

文章编号: 100123806(2008)0420434203

## 用光线追迹法计算半锥形多模光纤的耦合效率

王 超, 冯国英\*, 杨 浩, 周 情, 李 玮, 苏 娟  
(四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

摘要: 为了计算半锥形多模光纤和半导体激光器的耦合效率, 并分析影响耦合效率的因素, 在考虑光线在锥面上多次反射、反射损耗、透射损耗以及波导的耦合条件的情况下, 采用改进后的光线追迹法计算了不同锥角或不同锥长、以及两者发生相对平移或倾斜的情况下, 无包层半锥形多模光纤和半导体激光器之间的耦合效率。模拟结果表明, 当半锥宽度取适当值时, 锥角对耦合效率的影响弱化了; 耦合效率对相对平移比较敏感, 而对相对倾斜有着很高的冗余度。这对实际工作中提高耦合效率具有指导意义。

关键词: 光纤光学; 耦合效率; 光线追迹; 半锥形多模光纤

中图分类号: TN253; TN248.4 文献标识码: A

### Calculating the coupling efficiency of the laser diode to the semitapered multimode fiber by raytracing method

WANG Chao, FENG Guoying, YANG Haq, ZHOU Qing, LI Wei, SU Juan

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract In order to analyze the factors which affect the coupling efficiency between LD and the semitapered multimode fiber, considering the multiple reflection on the tapered surface using improved raytracing algorithm, the coupling efficiency of LD to the semitapered multimode fiber without cladding was calculated in different cases separately, such as different semitapered angle or different semitapered width, or different relative shift and incline. The results indicated that when semitapered width value was appropriate, the influence of the tapered angle on the coupling efficiency was unobvious. The coupling efficiency was sensitive to the relative shift while it was inertial to the relative incline.

Key words fiber optics; coupling efficiency; raytracing; semitapered multimode fiber

### 引 言

半导体激光器在各个领域有着广泛的应用, 关于半导体激光器与光纤之间耦合的方法已有很多报道<sup>[1,2]</sup>。研究发现, 将多模光纤末端做成半锥后可以提高其与半导体激光器的直接耦合效率<sup>[4,5]</sup>。FENG 等人计算出两者最大耦合效率达到 99%, 并得出锥角会强烈影响耦合效率的结论<sup>[4]</sup>; LN 等人在考虑光线在锥面上一次反射的情况下计算了两者的耦合效率, 指出切割深度是影响耦合效率冗余度的主要因素<sup>[5]</sup>。在计算方法上, 传统的光线追迹法一般是事先计算出能够满足全反射条件的光线在光纤端面上所对应的区域, 再对该区域的光功率积分。这种方法在处理多次

反射或锥面本身不规则时, 求解能满足全反射条件的积分区域将变得极为困难。本文中对传统光线追迹的算法进行了改进, 改进后的算法不仅适用于大入射角光线在锥面上多次反射的情况, 还适用于锥面不规则的情况。作者利用该方法在考虑锥面的多次反射的情况下, 计算了半导体激光器与去包层的半锥形多模光纤的耦合效率, 并利用该方法模拟了锥角、半锥宽度、相对平移和相对倾斜<sup>[6]</sup>对耦合效率的影响。这对实际工作中提高耦合效率具有指导意义。

### 1 半锥形光纤

半导体激光器发出的光束在远场是一细长椭圆, 在垂直于结方向上的大发散角给光纤与半导体激光器的耦合带来了困难。为了提高直接耦合的效率, 可将光纤在 y 方向磨制成半锥<sup>[5,7]</sup>, 此外, 将光纤要做锥部分的包层剥去, 使纤芯 (折射率  $n_1$ ) 直接与空气 (折射率  $n_0 = 1$ ) 接触, 此时全反射角满足:

$$\arcsin(1/n_1) < \arcsin(n_2/n_1) \quad (1)$$

这样大入射角的光线更容易在锥面发生全反射, 从而

基金项目: 固体激光技术国家级重点实验室基金资助项目 (LF06005)

作者简介: 王 超 (1979), 女, 硕士研究生, 主要从事激光与光纤通信方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: guoying\_feng@yahoo.com.cn

