

大功率 LD 与多模光纤的直接耦合

焦明星 张书练 梁晋文 韦朝灵 查开德
(清华大学精密仪器系, 北京, 100084) (清华大学电子工程系, 北京, 100084)

摘要: 将多模光纤末端研磨成圆锥面, 与大功率 LD 进行直接耦合。分析了影响耦合效率的主要因素, 提出了在工具显微镜上实现直接耦合的新方法, 耦合效率高于 50.8%。

关键词: 大功率 LD 多模光纤 直接耦合

Direct coupling of high-power LD to the multi-mode optical fiber

Jiao Mingxing, Zhang Shulian, Liang Jinwen
(Dept. of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Wei Chaojing, Zha Kaide
(Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: High-power LD is directly coupled to the multi-mode optical fiber whose end is up-tapered by polishing. Some main factors affecting the coupling efficiency are analysed. Proposed is a novel method of carrying out the direct coupling, with the help of the tool-maker's microscope, a coupling efficiency of higher than 50.8 percent is obtained.

Key words: high-power LD multi-mode optical fiber direct coupling

一、引 言

近年来, 激光二极管(LD)与光纤的耦合技术得到了迅速发展, 而且日趋成熟。按照 LD 与光纤之间是否存在光学元件, 将耦合方式分为两种, 即直接耦合与间接耦合。与后者相比, 前者具有结构简单、耦合效率高等优点, 因而受到国内外众多学者的极大关注^[1-4], 现已成功地应用于相干光通信技术, 在光纤传感、激光材料加工、激光材料焊接、激光医疗以及固体激光等研究领域也有广阔的应用前景。

目前, 美国、日本、俄罗斯等国生产的带光纤耦合输出的大功率 LD 极其昂贵, 使国内一般科研单位难以接受。我国现已具备生产大功率 LD 的能力, 但迄今为止尚未开发出带光纤耦合输出的产品, 严重地困扰着国内的科研和生产。本文作者在分析了影响耦合效率的主要因素之基础上, 将多模光纤末端研磨成一定锥角的圆锥面, 借助工具显微镜, 使其与大功率 GaAlAs 量子阱 LD 实现直接耦合, 取得了满意的结果, 满足了科研之急需。

二、基本原理与计算

将光纤末端制成锥角为 2θ 的圆锥面, 可以增大光纤的数值孔径, 从而提高耦合效率。

1. 锥形光纤数值孔径的计算

采用基于几何光学的射线分析法, 容易求得锥形光纤数值孔径 NA 的表达式^[5]

$$NA = \sin \theta_c = \sin(\theta_l - \cos^{-1}[n_2 \cos \theta_l + (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \sin \theta_l]) \quad (1)$$

式中, θ_c 为光纤的孔径角, n_1 和 n_2 分别是纤芯和包层的折射率。不难证明

$$NA |_{\theta_l < 90^\circ} > NA |_{\theta_l = 90^\circ} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2)$$

(2 式表明: 锥形光纤的数值孔径比平端光纤的大。

2. 耦合效率的计算

LD 与光纤直接耦合的效率 η 定义为传导模入纤功率 P_b 与 LD 辐射功率 P_s 之比, 即

$$\eta = P_b / P_s \quad (3)$$

假设 LD 的发光模式为基横模, 出射光为高斯光束, 其光强表达式为

$$I(x, y, z) = A(z) \exp\{-2[(x/\omega_x)^2 + (y/\omega_y)^2]\} \quad (4)$$

式中, $A(z)$ 是与辐射距离有关的光强幅值, $2\omega_x$ 和 $2\omega_y$ 分别表示水平和垂直方向上高斯光束的腰宽, 二者与 LD 出射窗口处 ($z=0$) 的腰宽 $2\omega_{0x}$ 和 $2\omega_{0y}$ 有如下关系

$$\omega_x = \omega_{0x} \sqrt{1 + [\lambda / (\pi \omega_{0x}^2)]^2} \quad (5a)$$

$$\omega_y = \omega_{0y} \sqrt{1 + [\lambda / (\pi \omega_{0y}^2)]^2} \quad (5b)$$

