

文章编号: 1001-3806(2010)03-0385-04

铲形光纤与半导体激光器耦合特性的研究

赵曾伟, 宋海飞, 邢彩虹, 张新英, 毛海涛*, 王庆国
(河南大学 物理与电子学院, 开封 475004)

摘要: 为了提高半导体激光器与光纤的耦合效率和失配容忍度, 提出了利用带铲形微透镜的多模光纤与大功率半导体激光器进行耦合的新技术。采用模场匹配的方法, 推导出耦合效率关系。在理论上讨论了耦合时在轴向、倾角的失配容忍度, 并在实验中得到了高达 78.5% 的耦合效率。这一结果对提高铲形光纤的实用性是有帮助的。

关键词: 光纤光学; 耦合特性; 铲形光纤; 激光二极管

中图分类号: TN248.4; TN253

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.028

Study on coupling characteristics of spade fiber and laser diode

ZHAO Zeng-wei, SONG Hai-fei, XING Cai-hong, ZHANG Xin-ying, MAO Hai-tao, WANG Qing-guo
(School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: A novel technique that a high power laser diode is directly coupled to a spade micro-lens multimode fiber was presented to improve the fiber coupling efficiency and alignment tolerance. With the field matching technology, the relationship of coupling efficiency was deduced. The alignment tolerances for axis and obliquity were also discussed. The coupling efficiency reached up to 78.5% in experiments. It is helpful to improve the practicality of spade fiber coupling systems.

Key words: fiber optics; coupling characteristic; spade fiber; laser diode

引言

激光二极管 LD 具有体积小、寿命长及可与集成电路集成安装等优点, 在激光通讯、光信息存储、激光打印、测距以及光孤子等领域已经得到广泛应用^[1]。光纤加工工艺和制造技术的日益提高使光纤的应用范围不断扩大。由于 LD 的光波导存在较强的非对称性, 其输出光束的空间分布在快轴和慢轴方向上出现较大差异, 且具有较大的发散角, 使 LD 与光纤直接耦合受到很大限制^[2]。目前存在各种各样的耦合系统, 通常按照 LD 和光纤之间是否存在光学元件, 耦合方式可分为直接耦合和间接耦合^[3]。间接耦合系统可以获得较高的耦合效率, 但给装配和封装过程造成了很大的困难, 且费用昂贵。现在常采用的是直接耦合系统, 利用微加工技术在光纤端面制作微透镜, 以增大光纤的数值孔径, 使 LD 模场和光纤模场相匹配, 进而提高耦合效率。

LIN 等人提出了新颖的铲形结构, 用光线追迹理论分析了光纤的切割角度及切割深度对耦合效率的

影响, 理论耦合效率为 82.4%, 实际达到 73.5%^[4]。WANG 等人采用改进了的光线追迹数值计算方法, 考虑了光线在半锥形多模光纤锥面多次反射的情况, 计算了半导体激光器与无包层半锥形多模光纤的耦合效率, 分析了相对平移、相对倾斜对耦合效率的影响, 并定性地给出了锥角及半锥宽度对耦合效率的影响^[5]。

作者采用铲形光纤端头直接耦合的方式, 从波动理论出发, 用模场和相位匹配的方法分析了铲形光纤的耦合特点, 并详细分析了失容度与耦合效率之间的关系。从铲形光纤的制作工艺角度, 优化和提高了系统的耦合效率。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的耦合问题。

1 理论分析

典型的条状半导体激光器有源区厚度只有 $1\mu\text{m}$, 而宽度却有 $100\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$, 这将导致出射光束束腰严重不对称。通常, 垂直于 PN 结方向的发散角在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 之间, 平行于 PN 结方向上的发散角在 $3^\circ \sim 10^\circ$ 之间^[6], 这就导致了 LD 的远场光斑为狭长的椭圆形。因此, 在光纤耦合过程中必须对输出光束加以整形校正。