收稿日期: 2007204202; 收到修改稿日期: 2007208229

降低反射损耗。

在选取半锥宽度时, 必须使得锥的端面能接受 90% 以上的光能量; 在选取锥角时, 应使得入射角刚好大于数值孔径角的光线能在锥面上反射, 故锥角不能

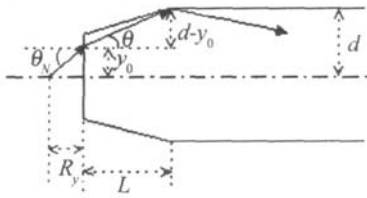


Fig 1 Schematic of semi-tapered fiber

太大。由图 1 中的几何关系知:

$$A_{\max} = \arctan \left\{ \frac{(d - b) \tan[\arcsin(NA/n_1)]}{d - R_y \tan H_A} \right\} \quad (2)$$

式中,  $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$  为数值孔径,  $H_A, y_0$  分别为数值孔径角和它对应的离轴距离,  $L, d, b$  分别为锥长、纤芯半径、锥面半宽度,  $R_y$  为曲率半径。选取锥角等于或小于  $A_{\max}$ , 均可得到较好的耦合效果。

## 2 耦合效率的分析计算

半导体激光器发出的光束强度分布<sup>[829]</sup>:

$$I(x, y, z) = A_0^2 \left[ \frac{w_0}{w_x(z)} \right] \exp \left\{ -2 \left[ \frac{x}{w_x(z)} \right]^2 \right\} \left[ \frac{w_0}{w_y(z)} \right] \exp \left\{ -2 \left[ \frac{y}{w_y(z)} \right]^2 \right\} \quad (3)$$

式中,  $A_0$  为高斯光束的振幅,  $w_x, w_y$  分别为  $x, y$  方向上高斯光束的光斑半径。耦合效率表示为:

$$G = (P_1 + P_2) P_0 \quad (4)$$

式中,  $P_0$  为激光器发出的总功率,  $P_1$  为不经过锥面反射直接耦合进光纤的光功率,  $P_2$  为经过锥面若干次反射后耦合进光纤的光功率。

$$P_0 = A_0 \int_0^b \int_0^d \exp \left[ -2 \left( \frac{x}{w_x} \right)^2 \right] \exp \left[ -2 \left( \frac{y}{w_y} \right)^2 \right] dx dy \quad (5)$$

### 2.1 直接耦合进入光纤的功率 $P_1$

把激光器输出激光的波面近似成曲率半径为  $R(z + \Delta z)$  的球面, 通过曲率中心和球面上每一点的连线为该点的波矢方向, 如图 2a 所示。图中有如下几何关系:

$$\tan H = y / [R_y(z + \Delta z) - \Delta z] \quad (6)$$

$$\Delta z = R(z + \Delta z) - \sqrt{R^2(z + \Delta z) - y^2} \quad (7)$$

对  $\Delta z$  赋初值,  $\Delta z = \sqrt{R^2(z + \Delta z) - y^2} - R(z + \Delta z)$ , 对  $R(z + \Delta z) = (z + \Delta z) \{ 1 + [Pw_{0y}^2 / (K(z + \Delta z))]^2 \}$  和 (7) 式进行数次迭代, 最后由 (6) 式得到当远场发散角为  $40^\circ$  时, 不同耦合距离处入射角与离轴距离的关系, 如图 2b 所示。只有入射角  $H < \arcsin(NA)$  的光线, 才能在纤芯包层界面上发生全反射而稳定传输, 根据 (6) 式得积式中,

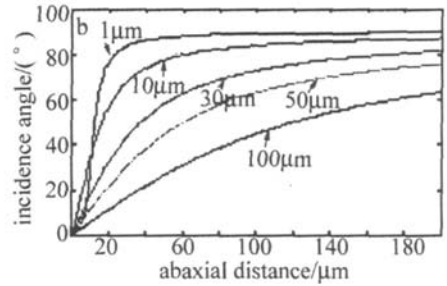
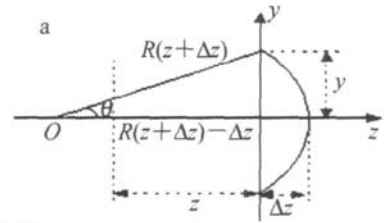


Fig 2 Sketch and calculated results of incidence angle of input ray versus of axial distance at front face of fiber

