

3150
李江
廖延彪

860918
成都电讯工程学院应用物理系
清华大学无线电系

科学出版社
860926
861014

用腐蚀熔融法制造单模激光二极管与单模光纤相耦合的半球微透镜

陆善达

金志良

(上海科学技术大学)

(中国科学院上海光机所)

Etched and fused hemispherical microlenses for coupling single-mode laser into single-mode fiber

Lu Shanda

(Shanghai University of Science and Technology, Shanghai)

Jin Zhiliang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: The contour lines of the coupling efficiency of hemispherical microlenses determined by parameters of single-mode laser and single-mode fiber are calculated. The method for etched and fused fabrication on the single-mode fiber end is described. Experimental results for hemispherical lenses are in good agreement with the theory, and 70% of the optimum theoretical value has been obtained.

一、引言

近年来由于单模光纤研究的极大成功,促进了单模光纤通信系统和单模光纤应用技术的迅速发展。单模光纤的实际损耗已降到接近理论值,因此为进一步改善单模光纤传输系统的信噪比,提高激光二极管与光纤的耦合效率就显得十分重要。激光二极管和单模光纤的耦合机构有多种形式^[1-3],而以光纤端面直接制造微透镜对以后的耦合封装最为有利。

根据基模耦合理论,我们计算了由表1所示的扩铍平面条形激光二极管和单模光纤参数所确定的耦合效率等高线。在单模光纤始端我们用腐蚀和熔融相结合的方法,直接制造微透镜。

二、理论分析

1. 最佳理论耦合效率

一个单纵模(波数 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$)和单横模(高斯型基

模)工作的半导体激光二极管与一根带有半球微透镜的单模光纤相耦合,如图1所示。假定二极管输出面(x_1, y_1)上平行和垂直于结平面的光腰半径分别为 w_{0x}, w_{0y} ; 光纤输入面(x_2, y_2)处 LP_{01} 模的光斑半径为 w_0 , 截止波长为 λ_c , 光纤芯折射率为 n_c ; 半球透镜曲率半径为 r_L , 折射率 $n_L \approx n_c$ 。若调节到最佳耦合, d 和 φ 应分别等于零, z_1 与 z_2 可用同一个 z 来代替。则在近轴近似条件下, 激光基模功率转换成

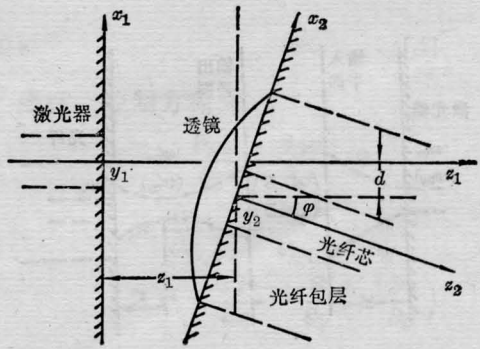


图1 半导体激光器与单模光纤的耦合

光纤基模功率的耦合效率^[2]为

$$\eta = \eta(x) \cdot \eta(y) \quad (1)$$

式中

$$\eta(x) = \frac{2}{w_{0f} \cdot w_x} \times \frac{1}{\left\{ \left[\frac{1}{w_x^2} + \frac{1}{w_{0f}^2} \right]^2 + \left[\frac{k}{2R_x} - \frac{(n_L - 1)k}{2r_L} \right]^2 \right\}^{1/2}} \quad (2)$$

而 w_x, R_x 分别为光纤输入端面上 x 方向的激光束半径和波阵面曲率半径, 表达式为

$$w_x = \frac{[4(z)^2 + (kw_{0x}^2)^2]^{1/2}}{kw_{0x}} \quad (3)$$

$$R_x = \frac{4(z)^2 + (kw_{0x}^2)^2}{4z} \quad (4)$$

若将 (2)、(3)、(4) 中的脚标 x 换成 y 即得 $\eta(y)$ 、 w_y 和 R_y 的表达式。

当 $n_L = 1$ 或 $r_L = \infty$ (对应于平端) 时, 利用 (3)、(4), 由 (2) 得到

$$\eta(x) = \frac{2}{\left(\frac{w_{0x}}{w_{0f}} + \frac{w_{0f}}{w_{0x}} \right) \left\{ 1 + \left[\frac{2z}{k(w_{0x}^2 + w_{0f}^2)} \right]^2 \right\}^{1/2}} = \frac{2w_{0f}w_{0x}}{[w_{0f}^2 + w_{0x}^2]^2 + \left(\frac{2z}{k} \right)^2]^{1/2}} \quad (5)$$