式中, ω_{0x} 和 ω_{0y} 按下面关系式确定 $\text{tg}(\theta_x/2) = \lambda / (\pi \omega_{0x})$ (6a)

$$\text{tg}(\theta_y/2) = \lambda / (\pi \omega_{0y}) \quad (6b)$$

式中, θ_x 和 θ_y 分别是 LD 在平行和垂直于 P-N 结方向上 e^{-2} 功率点处的远场发散角, λ 为 LD 在自由空间的光波波长。由(4 式)可求得 LD 的辐射功率为

$$P_s = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y, 0) dx \cdot dy = A(0) \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-2(x/\omega_{0x})^2] dx \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-2(y/\omega_{0y})^2] dy$$

解之, 得

$$P_s = [\pi A(0) \omega_{0x} \omega_{0y}] / 2 \quad (7)$$

又根据 LD 在不同辐射距离处功率相等, 易得 $A(z) \omega_x \omega_y = A(0) \omega_{0x} \omega_{0y}$ (8)

在光纤头圆锥面 S 上取一面元 $d\sigma$, 如图 1 所示, 可得 LD 入射到 $d\sigma$ 上的功率为

$$dP_b = I(x, y, z) \sin \theta_l d\sigma$$

在圆锥面 S 上积分, 即可得到 LD 的入纤功率

$$P_b = \iint_S dP_b = \iint_S A(z) \exp\{-2[(x/\omega_x)^2 + (y/\omega_y)^2]\} \sin \theta_l d\sigma \quad (9a)$$

为了便于计算, 引入球面坐标 $(\rho, \theta_l, \varphi)$, 则有 $x = \rho \sin \theta_l \cos \varphi$, $y = \rho \sin \theta_l \sin \varphi$, $z = z_0 + \rho \cos \theta_l$, $d\sigma = \rho \sin \theta_l d\rho \cdot d\varphi$ 。于是, (9a 式)可表示为

$$P_b = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^b A(\rho) \exp\left\{-2\rho^2 \sin^2 \theta_l \left[\frac{\cos^2 \varphi}{\omega_x^2(\rho)} + \frac{\sin^2 \varphi}{\omega_y^2(\rho)}\right]\right\} \rho \sin^2 \theta_l \cdot d\rho \quad (9b)$$

式中, 积分上限 b 取值如下 $b = \begin{cases} a \delta / \sin \theta_l & [0 < z_0 < a(\text{ctg} \theta_c - \text{ctg} \theta_l)] \\ z_0 \sin \theta_c / \sin(\theta_c - \theta_l) & [z_0 > a(\text{ctg} \theta_c - \text{ctg} \theta_l)] \end{cases}$

式中, a 为纤芯半径, z_0 为光纤头锥顶与 LD 出光端面 ($z=0$) 间的距离。在计算机上用多维数值积分法可求得 P_b 的数值解。将(7 式)和(9b 式)的计算结果代入(3 式), 即可得到耦合效

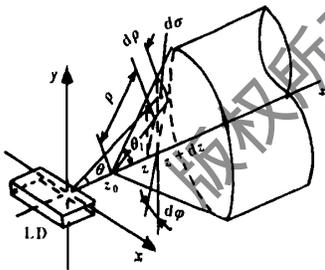


Fig. 1 Schematic diagram of LD to optical fiber coupling

率的理论值。

三、实验方法及步骤

实验所用多模石英光纤头的半锥角 $\theta_l = 59^\circ$, 纤芯半径 $a = 200\mu\text{m}$, 折射率 $n_1 = 1.495$, $n_2 = 1.41$; LD 发光元尺寸为 $1\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$, 连续输出功率达 1W, 标称波长 $\lambda = 810\text{nm}$, 出射光为高斯光束, 其半功率点处的远场发散角 $\theta_{\parallel} \approx 15^\circ$, $\theta_{\perp} \approx 50^\circ$ 。在耦合结构参数业已确定的情况下, 影响耦合效率的主要因素是光纤头相对 LD 管芯的方向和位置, 即光纤头轴线的平行性; 光纤头相对管芯在平行和垂直于结平面两方向上的横向位置; 光纤头至出光解理面的纵向距离。