1.1 铲形光纤的特性

在光纤端面通过研磨得到如图 1 所示的铲形结

作者简介: 赵曾伟 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事于激光光纤耦合技术研究。

* 通讯联系人。E-mail: maot@henu.edu.cn

收稿日期: 2009-03-23; 收到修改稿日期: 2009-05-18

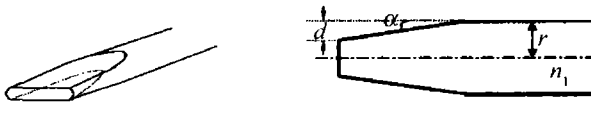


Fig. 1 Configuration of spade fiber

构。图中, d 为该铲形端头的切割深度, r 为半径, α 为切割角度, n_1 是纤芯的折射率^[4]。

将铲形光纤与半导体激光器直接耦合, 采用光纤斜面对 LD 快轴方向进行光束整形准直, 压缩光束发散角。让发散角大于光纤数值孔径角的光线在铲形斜面反射, 压缩它的离轴角度, 让它也能在光纤当中稳定传播。通过控制光纤的切割深度、切割角度以及光源与光纤端面的距离, 让大于数值孔径角的大部分光线都能在斜面得到反射, 经过反射后的光线与光纤轴线之间的夹角变小, 同时又保证入射角较小的尚未照到斜面的光线(这部分光占光场能量的大部分), 都在光纤数值孔径角以内, 能够在光纤内稳定传播。

1.2 铲形光纤与 LD 的耦合分析

从 LD 发出的光束强度可表示为^[7-8]:

$$I(x, y, z) = A_0^2 \left[\frac{w_{0x}}{w_x(z)} \right] \exp \left\{ -2 \left[\frac{x}{w_x(z)} \right]^2 \right\} \times \left[\frac{w_{0y}}{w_y(z)} \right] \exp \left\{ -2 \left[\frac{y}{w_y(z)} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

式中, A_0 为高斯光束的振幅, w_x, w_y 为高斯光束在 x 轴、 y 轴的束腰半径。 w_{0x}, w_{0y} 为高斯光束在 x 轴、 y 轴的束腰半径。在空间沿 z 轴传播 z 后, 波阵面的曲率半径 $R_x(z), R_y(z)$ 均与 z 有关, 且 $R_x(z) > z, R_y(z) > z$, 高斯光束球面波阵面的曲率中心并不在圆心, 随 z 的变化而呈高斯变化。光强呈高斯分布, 同时高斯光束在横、纵方向上发散程度不一样。平行于 x 轴方向, 发散速度比较缓慢, 而在平行于 y 轴方向, 光束发散的速度非常快。光纤具有圆对称的模场, 直接用 LD 和光纤耦合, 耦合效率因模场不匹配而低。铲形微透镜光纤的 y - z 截面结构与锥形光纤结构一致, x - z 截面结构可与光束模场半径相匹配, 可以减少因相位不匹配、模场半径不匹配所带来的耦合损失, 进而提高耦合效率。

铲形光纤相当于在平端光纤端面上加了一个微透镜, 起到一个传输因子的作用, 压缩激光光束的发散角, 高斯激光光束的波前在增大耦合距离的同时变得更加弯曲, 使弯曲的激光光束波前和光纤光束波前相位愈加匹配进而提高耦合效率。根据参考文献[9]和参考文献[10]可知, LD 与单模光纤的耦合效率 η 为:

$$\eta = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_f(x_1, y_1) \psi_{LD}(x_1, y_1) \exp[ikL(x_1)] dx_1 dy_1 \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_f^2(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{LD}^2(x_1, y_1) dx_1 dy_1} \quad (2)$$

式中, k 为角波数, $L(x_1)$ 为光程差函数, $\psi_f(x_1, y_1)$ 为光纤的模斑半径, $\psi_{LD}(x_1, y_1)$ 为 LD 的模斑半径。

$$\begin{cases} \psi_f(x_1, y_1) = A_f \exp \left\{ - \left[\left(\frac{x_1}{w_f} \right)^2 + \left(\frac{y_1}{w_f} \right)^2 \right] \right\} \\ \psi_{LD}(x_1, y_1) = A_{LD} \exp \left\{ - \left[\left(\frac{x_1}{w_{0x}} \right)^2 + \left(\frac{y_1}{w_{0y}} \right)^2 \right] \right\} \end{cases} \quad (3)$$

式中, A_f 为光纤导模的振幅, A_{LD} 为半导体激光器出射光束的振幅, w_f 为光纤导模的束腰半径。铲形透镜光纤的轮廓曲面 $f_1(x, y)$ 需要满足以下条件: $x^2 + y^2 \leq r^2, z = z_0, 0 < y \leq b; f_2(x, y, z)$ 需要满足以下条件: $x^2 + y^2 \leq r^2, y = b + (z - z_0) \tan \theta, b < y \leq r$ 。其中, b 为光纤端面中所保留的部分, θ 为光纤的切割角度, $z_0 = (r - b) \times \cot \theta$ 。

