

# 尖锥端光纤和半导体激光器的耦合

韦朝炅 查开德 王新宏

(清华大学电子工程系 北京 100084)

**提要** 介绍了一种低反射高效率的尖锥端光纤和半导体激光器的耦合技术。应用模式耦合理论分析表明,这种尖锥端光纤的耦合效率可接近 90%,锥端反射损耗大于 60 dB。因此,这种耦合技术既可以提高 LD 和光纤的耦合效率,又可以大大降低耦合反射对 DFB 等激光器的影响。简单介绍了这种尖锥端光纤的制造技术,通过精密的磨抛加工,即可获得理想的尖锥端。用自行加工制备的尖锥端光纤与 DFB 半导体激光器耦合,实际测量的耦合效率最大达 73.9%,反射损耗优于 50 dB。

**关键词** 尖锥端光纤,高效率,低反射,模式耦合理论

## 1 引言

光纤和半导体激光器耦合是光纤通信系统中获得高性能光源的重要技术之一。耦合技术的进步,直接影响光纤通信系统的性能。光纤和 LD 耦合发展过程大致是:LD 和平端光纤→透镜+平端光纤→球端光纤(微透镜光纤)→自聚焦透镜+光隔离器+光纤→双曲线端光纤和尖锥端光纤。这个过程是为了获得性能更好的光纤通信系统用光源。总起来说,一个优秀的耦合应该是效率高,获得尽可能大的出纤功率,以有利于扩展系统的传输距离和提高系统的信噪比;反射小,尽可能减少耦合反射光对半导体激光器工作特性的影响。因为即使很小的反射,也将影响激光器振荡频率的稳定性,影响激光谱线宽度、动态响应及功率起伏而产生的强度噪声<sup>[1-3]</sup>。下面首先用模式耦合理论来分析尖锥端光纤头的耦合效率及反射损耗,然后介绍光纤头的工艺加工过程及测量的实验装置,最后比较理论和实测的结果。

## 2 理论模型

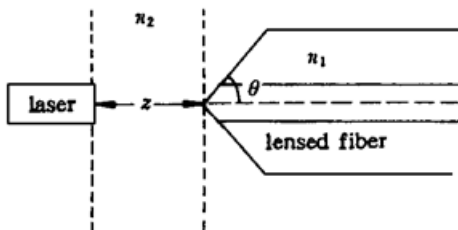


图 1 用于计算的模式耦合理论模型简图  
Fig. 1 Geometry for the calculation, showing the location of the laser and the microlens

为了设计出最佳角度的尖锥端光纤,我们应用一个模式耦合理论模型来计算半导体激光器和尖锥端光纤的耦合效率及反射损耗。这个模型由以下几个部分组成:(1) 半导体激光器和光纤中模场的高斯模近似;(2) 高斯模的传输规律;(3) 尖锥端光纤的模场相位传输因子;(4) 用来计算耦合效率和反射损耗的模式匹配公式。

如上面所说, 假设光纤和 LD( 半导体激光器) 的模场为高斯模场, 这是基于电磁场理论推得单模光纤和 LD 的模场很接近于高斯模场分布而得的。通常 LD 的模场为椭圆形, 则其在出射窗口处的横向场分布可表示为

$$\psi_l(x, y) = A_l e^{-\left[ \left( \frac{x}{w_{ox}} \right)^2 + \left( \frac{y}{w_{oy}} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

其中  $x$  轴和 LD 的结平面平行,  $A_l$  为场振幅,  $w_{ox}$  和  $w_{oy}$  分别为 LD 在  $x$  和  $y$  方向的模半径, 并假定高斯光束的束腰在 LD 的出射端面处。另外光纤中模场为圆形, 则其横向场分布可表示为

$$\psi_f(x, y) = A_f e^{-\left[ \left( \frac{x}{w_f} \right)^2 + \left( \frac{y}{w_f} \right)^2 \right]} \quad (2)$$

其中  $A_f$  为场振幅,  $w_f$  为光纤中的模半径。

利用高斯模的传输规律, 我们可以得到经过一段距离  $z$  之后的 LD 模场分布。其表达式为<sup>[4]</sup>

$$\psi_{lz}(x, y, z) = \frac{A_l (w_{ox} w_{oy})^{1/2}}{[w_x(z) w_y(z)]^{1/2}} e^{-\left[ \left( \frac{x}{w_x(z)} \right)^2 + \left( \frac{y}{w_y(z)} \right)^2 \right]} e^{-ik \left[ \frac{x^2}{2R_x(z)} + \frac{y^2}{2R_y(z)} \right]} e^{-ikz} e^{i \left[ \frac{\phi_x(z) + \phi_y(z)}{2} \right]} \quad (3)$$

$$w_x(z) = w_{ox} \sqrt{1 + \left[ \frac{z}{Z_{ox}} \right]^2} \quad (4)$$

$$Z_{ox} = \frac{\pi w_{ox}^2}{\lambda} \quad (5)$$

$$R_x(z) = z + \frac{Z_{ox}^2}{z} \quad (6)$$

$$\phi_x(z) = \text{tg}^{-1} \left[ \frac{z}{Z_{ox}} \right] \quad (7)$$

其中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $w_x(z)$  和  $R_x(z)$  分别为波前在  $x$  轴方向的模半径和曲率半径, 以  $y$  代替  $x$  则可得  $w_y(z)$ ,  $Z_{oy}$ ,  $R_y(z)$  和  $\phi_y(z)$  的表达式。