此式与类似形式的 $\eta(y)$ 表达式可以用来讨论均匀介质中的耦合效率。

虽然耦合机构有多种形式, 但一般总可以归结为激光二极管的高斯光束经过一个用系统矩阵 $ABCD$ 表征的光学系统的理想转换, 耦合到单模光纤中。若光学系统输出平面与光纤输入端面间的介质的折射率 $n = n_c$, 变换后光腰半径为 w'_{0x} 和 w'_{0y} , 如图 2 所示, 那么只要将 (5) 中的 w_{0x} 、 z 和 k 分别用 w'_{0x} 、 z' 和 $n_c \cdot k$ 代替 (以相似的变换得到 y 分量), 则耦合效率

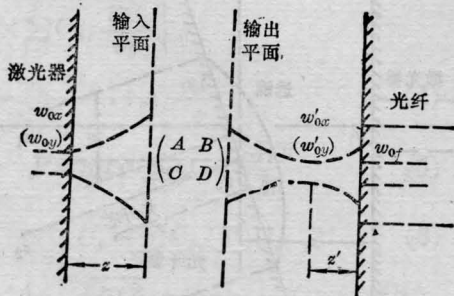


图 2 激光束经一光学系统与单模光纤相耦合

$$\eta = \eta(x) \cdot \eta(y)$$

$$= \frac{4w_{0f}^2 w'_{0x} w'_{0y}}{\left\{ \left[(w_{0f}^2 + w_{0x}^2)^2 + \left(\frac{\lambda}{\pi n_c} z' \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \times \left[(w_{0f}^2 + w_{0y}^2)^2 + \left(\frac{\lambda}{\pi n_c} z' \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (6)$$

此式与文献 [4] 相一致。

采用旋转对称的光学转换系统, 则

$$\frac{w'_{0y}}{w'_{0x}} = \varepsilon = \frac{w_{0y}}{w_{0x}} \quad (7)$$

式中 ε 称为激光斑的椭圆率。若光学系统能使 $z' = 0$, $w_{0f} = \sqrt{w'_{0x} w'_{0y}}$, 则由 (6)、(7) 马上得到转换后最佳的理论耦合效率

$$\eta_{opt} = \frac{4\varepsilon}{(\varepsilon + 1)^2} \quad (8)$$

2. 基模耦合效率等高线

对表 1 给定的激光二极管和光纤参数, 我们根据 (1) 采用格点搜索法, 用计算机计算耦合效率 $\eta(z, r_L)$ 的等高线, 如图 3 所示。最大耦合效率 η_{max} 为 22%, 图中以 x 表出, 与由 (8) 计算得到的 η_{opt} 相一致。图中从 x 点往外耦合效率不断降低, 左下方等高线间距变小。

表 1

激光二极管中心波长	λ_0	828.5 nm
激光斑半径	w_{0x}	4.0 μm
	w_{0y}	0.25 μm
椭圆率	ε	0.0625
光纤模斑半径	w_{0f}	4.0 μm
光纤芯折射率	n_c	1.45
截止波长	λ_c	0.79 μm