在斜面上由于波面通过不同厚度的介质, 相位受到铲形光纤的调制, 相位因子为:

$$t(x, y) = \begin{cases} \exp[ik(n_1 - 1)[(r - b) \cot \theta - f_2(x, y, z)]] , (b < y \leq r) \\ \exp[ik(n_1 - 1)z_0] , (0 < y \leq b) \end{cases} \quad (4)$$

此时, 铲形光纤与 LD 的耦合效率可以改写为:

$$\eta_1 = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_f(x_1, y_1) \psi_{LD}(x_1, y_1) t(x, y) dx_1 dy_1 \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_f^2(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{LD}^2(x_1, y_1) dx_1 dy_1} \quad (5)$$

由(5)式可知, LD 的模场与光纤模场愈匹配, 相位因子越大, 耦合效率越高。

1.3 失容度的分析与讨论

在光纤耦合试验中, 光纤芯径只有 $8 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$, 很难保证激光束与光纤精确对准^[11]。如果激光束与光纤机械对准误差较大, 必将产生低阶模泄露, 进而引起耦合效率下降。在光纤与半导体激光器直接耦合系统中, 光纤 x 轴、 y 轴、 z 轴的失容差以及 x 轴、 y 轴的角向偏差位移会引起耦合效率的下降。当铲形光纤(或者激光芯片)绕 z 轴旋转 θ 时, 耦合效率也会出现变化。为了提高耦合效率, 下面分析一下耦合效率与各个因素的关系。

x 轴、 y 轴、 z 轴的失容差是指在 x 轴、 y 轴、 z 轴方向上光纤轴与光束中心轴所能存在的误差。计算中采用的半导体激光器, 波长 $\lambda = 808 \text{nm}$, 输出功率为 200mW , 束腰在 LD 的输出端面上; 铲形光纤的切割

深度为 $10\mu\text{m}$, 切割角度为 8° , $d_{\text{NA}} = 0.22$, 包层直径为 $125\mu\text{m}$, 芯径为 $62.5\mu\text{m}$ 的多模阶跃型光纤^[4]。

图2中的曲线是经优化后的结果, 随着 x 轴的失

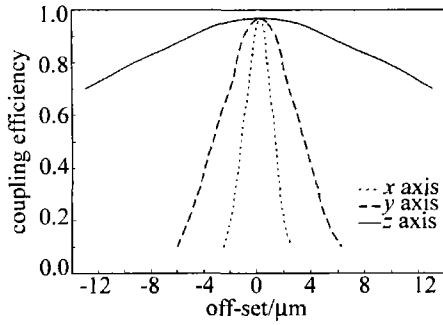


Fig. 2 Relationship of coupling efficiency and x, y, z axis off-set

容差增加, 耦合效率急剧下降, 失容差为 $1.3\mu\text{m}$ 时, 总体系统的耦合效率已经降到 10% 左右。把 3dB 的失容差定义为该方向上的失容度。 x 轴的失容度只有 $0.4\mu\text{m}$, y 轴的失容度为 $1.1\mu\text{m}$, 这对总体系统机械对准要求就很高, 为系统的固定安装带来困难; z 轴的失容度为 $12\mu\text{m}$, 比 x 轴、 y 轴的大一个数量级。

在铲形多模光纤与 LD 直接耦合系统中, 由于 LD 出射光束的不对称性, y 轴的远场发散角在多模光纤的数值孔径以内, 此时光纤端面面积成为影响耦合效率的主要因素。铲形光纤的接受面积比锥形光纤要大, 在 x 轴上通过斜面压缩光束的发散角, 使光束更好地耦合进光纤, 与锥形光纤相同。铲形光纤相当于两个正交柱透镜, 对激光光束进行整形和准直, 改变光束的模场和减小边缘光线的相位差, 可进一步提高耦合效率。

x 轴、 y 轴的角向位差是指激光束的光轴与光纤轴不在同一条直线上, 而是在 x 轴、 y 轴方向上存在一个夹角。由图3可知, 随着 x 轴、 y 轴的倾角增大, 耦合效率随之降低。 x 轴、 y 轴的倾角容忍度几乎相同。