光纤头处的尖锥相当于在光纤端面上加了一个微透镜, 起到一个传输因子的作用。本文就是利用这个传输因子来使 LD 的光场和光纤中的传输光场达成匹配。考虑到光纤中纤芯和包层的折射率相差很小, 故可用同一个折射率来表示它们, 在此前提下可得尖锥光纤头的传输因子为

$$\psi_\phi(x, y, z) = e^{ik(n_1 - n_2) \sqrt{x^2 + y^2} \text{ctg}(\theta)} \quad (8)$$

其中  $\theta$  为半锥角,  $n_1$  和  $n_2$  分别为光纤和空气中的折射率(见图 1)。式(8)反映出  $\theta$  因子在匹配过程中的重要性。

最后利用模场匹配公式, 对光纤中的模场  $\psi_f$  和经过距离  $z$  及传输因子变换后的模场  $\psi_l = \psi_{lz} \psi_\phi$  进行计算, 可得两模场间的匹配系数, 而此匹配系数即为 LD 到光纤的耦合效率  $\eta_c$ <sup>[4]</sup>, 故有

$$\eta_c = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_f \psi_{lz}^* \psi_\phi^* dA \right|^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \psi_f \psi_f^* dA \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{lz} \psi_{lz}^* dA} \quad (9)$$

通过改变轴向距离  $z$  和半锥角  $\theta$ , 我们可以获得最大耦合效率。当然, 最大耦合效率的大小是和 LD 的模半径、光纤的模半径及 LD 的波长相关的。

当我们来计算尖锥端光纤头的反射损耗时, 只需对入射光场和反射光场进行模场匹配计算即可。而反射光场是入射光场经尖锥头的传输因子变换得来的。此时, 由于反射光和入射光

方向相反,且经光锥头有来回两次传输变换,故尖锥头的传输因子就变为

$$\Psi_{\phi}(x, y, z) = e^{-2ik(n_1 - n_2)\sqrt{x^2 + y^2} \operatorname{ctg}(\theta)} \quad (10)$$

利用模场匹配公式计算入射光场  $\Psi_{iz}$  和反射光场  $\Psi_r = \Psi_{iz}\Psi_{\phi}$  的匹配,并计入菲涅耳反射  $R$ ,可得反馈率  $\eta_r$ <sup>[4]</sup>

$$\eta_r = \frac{R \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_{iz} \Psi_{iz}^* \Psi_{\phi}^* dA \right|^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_{iz} \Psi_{iz}^* dA \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_r \Psi_r^* dA} \quad (11)$$

同样改变轴向距离  $z$  和半锥角  $\theta$  可以减小反馈率(即加大了反馈损耗)。

此理论模型同样适合于计算其它形状的微透镜光纤(如球形、拉锥形及双曲面形等)。需指出此理论模型中耦合效率的计算忽略了微透镜端面处的菲涅耳反射,故计算结果要比实测值偏大。

### 3 制作尖锥端光纤头的新技术

通过改造一个“迷你”钻,使装在光纤盒中的光纤随“迷你”钻一起旋转,而在光纤的另一头

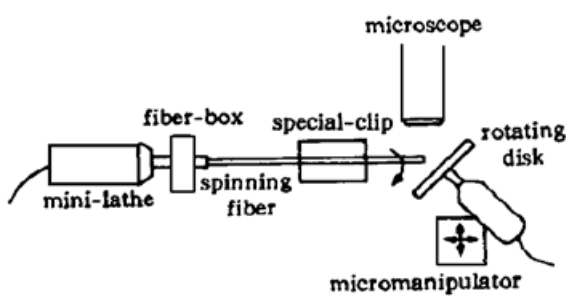


图 2 磨抛法加工尖锥光纤头简图

Fig. 2 Diagram of the fiber micromaching setup

有一个高速旋转的精细砂盘,则旋转的光纤头在旋转的砂盘上就会形成一个尖锥。为了确保光纤头的质量,整个加工过程都是在显微镜下进行的,加工简图见图 2。

为了得到一个高质量的光纤头(见图 3 所示),我们设计了一个特别的装置(图 2 中的 special clip)来保证光纤旋转时无抖动。这种加工方法也可用来制作别的微透镜(如楔形光纤头)。尽管光纤头的加工过程是手工操作的,但它易于改造成自动控制加工方式,这是此法的潜力之一。虽然有人用化学腐蚀法<sup>[5]</sup>加工出了尖锥端光纤头,但是它的加工过程中会用到有毒溶剂,对人体有害,且加工时间长。

