布以及光纤数值孔径值这些传统因素以外, 对于铲形光纤, 主要有铲形光纤头的切割角、切割深度以及耦合距离。通过控制切割角, 可以极大的改变耦合效率, 在小于数值孔径角的范围内, 从总体上来说切割角越大, 铲形光纤的最大耦合效率越大, 但当切割角接近数值孔径角时耦合效率急速下降, 因此, 切割角  $\alpha$  的理想值应为略小于  $\theta'_{NA} = \arcsin(NA/n_1)$ 。

切割深度主要影响该耦合系统的对准容差, 深度  $d$  过大或过小, 对准容差都将减小。在已确定光纤切割角度以后, 应使切割深度接近(5)式的值, 以得到最大的对准容差。

相对于其他的耦合方法(如双微柱面镜组合以及光纤微透镜端头等), 本方法具有结构简单, 加工容易, 对准容差大等优点, 这对抗振动有很大好处。同时只要将数根铲形光纤并排成型即可用于条型大功率激光二极管的光纤耦合输出。

### 参 考 文 献

- 1 Hauschild D. Micro-optics. *Photonics*, 2000, (1):99
- 2 Zeng X, Naqwi A. Far-field distribution of double-heterostructure diode laser beams. *Appl. Opt.*, 1993, **32** (24):4491~4494
- 3 Zeng Xiaodong, Liang Changhong, An Yuying. Vector theory of off axial Gaussian wave. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1999, **48**(7):1254~1260 (in Chinese)

## Analysis on the Laser Diode-Multimode Fiber Coupling Efficiency

Lin Bin Zeng Xiaodong An Yuying Feng Zhejun  
(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071)  
(Received 22 April 2002; revised 29 October 2002)

**Abstract:** A novel screwdriver-like shaping system for the usage of coupling between high-power laser diode and multimode fiber (MMF) is presented. The effect of cutting angle, cutting depth and coupling distance between laser diode and screwdriver-like fiber on the coupling efficiency is analyzed in detail. A method for coupling efficiency calculating is provided. An example of efficiency calculating is provided, and optimized parameters that can work well with the screwdriver-like coupling system are obtained.

**Key words:** high-power laser diode; multimode fiber; power coupling; coupling efficiency; beam shaping