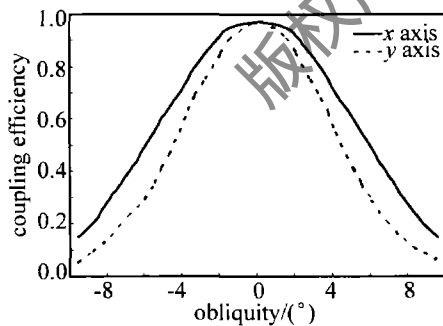


Fig. 3 Relationship of coupling efficiency and x, y obliquity

当光纤(或激光芯片)绕光纤轴旋转时, 耦合效率也会出现变化。由图4可知: 光纤绕轴旋转角度为 24° 时, 耦合效率下降了 3dB, 即光纤轴上旋转角度偏差容忍度较大, 要比 x 轴、 y 轴倾角大一个数量级。进一步的计算, 减小切割深度可以增大偏移容忍度, 但对增大倾角容忍度没有贡献。如果增大 LD 和透镜光纤

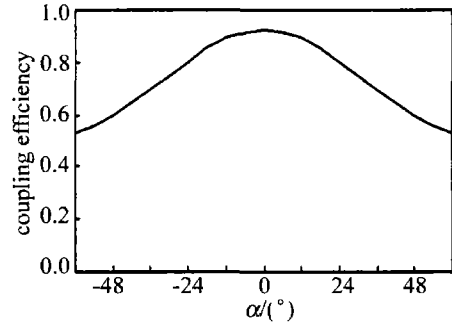


Fig. 4 Relationship curve of rotating angle α and coupling efficiency η 之间的距离, 虽然可以减小倾角容忍度, 但偏移容忍度几乎没有改变。切割角度的大小对倾角容忍度以及偏移容忍度大小的影响可忽略不计。

从图2、图3、图4可以看出, 为了提高机械对准度的容忍度, 往往是以牺牲耦合效率为代价的。在实际应用中, 需要高耦合效率、高强度的激光输出光束, 在安装和调试过程中, 要充分考虑到 x 轴、 y 轴方向上的失容度。

2 实验与讨论

试验中采用 C-Mount 封装的量子阱大功率半导体激光器 (AL808T200), 波长 $\lambda = (808 \pm 10)\text{nm}$, 输出功率为 200mW , 输出偏振模式为 TE; 铲形光纤由多模阶跃型光纤制作, 其切割深度为 $10\mu\text{m}$, 切割角度为 8° , 数值孔径为 0.275 ± 0.015 , 包层直径为 $125\mu\text{m}$, 芯径为 $62.5\mu\text{m}$ 。试验中激光器的实测输出功率为 173mW , $w_{0x} \approx 0.72\mu\text{m}$, $w_{0y} \approx 2.1\mu\text{m}$; 实测铲形光纤切割深度为 $9\mu\text{m}$ 和 $13\mu\text{m}$, 切割角度为 9.6° 和 5.7° 。测量耦合效率时, 可以先用功率计测出 LD 的总出射功率, 再将光纤与 LD 进行耦合。光纤和 LD 耦合时, 光纤固定在一个 5 维微调架上, 在显微镜的监视下调节 5 维微调架, 使得光功率计的输出最大, 将这一最大输出功率与总出射功率相比并计算出最大耦合效率。

由图5可知, 耦合距离越大, 耦合效率就越低。随着耦合距离的不断减小, 耦合效率逐渐提高, 且实验结果和理论值愈加吻合, 当耦合距离为 $6.3\mu\text{m}$ 时耦合效率达到最大值 78.5%。若耦合距离继续减小, 耦合效

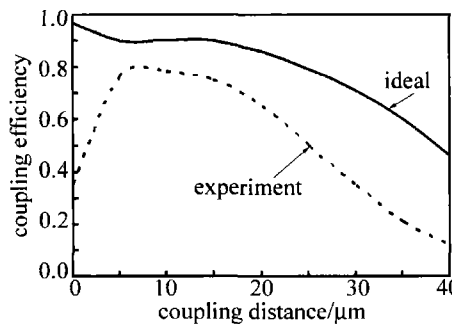


Fig. 5 Relationship of coupling distance and coupling efficiency

率开始迅速降低,其因为光纤端面对光的反射影响了LD输出功率及耦合效率。

3 结论

LD 出射光束与铲形光纤的相位和模场均匹配时,可以获得较高的耦合效率。铲形光纤通过斜面压缩 x 轴上的发散角,使波面更加弯曲进而使相位愈加匹配。实验的结果比理论值稍小,这主要因为光纤端面没有加镀增透膜而带来菲涅耳反射,以及实际切割角度和切割深度的不一致所引入的误差;另一个原因是实际LD输出光束的束腰不对称,光束为类高斯光束^[12]。当把这些原因考虑进去,理论计算值和实验结果相吻合。通过理论分析得到最优化的铲形光纤设计,从而有利于铲形光纤器件性能的改进,进而研制出高性能的铲形光纤器件,使铲形光纤得到更广泛地应用。

参考文献

- [1] WANG Zh Sh, WANG X Y, SUN J F. Current status of laser applications and its developing trend [J]. OME Information, 2007, 24(8): 26-33 (in Chinese).
- [2] CHEN Sh W, HAN Q, HU Ch X, *et al.* Two practical fiber coupling optical systems for high power fiber-coupled laser diodes module [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(12): 1572-1576 (in Chinese).

