

# 行波半导体激光放大器耦合技术研究\*

刘德明 刘雪峰 黄德修

(华中理工大学光学系, 武汉 430074)

## 提 要

本文从理论上分析了单模光纤与行波半导体激光放大器之间的耦合特性, 导出一套简捷的设计光纤耦合头公式, 比较不同的结构参数对光纤头耦合性能的影响, 选出一种最佳设计方案。经实验验证, 采用本文提出的光纤头微透镜处理技术, 可使光纤-光放大器耦合损耗降至  $-3\text{dB}$ 。

关键词: 耦合; 光放大器; 半导体激光。

## 一、前 言

行波半导体激光放大器(TWSLA)在未来的光学系统中, 将具有十分重要的作用<sup>[1~2]</sup>。

在 TWSLA 的许多应用中, 衡量器件性能的一个主要技术指标是 TWSLA 的增益, 其增益取决于芯片的内增益、芯片解理面剩余反射率, 芯片与耦合光纤之间的耦合效率这三个因素。

已有人为降低光纤-光纤放大器之间的耦合损耗, 提出了多种耦合方式。如, 圆柱透镜、共焦透镜、自聚焦透镜等等, 但它们在耦合技术的实施及保持器件耦合效率稳定性等方面, 遇到严重困难。

在光纤端面直接制作微透镜是一种行之有效的耦合头处理技术, 采用特殊制备工艺可获得各种不同特性的光纤头。因其在提高耦合效率、稳定性、可靠性等方面具有其它耦合形式所无法比拟的优点, 受到广泛重视。

本文通过对高斯光束的传输、变换和高斯光场的耦合进行理论分析与计算, 推导了在最佳耦合条件下光纤微透镜的设计公式。根据本文提出的分析方法, 对不同结构的光纤头的耦合特性进行比较, 确定了一组最佳结构光纤头微透镜设计参数。实验结果表明, 对光纤头微透镜结构参数进行优化设计, 可大大提高光纤与 TWSLA 芯片之间的耦合效率。

## 二、耦合特性的理论分析

一般采用隐埋条形异质结构(BH)半导体激光器芯片作 TWSLA 芯片, 其有源区为一矩形折射率波导, 垂直于结平面方向厚度为  $x_0$ , 平行于结平面方向宽度为  $y_0$ 。对于单横模运转 BH 激光器, 辐射场可以用基阶高斯模很好地描述, 当在自由空间传输时, 辐射场为一高斯光束, 束腰位于芯片出射端面上, 归一化场分布为<sup>[3]</sup>:

收稿日期: 1991年5月6日; 收到修改稿日期: 1991年7月1日

\* 国家 863 资助项目。

$$\Psi_s(x, y) = \varphi_x(x, W_x, R_x)\varphi_y(y, W_y, R_y), \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\varphi_s(x, y)|^2 dx dy = 1. \quad (2)$$

式中  $\varphi_x$  与  $\varphi_y$  分别是  $x$ - $y$  平面与  $y$ - $z$  平面上高斯光场归一化场分布, 由下式给出:

$$\varphi_x(x, W_x, R_x) = \left(\frac{1}{W_x\sqrt{\pi/2}}\right)^{1/2} \exp\left[-\left(\frac{x}{W_x}\right)^2 + ik_0 \frac{x^2}{2R_x}\right], \quad (3)$$

$$\varphi_y(y, W_y, R_y) = \left(\frac{1}{W_y\sqrt{\pi/2}}\right)^{1/2} \exp\left[-\left(\frac{y}{W_y}\right)^2 + ik_0 \frac{y^2}{2R_y}\right]. \quad (4)$$

这里,  $(W_x, R_x)$  与  $(W_y, R_y)$  分别是  $x$  方向与  $y$  方向高斯场分布的模场半宽和波前曲率半径。

与 TWSLA 耦合的光纤一般采用阶跃型单模光纤, 其基模传输场也可用高斯光场很好地近似, 光纤输出一高斯光束, 束腰位于光纤端面上, 场分布为圆对称, 如下描述:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_f(x, W_f, R_f) &= \left(\frac{1}{\sqrt{\pi/2}W_f}\right)^{1/2} \exp\left[-\left(\frac{x}{W_f}\right)^2 + ik_0 \frac{x^2}{2R_f}\right], \\ \varphi_f(y, W_f, R_f) &= \left(\frac{1}{\sqrt{\pi/2}W_f}\right)^{1/2} \exp\left[-\left(\frac{y}{W_f}\right)^2 + ik_0 \frac{y^2}{2R_f}\right]. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