1. 光纤头轴线与 LD 光轴平行性的调整

为了获得最佳耦合效率, 我们将 LD 和光纤头分别装在制冷器及五维调节架上, 并使二者固联, 置于工具显微镜的圆工作台上, 夹紧。微动工作台, 并仔细调焦(必要时可采用反射光照明, 直到在中央目镜视场内观察到 LD 管芯和光纤头的清晰影象(同时也可看到米字分划板的象, 如图 2 所示。将测角目镜视场内的示值调为 0° , 这时, 米字刻线中的水平和垂直虚线分别平行于工作台的纵、横运动方向。旋转工作台, 并做纵向微调, 使 LD 出光解理面与垂直虚线 AA 重合。调整光纤头方向, 并辅以工作台横向微动, 使光纤头圆柱母线与水平虚线重合(即压线瞄准)。将光纤头与 LD 一起绕纵向旋转 90° , 重新用虚线 AA 瞄准出光解理面, 用水平虚线瞄准光纤头圆柱母线, 这样便保证了光纤头轴线与 LD 光轴的平行性。

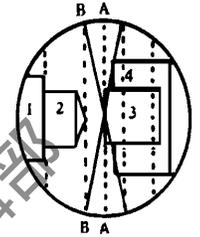


Fig. 2 Central eyepiece's filed of view of the tool-maker's microscope

- 1- optical fiber holder
- 2- optical fiber head
- 3- LD chip 4- heatsink

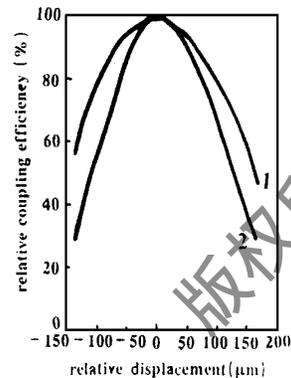


Fig. 3 Coupling efficiency vs. lateral displacement. Curves 1 and 2 are for the directions parallel and perpendicular to the P-N junction, respectively

2. 最佳横向位置的确定

逐渐增加 LD 的注入电流 I 至某一定值(大于阈值电流 I_{th} , 用功率计测量出纤功率。依次改变工作台的横向位置(如每次改变 $10\mu\text{m}$, 这时, 水平虚线不再瞄准光纤头圆柱母线。通过调整光纤头相对 LD 管芯在平行于结平面方向上的横向位置, 直至水平虚线重新瞄准光纤头圆柱母线, 然后, 从功率计读得相应的出纤功率 P_{out} , 如此即可找到 P_{out} 最大时光纤头相对管芯在平行于结平面方向上的最佳横向位置。缓慢减小 I 至零, 将 LD 与光纤头一起绕纵向旋转 90° , 并用垂直虚线 AA 重新瞄准 LD 出光解理面, 再逐渐增加 I 至某一定值($I > I_{th}$, 用前述相同方法可以确定光纤头相对 LD 管芯在垂直于结平面方向上的最佳横向位置。实测的耦合效率与光纤头相对管芯在两正交方向上的横向位移间的变化规律如图 3 所示。

3. 最佳纵向间距 z_{opt} 的确定

当光纤头相对 LD 管芯在平行和垂直于结平面两方向上均处于最佳横向位置时, 仍采用垂直虚线 AA 瞄准出光解理面, 而用垂直虚线 BB 瞄准光纤圆锥面的顶部(必要时可微调光纤头与管芯的纵向间距 z_0 , 这时, $z_0 = 0.3\text{mm}$ (这是由米字分划板本身的结构特点所确定的)。