- [3] YU H Y, ZOU D Sh, CUI B F, *et al.* Micro-lenses fibers for semiconductor laser coupling [J]. Semiconductor Optoelectronic, 2005, 26(5): 400-405 (in Chinese).
- [4] LIN B, ZENG X D, AN Y Y, *et al.* Analysis on the laser diode-multi-mode fiber coupling efficiency [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 1200-1201 (in Chinese).
- [5] WANG Ch, FENG G Y, YANG H, *et al.* Calculating the coupling efficiency of the laser diode to the semi-tapered multimode fiber by ray-tracing method [J]. Laser Technology, 2008, 32(4): 434-437 (in Chinese).
- [6] WANG B H, JIANG M H, H Y L, *et al.* Improving coupling efficiency of optical fiber for high-power laser beam [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(2): 195-199 (in Chinese).
- [7] LEVI L. Applied optics a guide to optical system design [M]. New York: Wiley, 1980: 451-456.
- [8] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. 7th ed. London: Cambridge University Press, 1999: 752-754.
- [9] EDWARDS C A, PRESBY H M, DRAGONE C. Ideal micro-lenses for laser to fiber coupling [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(2): 252-257.
- [10] SAKAI J, KIMURA T. Design of a miniature lens for semiconductor laser to single-mode fiber coupling [J]. IEEE J Q E, 1980, QE16(10): 1059-1066.
- [11] WANG H X, XU Ch R. The Analysis of coupling properties between two tapered fibers [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2004, 10(4): 180-184 (in Chinese).
- [12] LI L N, WU J H, SONG J F. Far-field characteristics of high power laser diode [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2004, 25(1): 95-97 (in Chinese).

(上接第 356 页)

参考文献

- [1] CHEN W Ch. Study on vector solitons in fibers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008(9): 31-37 (in Chinese).
- [2] RAND D, GLESK I, BRES C S, *et al.* Observation of temporal vector soliton propagation and collision in birefringent fiber [J]. Phys Rev Lett, 2007, 98(5): 053902/1-053902/4.
- [3] YE F, KARTASHOV Y K, TORNER L. Vector soliton fission by reflection at nonlinear interfaces [J]. Opt Lett, 2007, 32(4): 394-396.
- [4] CUNDIFF S T, COLLINGS B C, AKHMEDIEV N N, *et al.* Observation of polarization-locked vector solitons in an optical fiber [J]. Phys Rev Lett, 1999, 82(20): 3988-3991.
- [5] CUNDIFF S T, COLLINGS B C, BERGMAN K. Polarization locked vector solitons and axis instability in optical fiber [J]. Chaos, 2000, 10(3): 613-624.
- [6] CHEN W Ch, XU W C, SONG F, *et al.* Vector solitons in femtosecond fibre lasers [J]. European Physical Journal, 2008, D48(2): 255-260.

- [7] WU J, TANG D Y, ZHAO L M, *et al.* Soliton polarization dynamics in fiber lasers passively mode-locked by the nonlinear polarization rotation technique [J]. Phys Rev, 2006, E74(4): 046605.
- [8] ZHAO L M, TANG D Y, ZHAO B. Period-doubling and quadrupling of bound solitons in a passively mode-locked fiber laser [J]. Opt Commun, 2005, 252(4): 167-172.
- [9] ZHANG S M, LÜ F Y, GONG Y D, *et al.* Different operation states of soliton pulses in an erbium-doped fibre ring laser [J]. Chinese Physics, 2007, 16(7): 1986-1990.
- [10] CAO L, YANG L Zh, GUO X Y, *et al.* Experimental study Er^{3+} -doped fiber laser based on the nonlinear optical loop mirror [J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 613-619 (in Chinese).
- [11] YANG L Zh, WANG Y C, CHEN G F, *et al.* Generation of ultrashort pulse at 1053nm from fiber laser [J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 610-612 (in Chinese).
- [12] ZHANG S M, LU F Y, WANG J. Self-Q-switching and mode-locking in an all-fiber Er/Yb co-doped fiber ring laser [J]. Opt Commun, 2006, 263(1): 47-51.