

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

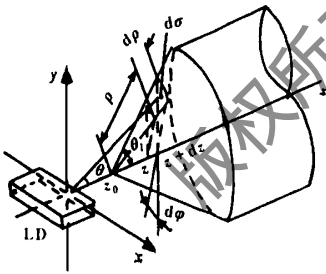


Fig. 1 Schematic diagram of LD to optical fiber coupling

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。

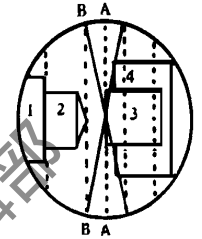


Fig. 2 Central eyepiece's filed of view of the tool-maker's microscope

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

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

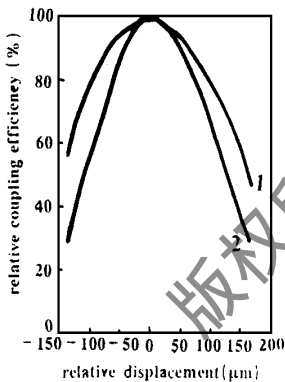


Fig. 3 Coupling efficiency vs. lateral displacement. Curves 1 and 2 are for the directions parallel and perpendicular to the P-N junction, respectively

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

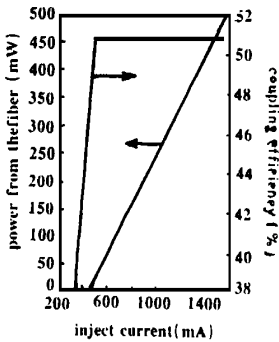


Fig. 5 Measured output power from the optical fiber and the coupling efficiency vs. the LD's inject current

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。

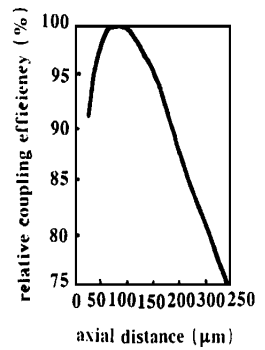


Fig. 4 Measured coupling efficiency vs. fiber-to-diode axial distance