分上限:  $x_0 = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} R_y(z + \Delta z), y_0 = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} R_y(z + \Delta z)$ 。

$$P_1 = 4A_0 \int_0^b \int_0^d \frac{w_0}{w_x} \frac{w_0}{w_y} \exp \left\{ -2 \left[ \left( \frac{x}{w_x} \right)^2 + \left( \frac{y}{w_y} \right)^2 \right] \right\} T(x, y) dx dy \quad (8)$$

$T(x, y)$  为透过率, 可以由菲涅耳公式求得。

### 2.2 用光线追迹法计算经过多次反射耦合进入光纤的功率 $P_2$

建立如图 3 所示的直角坐标系, 把锥面在  $y$  方向

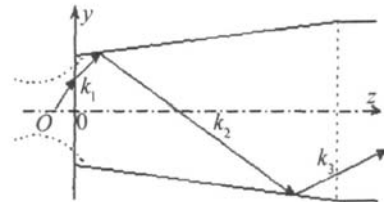


Fig 3 ray tracing diagram

区间  $[y_0, b]$  等分成  $N$  个小区间, 每一小区间  $[y, y + \Delta y]$

对应一条光线, 其光强用  $\int_0^d \frac{w_0}{w_y} \exp \left[ -2 \left( \frac{y}{w_y} \right)^2 \right]$  表示, 其

入射角可用 (6) 式表示。该光线经光纤端面折射进入锥形光纤后, 以折射角对应的斜率向前传播, 当碰到上、下锥面发生反射时, 斜率  $k_i (i = 1, 2, 3, \dots)$  随之发生相应的改变, 然后以新的斜率继续向前传播, 再次碰到锥面时继续反射, 以此类推。如果该光线出锥后与中心轴线的夹角小于  $\arccos(n_2/n_1)$ , 则该光线可以耦合进入光纤, 把该区域对应的光功率加入  $P_2 (T(y) = 1)$ , 否则,  $T(y) = Q$  反射率  $R(y)$  为每次反射率的乘积, 若发生全反射则  $R_i(y) = 1$ , 否则用菲涅耳公式求出反射率。  $P_2$  可表示如下:

$$P_2 = 2 \int_0^b \int_0^d \frac{w_0}{w_y} \exp \left[ -2 \left( \frac{y}{w_y} \right)^2 \right] R(y) T(y) dy \quad (9)$$

$$Q \int_0^{x_0} \sqrt{I_0} \frac{W_{0k}}{W_x} \exp\left[-2\frac{x^2}{w_x^2}\right] T(x) dx \quad (9)$$

### 3 数值计算结果及讨论

下面数值计算采用的参量为: 半导体激光器波长为 780nm, 其远场发散角分别为 10b和 40b, 光纤纤芯半径为 50Lm, 纤芯、包层折射率分别为 1.53, 1.52。在半锥宽度为 28Lm、锥角为 0.055rad时, 计算结果表明: 最大耦合效率为 82%, 并且耦合距离在 50Lm以内, 耦合效率没有明显下降。

#### 3.1 半锥形光纤前端面上能够进入光纤部分的光强分布

为了能直观地看出半锥形光纤在提高耦合效率上的优越性, 在锥角 a = 0.04rad, 半宽 b = 28Lm, 耦合距离为 28Lm的情况下模拟了半锥前端面上最终能耦合进光纤的光强分布 (y 方向), 如图 4 所示。由图中可

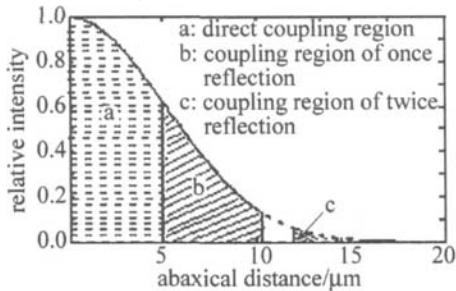


Fig 4 Effectual intensity distribution on the front ends of taper

见, 当光纤没有做成锥形时, 只有在  $y < 5Lm$  的区域内的光线可以耦合进光纤; 当光纤做成半锥后,  $y$  方向上 5Lm~ 10Lm 区域内的光线通过一次反射从而耦合进光纤; 12Lm~ 15Lm 区域内的光线通过两次反射耦合进入了光纤; 可见, 光纤末端做锥后, 使得能耦合进光纤的光强分布区域增大了。