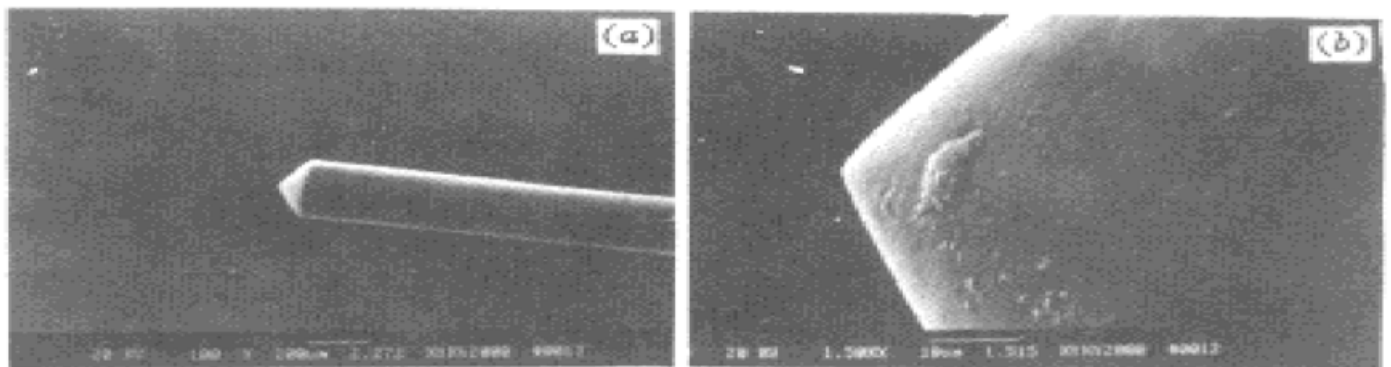


图 3 用扫描电镜拍摄的尖锥端光纤头照片,(a)的放大倍率为 100 倍,(b)的为 1500 倍

Fig. 3 Scanning electron photomicrographs of a conical microlens on the end of a single-mode fiber with a magnifying power of 100× (a) and 1500× (b)

## 4 实验结果

### 4.1 耦合效率

测量耦合效率时,可以先用一个积分球测出 LD 的总出射功率,然后在测量出经光纤耦合后的出纤功率,进而可以计算出耦合效率来。光纤和 LD 耦合时,光纤固定在一个五维微调节架上,以保证能测出最大的耦合效率。

实验中所用的激光器是  $1.3 \mu\text{m}$  DFB 激光器,其  $x$  和  $y$  方向的模场半径分别为  $w_x = 0.6 \mu\text{m}$ ,  $w_y = 0.8 \mu\text{m}$ 。光纤为单模光纤,其模场半径为  $w_f = 5.0 \mu\text{m}$ 。实测在锥角  $2\theta = 120^\circ$  处有最大耦合效率,图 4 给出了理论计算和实测的耦合效率  $\eta$  与半锥角  $\theta$  的曲线图。从图 4 可见,理论计算和实测都表明在  $\theta = 60^\circ$  附近有最大耦合效率(计算值为 87%,实测值为 72%)。图 5 给出了理论计算和实测的归一化耦合效率与耦合距离间的曲线图。从图 4 和图 5 可看出理论计算和实测符合得很好。

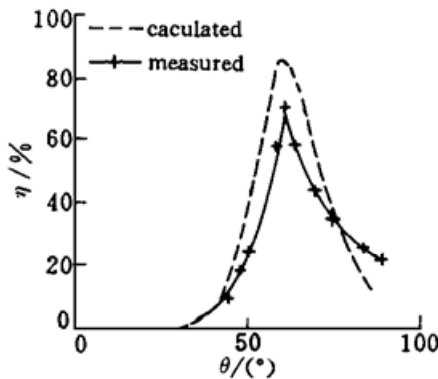


图 4 耦合效率  $\eta$  与半锥角  $\theta$  的曲线图

Fig. 4 Coupling efficiency  $\eta$  as a function of half of the cone angle  $\theta$