两高斯光场  $\varphi_s$  与  $\varphi_f$  耦合时耦合效率为<sup>[4]</sup>:

$$\begin{aligned} \eta_x &= \left| \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_s(x, W_x, R_x)\varphi_f^*(x, W_f, R_f) dx \right|^2 \\ &= 2 \left[ \left(\frac{W_x}{W_f} + \frac{W_f}{W_x}\right)^2 + \left(\frac{\pi W_x W_f}{\lambda_0}\right)^2 \left(\frac{1}{R_x} - \frac{1}{R_f}\right) \right]^{-1/2}, \end{aligned} \quad (6)$$

同理,

$$\eta_y = 2 \left[ \left(\frac{W_y}{W_f} + \frac{W_f}{W_y}\right)^2 + \left(\frac{\pi W_y W_f}{\lambda_0}\right)^2 \left(\frac{1}{R_y} - \frac{1}{R_f}\right) \right]^{-1/2}, \quad (7)$$

总耦合效率即为:

$$\eta = \eta_x \eta_y. \quad (8)$$

为简化讨论, 将 TWSLA 的高斯光场取圆对称近似, 令

$$W_s = \sqrt{W_x W_y}, \quad (9)$$

同时设光纤端面与芯片端面分别处于耦合透镜的两焦平面上, 即有  $R_f \rightarrow \infty$ ,  $R_s \rightarrow \infty$ 。于是, 光纤-光放大器耦合效率的表达式可近似为:

$$\eta = \left(\frac{2W'_f W_s}{W'^2_f + W_s^2}\right)^2, \quad (10)$$

式中  $W_s$  是 TWSLA 芯片端面上的束斑半宽,  $W'_f$  是光纤输出光束经透镜变换之后的束斑半宽。显然, 当  $W'_f = W_s$  时, 耦合效率最大。

现在, 讨论一下透镜对光纤输出光束的变换作用。变换可利用高斯光束的传输矩阵得到, 引入一复的束参数  $q$ ,  $q$  与束宽  $W$ 、波前曲率半径  $R$  的关系为:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - \frac{i\lambda_0}{\pi W^2}. \quad (11)$$

对高斯光束传播路径上每点的  $q$  值, 可通过传输方程来描述。设光纤出射端面  $q = q_f$ , 经透镜变换之后为  $q'_f$ , 则有<sup>[5]</sup>:

$$q'_f = \frac{Aq_f + B}{Cq_f + D}, \quad (12)$$

式中  $A, B, C, D$  是变换透镜系统矩阵的矩阵元。

在本文的实验中, 光纤头上制作的微透镜为一平凸透镜, 束斑在变换前位于距球面  $d_1$  处; 变换后位于距球面  $d_2$  处, 见图 1。若球面的半径为  $r_l$ 、透镜材料折射率为  $n_l$ , 则有

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1/n_l \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

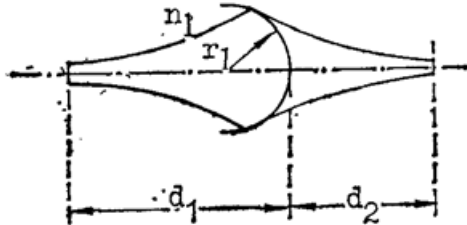


Fig. 1 Transmision of Gaussian beams of light through a lens

式中  $f' = \frac{r_l}{n_l - 1}$  是球面透镜焦距。

当光纤平端置于平凸透镜的前焦平面上时, 输出光束变换之后的束腰将位于透镜的后焦平面上, 则有  $d_2 = f', d_1 = n_l f'$ , 由(13)式可得  $A = 0, B = f', C = -\frac{1}{f'}, D = 0$ , 代入(12)式并注意到  $R_f$  与  $R_f'$  均趋于无穷值, 可得透镜焦距与球面半径为:

$$f' = \frac{\sigma}{\lambda_0} W_f W_f', \quad (14)$$

$$r_l = f'(n_l - 1), \quad (15)$$

而光纤端面与芯片端面距球面距离分别为:

$$d_1 = n_l f' = \left(1 + \frac{1}{n_l - 1} r_l\right), \quad (16)$$

$$d_2 = f'. \quad (17)$$

(14)~(17)式可作为光纤头微透镜处理技术的基本设计公式。

### 三、光纤头微透镜处理技术

在本节讨论中, 采用的典型数据有: 光纤芯径  $2a_0 = 9 \mu\text{m}$ , 包层直径  $D_0 = 125 \mu\text{m}$ , 纤芯折射率  $n_f = 1.47$ , 相对折射率差  $\Delta = 0.3\%$ , 模场半宽  $W_f = 4.85 \mu\text{m}$ , TWSLA 芯片模场半宽  $W_s = 0.9 \mu\text{m}$ , 中心波长  $\lambda_0 = 1.3 \mu\text{m}$ , 透镜材料折射率  $n_l = 1.74$ 。

一种最简单的光纤头处理技术是将透镜直接制作在光纤头端面上(如图 2 所示), 该结构的优点是容差较大, 耦合稳定性好。但由于透镜的球面半径需等于或大于包层半径, 因而光纤头理想耦合效率只有 6%。

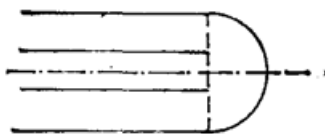


Fig. 2 Plane facet with hemispherical end

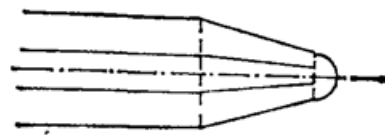


Fig. 3 Inter-taper-with-hemisphere end

为提高耦合效率, 必须减小透镜球面半径。将平直光纤制成圆锥体是切实可行的途径, 一种方法是采用电弧放电加热光纤, 将纤芯与包层成正比例地拉成锥体状(如图 3 所示), 这种内拉锥烧球的优点是工艺简便, 缺点是技术难度大且在锥内存在光的逸出损耗; 另一种方法是采用腐蚀或磨削将光纤包层制成锥体而保持纤芯直径不变(如图 4 所示), 这种外拉锥

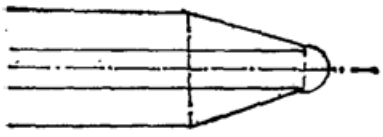


Fig. 4 Outer-taper-with-hemisphere end

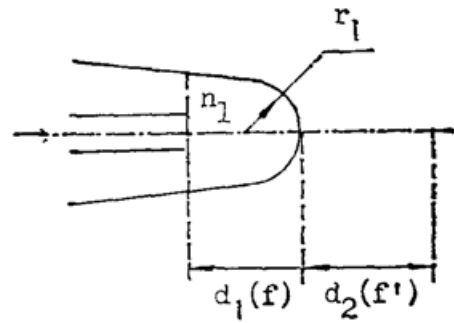


Fig. 5 Structure of lenslike fiber end

烧球虽然加工工艺复杂,但能够确保锥体的一致性并可避免纤芯圆锥波导光的损耗,是一种最佳结构。

为满足最佳耦合条件,要求光纤输出端面位于平凸透镜的前焦平面上。因此,光纤输出端面距透镜球面距离  $d_1$  应大于球面半径  $r_l$ ,即在光纤锥端制作的玻璃微透镜应具有长椭球形态(如图 5 所示)。由于透镜长度  $d_1$  与材料折射率  $n_l$  成反比,适当增大  $n_l$  值可使透镜接近半圆球透镜,从而减少工艺难度。但要注意,  $n_l$  的增大会导致光纤-透镜界面处菲涅尔反射的增强,从而引起 TWSLA 行波性能降低,因此,对  $n_l$  取值应恰到好处。

对于外拉锥烧球光纤头,采用前述数据,由(14)~(17)式可求得最佳耦合条件下光纤头的结构参数:透镜焦距  $f'=21\mu\text{m}$ ,球面半径  $r_l=16\mu\text{m}$ ,透镜长度  $d_1=37\mu\text{m}$ ,这时可得理想耦合效率。