#### 3.2 半锥宽度、锥角、相对平移及倾斜对耦合效率的影响

根据第 2 节中的计算方法, 计算了锥角 a = 0.04rad, 锥的半宽 b 取不同值时, 耦合效率随耦合距离变化的曲线, 如图 5a 所示。由图中可见: 在锥角一定的情况下, 半锥宽度越大, 能保持较大耦合效率的的耦合距离越长。故半锥宽度是影响耦合距离冗余度的主要因素。

锥的半宽 b = 20Lm, 锥角取不同值时, 耦合效率随耦合距离变化的曲线, 如图 5b 所示。从图中可见: 当半锥宽度为 20Lm 时, 半锥角在 0.02rad~ 0.08rad 之间任意取值时, 耦合效率几乎均可达到 82%, 在一定范围内锥角对耦合效率的影响不大。

图 5c 是锥的半宽为 28Lm, 锥角为 0.055rad, 相对平移取不同值时, 耦合效率随耦合距离的曲线。从图中可以看出,

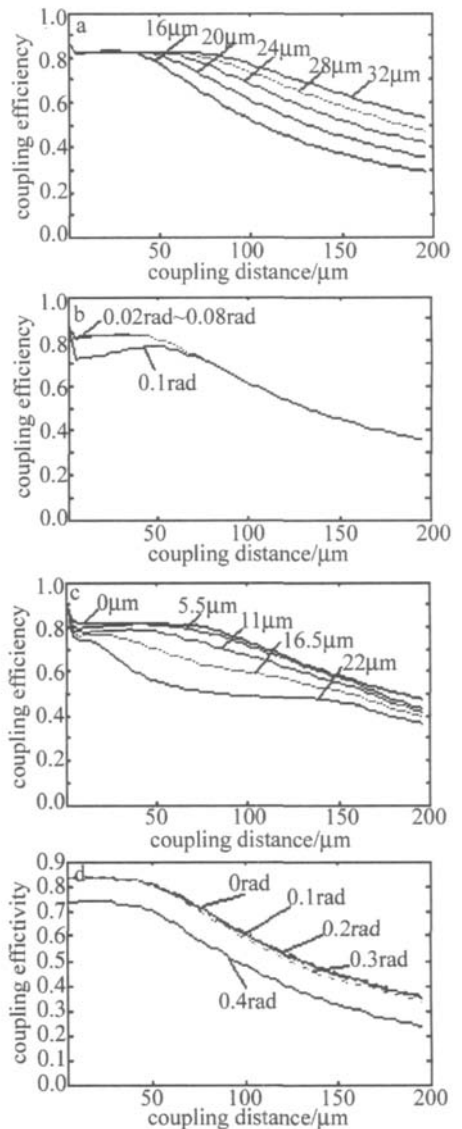


Fig 5 Effect of semi-tapered width, tapered angle, relative parallel move and incline on coupling efficiency

a) effect of semi-tapered width b) effect of tapered angle c) effect of relative parallel moving d) effect of relative incline

随着平移量的增大, 耦合效率下降比较明显。且耦合效率对相对平移的影响极为敏感, 其冗余度只有 5.5Lm。

半锥宽度 b = 28Lm, 锥角 a = 0.055rad, 相对倾斜角取不同值时, 耦合效率随耦合距离变化的曲线, 如图 5d 所示。从图上可见, 当两者相对倾斜角小于 0.3rad 时, 相对倾斜对耦合效率的影响不大, 可见无包层的半锥形多模光纤在一定程度上可以补偿相对倾斜造成的耦合效率的下降, 使得相对倾斜的冗余度较大 (0.3rad)。

### 4 结 论

采用改进了的光纤追迹数值计算方法, 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。结果表

(下转第 440 页)

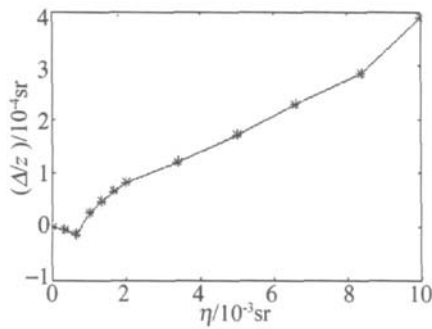


Fig 7 The related test curve between the ratio  $S/z$  and the deflection of the incident divergent sphere Gaussian wave