由于我们使用的扩锌平面条形激光二极管为多纵模单横模工作的有像散的激光器, 而计算耦合效

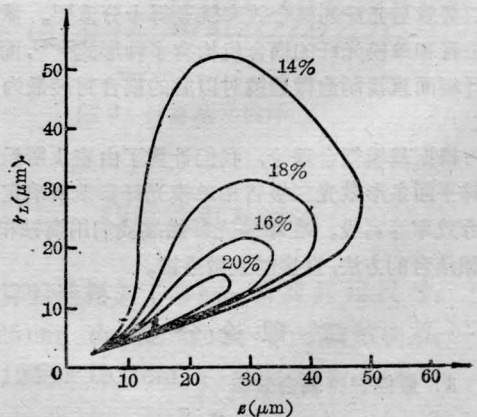


图 3 耦合效率等高线

率时 k 取与中心波长 λ_0 相应的值, 且没有考虑像散, 所以实际的耦合效率应比 (1)、(8) 计算出的低些。

三、实 验

将光纤始端浸入氢氟酸中, 待光纤外径腐蚀到一定尺寸后, 用水清洗后吹干, 然后放到光纤焊接机中, 通电将端面熔成半球状。图 4 为扫描电子显微镜摄得的外径 $d=50\mu\text{m}$ 所融成的半球微透镜照片。从照片中可见, 腐蚀后光纤表面有不少凹坑, 通电后利用熔融表面张力形成的微透镜表面却相当光滑。透镜表面的白点可能是由于光纤成份不均匀所致。

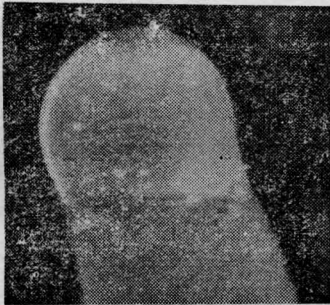


图 4

测试系统如图 5 所示。由于耦合光纤不长, 所以二端的包层有一部分需浸入折射率与包层相匹配的液体中, 以去除包层膜。耦合效率为光纤输出功率 P_1 与二极管输出总功率 P_0 之比, 即

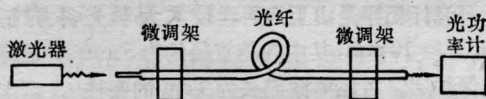


图 5 测试装置示意图

(上接第 703 页)

因为这两条是从布居数大得多的亚稳态 $4s[3/2]^0$, $J=2$ 激发而产生的。而由非亚稳态 $4s'$ 和 $4s[3/2]^0$, $J=1$ 激光产生的光电流信号就较弱。同理, C460 波段的 4 条谱线很弱, 也是初始能态 $4s'[1/2]^0$, $J=1$ 不是亚稳态所致。

本实验在空心灯的制备中得到李学丹副教授的帮助, 在此表示谢忱。

$$\eta = P_1/P_0 \quad (9)$$

实验中背景光极弱, 可以不考虑它对 η 的影响。实验结果如表 2。

表 2

根据腐蚀光纤直径推算的半球曲率半径	$r_L(\mu\text{m})$	35	25	15	10	∞
耦合效率	$\eta(\%)$	15.8	16.0	13.8	6.82	10.4

从图 3 可知 $r_L=10\mu\text{m}$ 虽然很靠近最佳理论耦合效率点, 但这一区域对 r_L 和 z 的精度要求较高, 如有几微米偏差, η 很快下降, 而根据我们的工艺条件和调整架精度, 极易发生此种情况。因此对于这一曲率半径, 我们的实验没有达到预定要求。对较大的 r_L 值, 由于 η 随 r_L 和 z 变化的容差范围较大, 实验结果和理论计算的等高线相应区域的耦合效率符合得很好, 并达到了最佳理论耦合效率的 70%。

感谢国平、许铭裕和谢治芬同志在光纤参数测试方面所给予的帮助。感谢上海光机所十四室提供实验激光二极管。

参 考 文 献

- [1] Giok-Djan Khoe *et al.*; *J. of Lightwave Technology*, 1984, **LT-2**, No. 3, 217.
- [2] G. K. Grau; "Optische Nachrichtentechnik 2. Auflage", Springer, Berlin, 1986, pp. 282~286.
- [3] Jun-Ichi Sakai *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1980, **QE-16**, No. 10, 1059.
- [4] Wolfgang Bludau *et al.*; *J. of Lightwave Technology*, 1985, **LT-3**, No. 2, 294.

(1986年9月18日收稿)

参 考 文 献

- [1] 冶金部科技情报产品标准研究所编; "光谱线波长表", 中国工业出版社, 1971, 620.
- [2] M. Maeda *et al.*; *Opt. Commun.*, 1981, **39**, No. 12, 64~69.

(浙江大学物理系 黄正东 沈俊锋
刘怡周 吴大元 陆杰
1986年10月31日收稿)