

# 具有去包层球锥透镜的多模光学纤维与 条形 DH GaAlAs 激光器之间的耦合

谢 黄 海

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 本文报导了采用去包层球锥透镜实现光纤与条形 DH GaAlAs 激光器之间高效率的耦合。从理论上分析了这种高效率耦合机理,并设计了这种透镜。实验上获得了 90% 的耦合效率。实验也表明包层球锥透镜的耦合效率为最高,与理论分析相一致。

## Light coupling of stripe-geometry DH GaAlAs laser into etched-cladding tapered-spherical lens fibers

Xie Huanghai

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

**Abstract:** This paper reports the high efficient light coupling between stripe-geometry DH GaAlAs lasers and the multimode fibers by using etched-cladding tapered-spherical lenses at the ends of fibers. Mechanism of the high efficient coupling has been analysed theoretically and the lens has been designed. We have obtained a coupling efficiency of 90% experimentally. It is shown that the coupling efficiency of the etched-cladding tapered, spherical lens described here is the highest one. This result agrees with the theoretical analysis.

### 一、引 言

将激光高效率地耦合入光纤,是光纤通讯的一个重要问题。目前已经报导了许多实现高效率耦合的方法<sup>[1]</sup>,其中在纤维端面直接加工一个透镜为最方便,圆锥端面透镜<sup>[2,3]</sup>和去包层的半球端面透镜<sup>[4,5]</sup>已被广泛地采用。最近又报导了采用不去包层球锥端面透镜,其耦合效率可达 83%<sup>[6]</sup>。

多模光纤与条形 DHGaAlAs 激光器的光耦合,采用如图 1(a)所示的圆锥端面透镜,需要高质量的光学端平面。但制备困难,并且直径比受到光纤芯径和激光器发光区尺寸的限制。采用如图 1(b)所示的去包层的半球端面透镜,由于光纤的数值孔径小,耦合效率又受到限制。采用图 1(c)所示的不去包层的球锥透镜,由于包层太厚,也影响了它耦合效率的提高。

收稿日期: 1981年4月1日。

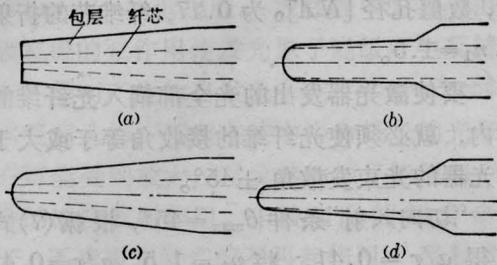


图1 几种纤维端面透镜

(a) 圆锥端面透镜 (b) 去包层半球端面透镜 (c) 不去包层半球端面透镜 (d) 去包层球锥端面透镜

本文报导一种新的耦合方法,如图1(d)所示。光纤端面是一个由圆锥透镜和去包层半球透镜组成的球锥透镜,为了与图1(c)区别,称这种透镜为“去包层球锥透镜”。去包层半球透镜的作用是增大纤维的接收角,而圆锥透镜的作用是增加光纤维的有效数值孔径。在实验上,获得了90%的耦合效率。

## 二、理论分析

假定条形DH GaAlAs激光器的光强分布为高斯分布,激光器与光纤维之间的耦合效率 $\eta$ 可近似写成<sup>[7]</sup>:

$$\eta = \operatorname{erf} \left[ \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right] [1 - R_0] \quad (1)$$

式中, $\theta$ 是光纤维的接收角; $\alpha$ 是激光器的光束发散角; $R_0$ 是光纤维端面的反射率。

对于一定的激光器来说,它的发散角是不变的,分析光纤维和激光器之间的光耦合效率,只要分析光纤维的接收角即可。

前面说过,我们把去包层球锥透镜看成是圆锥透镜和去包层半球透镜组成的复合透镜。关于半球透镜耦合已由文献[4, 8]详细地分析了。

图2为去包层球锥透镜和条形DH GaAlAs激光器的耦合模型。

从条形DH GaAlAs激光器射出的某光线,与光纤维轴夹角为 $\theta$ 射到纤维端面,这个光线的传播方程为:

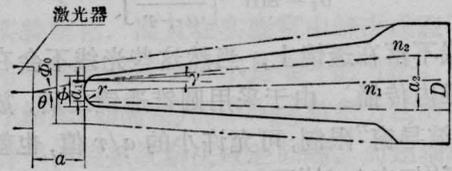


图2 去包层球锥透镜耦合模型

$$\gamma(\theta) = \sin^{-1} \left[ \left( \frac{a}{r} + 1 \right) \sin \theta \right] - \sin^{-1} \left[ \frac{1}{n_1} \left( \frac{a}{r} + 1 \right) \sin \theta \right] - \theta \quad (2)$$

折射角 $\gamma(\theta)$ 是 $a/r$ 的函数,不同的 $a/r$ 值可以计算不同的 $\gamma(\theta)$ 。但这种光线是否在纤维芯内传播,还要受到三个不同边界条件的限制。

### (1) “波导窗”限制

如果光线折射之后, $\gamma(\theta)$ 大于光纤维全内反射的临界角 $\gamma_0$

$$\gamma_0 = \sin^{-1} [NA/n_1] \quad (3)$$

式中 $NA$ 是光纤维的数值孔径。不满足芯-包层界面的全内反射条件,则不能在光纤维内传播。

由于我们采用了圆锥透镜,光纤维的有效数值孔径增加了,根据文献[3]的计算,如果圆锥的长度大于2毫米,则圆锥透镜的有效数值孔径 $[NA]_{eff}$ 为:

$$[NA]_{eff} = R[NA]_0 \quad (4)$$

式中 $R = a_2/a_1$ 称为直径比, $a_1$ 和 $a_2$ 分别是圆锥透镜两端面的直径; $[NA]_0$ 是光纤维的原数值孔径。光纤维全反射临界角 $\gamma_0$ 变为

$$\gamma_0 = \sin^{-1} \left[ \frac{R[NA]_0}{n_1} \right] \quad (5)$$

采用圆锥透镜之后,放宽了“波导窗”限制,可以允许有小的 $a/r$ 值。但是 $R$ 不是无限制的,它要受到激光器的作用区条宽 $W$ 的限制,最大直径比 $R_{max}$ 为

$$R_{max} = a_2/W \quad (6)$$

### (2) “切入向射”限制

如果光线角 $\theta$ 大于透镜表面的切线角 $\theta_t$ ,

$$\theta_i = \sin^{-1} \left[ \frac{r}{a+r} \right] \quad (7)$$

光线不落在透镜上,当然这些光线不会在光纤内传播。由于采用圆锥透镜之后,放宽了“波导窗”限制,可允许小的  $a/r$  值,也就放宽了“切向入射”限制。

### (3) “芯孔径”限制

如果光线落在纤维芯外面的透镜上,不管折射角如何,都不能在光纤内传播,这种“芯孔径”限制条件为

$$\frac{a+r}{r} \sin \theta = \sin \left[ \theta + \sin^{-1} \frac{a_1}{2r} \right] \quad (8)$$

从式(8)可以看出,在一定  $a/r$  下,  $\theta$  的大小还取决于  $a_1/2r$  的值,当  $a_1/2r=1$  时即半球的直径等于圆锥端面的直径,芯孔径限制可消失。但目前使用的光纤包层较厚,在制备球透镜时,往往出现如图3所示的情况,图3(a)的半球是扁平的,图3(b)的半球,纤芯一部分被包层围住,它们的接收角受到“芯孔径”条件的限制,影响了耦合效率。采用包层部分去除或接近全部去除,尽可能地满足  $a_1/2r=1$  条件,从而消除“芯孔径”的限制条件。

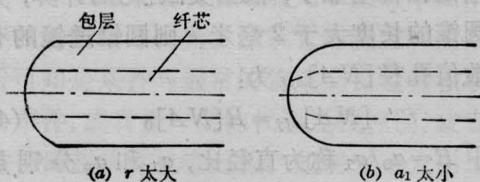


图3 形成半球透镜的常见情况

从上面分析可知,同时采用球透镜、圆锥透镜和腐蚀包层三种方法,可以使条形DH GaAlAs 激光器和多模光纤实现高效率的耦合。

## 三、设计

假定激光器在垂直于  $p-n$  结方向上光束发散角为  $\pm 45^\circ$ , 激光器作用条宽为 15 微米, 光纤维的芯径为 60 微米, 外径为 150 微