依次定量改变工作台的纵向位置,同时,减小纵向间距 z_0 ,使光纤锥顶与垂直虚线 BB 始终处于瞄准状态,并由功率计读得相应的出纤功率 P_{out} ,从而确定 P_{out} 最大时的最佳纵向间距 z_{opt} (本实验的测得值 $z_{opt}=80\mu\text{m}$ 。耦合效率随纵向间距的变化规律如图4所示。

四、实验结果及分析

将LD和光纤头的有关参数代入前面给出的计算式,得到在最佳纵向间距 $z_{opt}=80\mu\text{m}$ 处的理论耦合效率为79%。根据上述实验方法及步骤,将光纤头相对LD管芯的方向和位置调整到最佳状态,依次改变注入电流 I ,测量相应的出纤功率 P_{out} ,并根据LD本身的 $P-I$ 特性曲线,确定一定 I 值下的输出

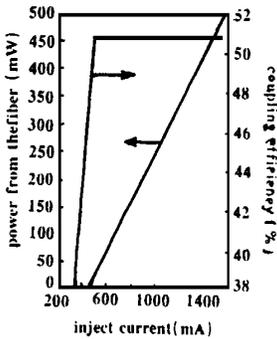


Fig. 5 Measured output power from the optical fiber and the coupling efficiency vs. the LD's inject current

功率 P ,从而计算出相应的耦合效率 η ($\eta = P_{out}/P$)。 P_{out} 与 η 随 I 的变化规律如图5所示(LD的阈值电流 $I_{th}=450\text{mA}$,最大注入电流 $I_{max}=1.55\text{A}$ 。由该图可以看出,在 $I > I_{th} \sim I_{max}$ 范围内,耦合效率稳定不变,达50.8%,最大出纤功率为500mW。

实验所得耦合效率是一个保守值,因为所用LD已非新购器件,其 $P-I$ 特性已不再象原来的那样好,即LD的斜效率有所下降,所以,实际耦合效率还会高一些。另外,选用优质光纤,优化光纤头圆锥角,改进研磨工艺,都将进一步提高耦合效率。

五、结 论

将光纤末端研磨成一定角度的圆锥面,借助工具显微镜,与LD进行直接耦合。实验结果表明,该法结构简单,调整方便,不仅适用于大功率LD与多模光纤的直接耦合,而且适用于小功率的单纵模运转LD与单模光纤的直接耦合,具有较高的实用价值。

参 考 文 献

- 1 刘雪峰,黄德修.一种高效率单模光纤耦合结构的实验研究,'91光电子器件与集成技术年会论文集.北京:清华大学出版社,1992:270~273
- 2 沈景沛,徐安士,汪志雄 *et al.*用于相干光纤通信系统的激光管单模光纤耦合技术,'91光电子器件与集成技术年会论文集.北京:清华大学出版社,1992:273~277
- 3 Bludau W, Rossberg R. Appl Opt, 1982; 21: 1933~1939
- 4 Presby H M, Amitag N, Scotti R *et al.* Electron Lett, 1988; 24: 323~324
- 5 曾甫泉编著. 光纤理论与技术(第一版).西安:西安交通大学出版社,1990

作者简介:焦明星(附照片,男,1962年8月出生。讲师,博士生。现从事固体激光及精密测量技术的研究工作。

张书练,男,1945年10月出生。教授。现从事激光与光电技术方面的教学和科研工作。

梁晋文,男,1921年11月出生。教授,博士生导师。长期从事精密计量与测试技术的研究。

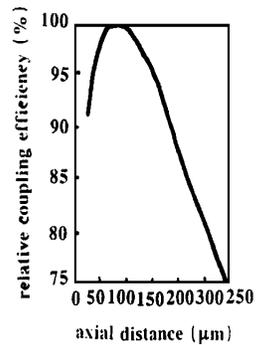


Fig. 4 Measured coupling efficiency vs. fiber-to-diode axial distance