力。球面波入射光束经过锥镜产生的无衍射光束的光轴的稳定性比平面波的稳定得多。

发散球面高斯波入射光束的偏向的实际影响比理论的大,这是由于所用的激光束是近似的高斯波且实际锥镜不是绝对的薄锥镜。

### 3 结 论

球面波入射光束经过锥镜产生的无衍射光束的光轴受球面波入射光束的偏向影响比受平面波的偏向的影响更小。这说明无衍射光束球面波入射光束的偏心和偏向具有很好的定轴能力。球面波入射光束经过锥镜产生的无衍射光束的光轴更加稳定。

综上所述,锥镜对球面高斯波入射光束具有很好

的包容能力,所以球面波入射光束经过锥镜产生的无衍射光束的光轴适于作长、中或短距离连续空间直线度误差测量的基准。

### 参 考 文 献

- [1] ZHAO B, LI Zh. Influence of eccentricity of wave front to diffraction of axicon [J]. Applied Laser, 1997, 17(6): 2472250 (in Chinese).
  - [2] ZHAO B, LI Zh. Diffraction property of an axicon in oblique illumination [J]. Applied Optics, Optical Technology and Biomedical Optics, 1998, 37(13): 25632567.
  - [3] ZHANG X B, ZHAO B, LI Zh. Measurement method of spatial straightness error using non-diffracting beam and Moiré fringe technology [J]. Journal of Optics, 2004, A6(1): 1212126.
  - [4] SCOTT G, MCARDLE N. Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon [J]. Opt Engng, 1992, 31(12): 264022643.
  - [5] PEREZ M V. Diffraction patterns and zone plates produced by thin linear axicons [J]. Journal of Modern Optics, 1986, 33(9): 116121176.
  - [6] ZHANG X B, ZHAO B, LI Zh. A collimating tracking and positioning laser system with non-diffracting beams and Moiré fringe technology [J]. Laser Technology, 2001, 25(2): 1182121 (in Chinese).
  - [7] ZHANG X B, LI Zh. A coaxial measuring system for a hole using non-diffracting beam [J]. Laser Technology, 2004, 28(1): 1662169 (in Chinese).
  - [8] LEVILL. Applied optics: a guide to optical system design [M]. New York: Wiley, 1980: 4512456.
  - [9] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. 2nd ed. New York: Pergamon, 1964: 7522754.
- 
- (上接第 436 页)
- 明,在考虑多次反射情况下,一定范围内锥角对耦合效率的影响相对较小;半锥宽度是影响耦合效率冗余度的主要因素;耦合效率对相对平移比较敏感,但对相对倾斜具有较高的冗余度。
- 参 考 文 献
- [1] ZHAO Y, LI P Sh, PU Zh B. Analysis on the coupling efficiency between semiconductor laser diode and single-mode fibers [J]. Optical Technique, 1999, 25(6): 7210 (in Chinese).
  - [2] WU H D, BAMES F S. Microlenses coupling light to optical fiber [M]. New York: IEEE Press, 1991: 49251.
  - [3] RUSSO V, RIGHI N I G C, SOTTINI S, et al. Lens-end fibers for medical applications: a new fabrication technique [J]. Appl Opt, 1984, 23(19): 327723278.
  - [4] FENG Zh J, ZENG X D, AN Y Y. An analysis of the coupling efficiency of the laser diode to the semi-tapered multimode fiber [J]. Journal of Xidian University, 2002, 29(6): 7602763 (in Chinese).
  - [5] LIN B, ZENG X D, AN Y Y. Analysis on the Laser diode multimode fiber coupling efficiency [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 120021203 (in Chinese).
  - [6] TAN X D, REN G, CAI B W, et al. Theoretical and experimental study on coupling efficiency of LD at different fiber inclined surface [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 59261 (in Chinese).
  - [7] LI P, ZHANG Q, SHENG Sh Zh, et al. Coupling efficiency research of diode laser coupled to a cylindrical lensed multimode fiber [J]. Optical Instruments, 2006, 28(3): 52255 (in Chinese).
  - [8] LB BD. Laser optics [M]. 2nd ed. Chengdu: Sichuan University Press, 1992: 60271 (in Chinese).
  - [9] LI W J, YANG A F, WANG Sh Y, et al. Study of space coupling technology of fiber bundle coupling LD output beams [J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 3042307 (in Chinese).