对于内拉锥烧球光纤头,虽在圆锥波导内传输的场分布仍可保持为高斯场分布,但模场半宽则随着纤芯芯径的减小反而增大。在锥端输出端面,若纤芯芯径为  $2a_1$ ,则模场半宽  $W$ ,变为<sup>[6]</sup>:

$$W_f = a_1 [0.65 + 1.619V_1^{-3/2} + 2.879V_1^{-6}] \quad (18)$$

式中  $V_1$  是对应于  $a_1$  的归一化频率,

$$V_1 = a_1 k_0 (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = a_1 k_0 n_1 \sqrt{2\Delta} \quad \left( a_1 = \frac{D_1}{D_0} a_0 \right) \quad (19)$$

这里,  $D_1$  是光纤锥端包层直径,并假设纤芯与包层直径呈比例减小。仍采用前述数据,由(14)~(20)式求得最佳耦合条件下光纤头的结构参数:透镜焦距  $f'=30\mu\text{m}$ ,球面半径  $r_l=22\mu\text{m}$ ,透镜长度  $d_1=52\mu\text{m}$ ,锥长  $L=350\mu\text{m}$ ,这时也可获得理想耦合效果。

## 四、结 论

在 TWSLA 辐射场取圆对称近似且满足最佳耦合条件下导出了设计行波半导体激光放大器耦合光纤头的简捷公式,据此可以确定光纤头的最佳结构参数,从而达到理想耦合效率。

实际的 TWSLA 芯片输出辐射场在  $x$  方向与  $y$  方向是不对称的(典型值  $W_x=0.7\mu\text{m}$ ,  $W_y=1.6\mu\text{m}$ ),光纤头的锥长、透镜长度与球面半径都不可能完全达到最佳结构参数。利用(1)~(8)式可计算准确的耦合效率以及各结构参数对耦合效率的影响(有关具体研究工作将另文发表),计算结果表明:

1. 由本文所导出的设计公式计算得到的耦合光纤头结构参数, 对应于最低耦合损耗。
2. 在光纤头结构参数中, 对耦合效率影响最大的是球面半径  $r_i$ , 其次是透镜长度  $d_1$ 。
3. 三种结构的光纤头, 平端烧球容差最大, 外拉锥烧球容差最小, 内拉锥烧球容差介于两者之间。

在本文研究工作中, 采用内拉锥烧长椭球的光纤头处理技术, 圆锥波导长  $280 \sim 450 \mu\text{m}$ , 透镜球面半径  $18 \sim 24.5 \mu\text{m}$ , 选用透镜材料折射率为 1.74, 透镜长  $45 \sim 60 \mu\text{m}$ , 通过精心校准与激光定位焊接, 已成功地使光纤-光放大器耦合效率稳定在  $40 \sim 50\%$ , 这个指标接近目前国际先进水平。

### 参 考 文 献

- [1] Brain, M. O.; *Br. Telecom Technol. J.*, 1989, **7**, No. 1 (Jan), 50~57.
- [2] Olsson, N. A.; *J. Lightwave Technol.*, 1989, **LT-7**, No. 7 (Jul), 1071~1082.
- [3] 朱如曾;《激光物理》, (国防工业出版社, 北京, 1979), 200~205.
- [4] H. W. Kogelmik; «Microwave Research Institute Symposia Series, 14», (Polytechnic Press., New York, 1964), 333~335.
- [5] D. Marcuse; «*Lightwave Transmission Optics (2nd Edition)*», (Van Nostrand Reinhold Company, N. Y., 1982), 174~223.
- [6] D. Marcuse; *Bell Syst. Tech. J.*, 1973, **52**, No. 2 (Feb), 1169~1220.

## A study of coupling technique for the TW-SLAs

LIU DEMING LIU XUEFENG AND HUANG DEXIU

(Department of Optics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

(Received 6 May 1991; revised 1 July 1991)

### Abstract

The technique of a single-mode fiber coupling with a Travelling-wave Semiconductor Laser Amplifier (TW-SLA) was investigated theoretically. A set of simple and useful formulas were developed for designing the fiber ends. The coupling characteristics of the fibers having hemispherical sphere ends (HE), inter-taper-with-hemisphere ends (IE) and outer-taper-with hemisphere ends (OE) were compared each other and analyzed. It was confirmed that the coupling efficiency a from fiber into TW-SLA chip is much greater for the cases of IE and OE than for HE, with OE being the most efficient. A  $-3$  dB coupling loss between fiber and TW-SLA chip has been obtained with the optimum fiber ends in our experiments.

**Key words:** coupling, optical amplifier, semiconductor laser.