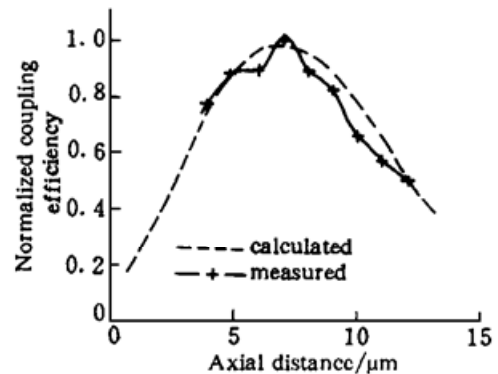


图 5 归一化耦合效率与耦合距离间的曲线图

Fig. 5 Normalized coupling efficiency versus axial distance

用我们所磨的尖锥光纤头在武汉电信器材公司和中国科学院半导体所做耦合实验时,也分别获得了 73.9% 和 63% 的耦合效率。从理论分析和实验检验中,我们发现高的耦合效率既需要有一个最佳锥角,又需要光源的椭圆度较小。当激光器的发射模场近似为圆对称时,其模场半径为  $w_0 = 0.1 \mu\text{m}$ ,假设光纤的模场半径为  $w_f = 5.0 \mu\text{m}$ ,则理论计算表明在锥角  $2\theta = 100^\circ$  处可有 95% 的耦合效率。

此外我们还尝试加工了一个大芯径(外径为  $400 \mu\text{m}$ )的尖锥光纤头,用于 LD 泵浦光源系统中。实测用这种光纤头将泵浦光耦合到被泵浦晶体中的耦合效率可达 50% 以上,而一般用透镜耦合来泵浦晶体的耦合效率只有 30% 左右。

### 4.2 反射损耗

反射大小的测量是非常困难的。我们在实验中应用测量系统特性来评价耦合反射的大小。

在模拟光纤通信系统中,系统的载噪比 CNR 受激光器、光接收机、放大器等的噪声影响,为了达到应用系统  $\text{CNR} = 50 \text{ dB}$  的指标,要求光源 DFB 的强度噪声  $\text{RIN} < -150 \text{ dB/Hz}$ 。而激光器的 RIN 受反射影响,反射的存在将恶化激光器 RIN,为此,要求反射损耗  $\geq 50 \text{ dB}$ 。光纤链路中反射除耦合反射外,还有连接器及接收机处产生的反射。实验中,光纤直接和 DFB 激光器耦合,连接器的反射低于  $-50 \text{ dB}$ ,用频谱分析仪测量 CNR。在接收端测得系统的载噪比  $\text{CNR} > 52 \text{ dB}$ 。系统强度噪声  $\text{RIN} < -153 \text{ dB/Hz}$ 。说明光源激光器的 RIN 是小的。这间接地

说明, 尖锥端光纤耦合的反射损耗是足够大的, 基本上没有引起 DFB 激光器强度噪声的恶化。

为了对比, 我们也用尖锥端光纤和球端光纤耦合的反射比较, 两种光纤分别和 F-P 激光器耦合, 测量接收机输出的强度噪声。当球端光纤和 F-P 激光器耦合, RIN 为  $-110$  dB/Hz; 当用尖锥端光纤和 F-P 激光器耦合, RIN 为  $-129$  dB/Hz。这清楚地说明, 后者耦合的反射要比前者小(一般讲, F-P 激光器 RIN  $\approx 130$  dB/Hz)。

此外, 我们在武汉电信器材公司做的耦合实验中还发现尖锥耦合出来的激光器, 其  $dP-dI$  曲线中的起伏明显低于用自聚焦棒或拉锥球透镜耦合出来的激光器, 这也从另一个侧面反映出尖锥头光纤对 LD 的反馈量是很小的。

### 参 考 文 献

- 1 Bruce R. Clarke. The effect of reflections on the system performance of intensity modulated laser diodes. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(6) : 741~ 749
- 2 Thomas E. Darcie E. Bodeep, Adel A. M. Saleh. Fiber-reflection-induced impairments in light-wave AM-VSB CATV system. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(8) : 991~ 995
- 3 Christopher A. Edwards, Herman M. Presby, Larry W. Stulz. Effective reflectivity of hyperbolic microlenses. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(12) : 2099~ 2103
- 4 Lü Bai-da. Laser Optics. Second Edition, Sichuan Univ. Press, 1992, 119~ 120
- 5 G. Eisenstein, D. Vitello. Chemically etched conical microlenses for coupling single-mode lasers into single-mode fibers. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(19) : 3470~ 3474

## Diode Laser Coupling to a Cone-endface-fiber

Wei Chaojong Zha Kaide Wang Xinhong

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** A coupling technique between a cone-endface-fiber and LD with the advantage of high-efficiency and low-reflectance is presented. The coupling efficiency nearly 90% and the reflectance loss approximately 60 dB are calculated using mode-coupling theory. Experimentally, the best coupling efficiency measured is 73.9% and the reflectivity is less than  $-50$  dB. In addition, a new equipment for fabricating the conical microlens is designed, which has the advantages of low-cost, simple manipulation, and high finished-product-rate.

**Key words** cone-endface-fiber, high-efficiency, low-reflectance, mode-coupling theory