米, 数值孔径  $[NA]_0$  为 0.17, 纤维芯的折射率  $n_1=1.5$ 。

要使激光器发出的光全部耦入光纤维的芯内, 就必须使光纤维的接收角等于或大于激光器的光束发散角  $\pm 45^\circ$ 。

“切向入射”条件  $\theta_{\max}=45^\circ$ , 根据(7)式求得  $a/r=0.41$ 。将  $n_1=1.5$ ,  $a/r=0.41$  代入方程(2)得

$$\gamma(\theta) = \sin^{-1} [1.41 \sin \theta] - \sin^{-1} [0.94 \sin \theta] - \theta$$

求出此式的极值, 计算太麻烦, 我们采用图解法, 画出  $a/r=0.41$  的  $\gamma(\theta) \sim \theta$  曲线, 如图4所示。从曲线求得的极值为  $14^\circ$ , 说明  $|\gamma(\theta)| < 14^\circ$  的光线都能在纤维芯内传播。

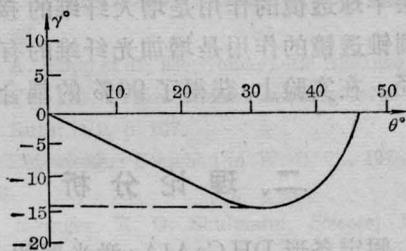


图4  $a/r=0.41$  的  $\gamma(\theta)$  曲线

根据  $\gamma_{\max}(\theta)=14^\circ$ , 求得圆锥透镜纤维的有效数值孔径  $[NA]_{\text{eff}}$

$[NA]_{\text{eff}} = n_1 \sin \gamma = 1.5 \times \sin 14^\circ = 0.36$ , 则圆锥透镜的直径比  $R$

$R = [NA]_{\text{eff}} / [NA]_0 = 0.36 / 0.17 = 2.1$  圆锥透镜的前端面直径  $a_1$  为

$$a_1 = a_2 / R = 60 / 2.1 = 28 \text{ (微米)}$$

$a_1$  大于激光器发光区的条宽 15 微米, 所以设计是合理的。

圆锥透镜的前端面外直径  $\Phi_0$  则为

$$\Phi_0 = D / R = 150 / 2.1 = 71 \text{ 微米}$$

将  $a/r=0.41$ ,  $\theta=45^\circ$ , 代入“芯孔径”条件方程得:

$$1.41 \sin 45^\circ = \sin \left( 45^\circ + \sin^{-1} \frac{a_1}{2r} \right)$$

解得  $a_1/2r=0.7$ 。

按照“芯孔径”条件限制, 圆锥透镜外直

径  $\phi$  应为

$$\phi = 2r = 28/0.7 = 40 \text{ 微米}$$

$\phi$  值比  $\Phi_0$  值小, 若不采用腐蚀包层, 减薄包层厚度, 这样大的  $\Phi_0 = 70$  微米形成的球透镜, 势必要受到“芯孔径”条件的限制, 腐蚀包层, 减薄包层是必要的, 至少应腐蚀掉包层厚度  $t$  为

$$t = \Phi_0 - \phi = 71 - 40 = 31 \text{ 微米}$$

这样, 我们设计了球锥透镜的几何参数和工艺参数, 只要把上述光纤一端拉成圆锥, 其圆锥长度大于 2 毫米, 并用化学腐蚀方法把包层厚度腐蚀掉 31 微米, 再在圆锥端面直径为 40 微米处作成直径为纤维外径的半球透镜, 便形成去包层的球锥透镜的光纤锥。

#### 四、实验结果

在耦合实验中, 我们使用数值孔径  $[NA]_0$  为 0.17, 纤维芯为 60 微米, 外径为 150 微米的多模梯度型石英光纤。光纤在煤气火焰中慢慢地拉成圆锥透镜, 然后用饱和氢氟酸对包层进行腐蚀, 再在交流电弧火花下, 在圆锥端面上作成半球透镜, 图 5 为这种去包层球锥透镜放大 50 倍的照片, 同时又给出了一根未经任何处理的光纤的照片, 以示比较。

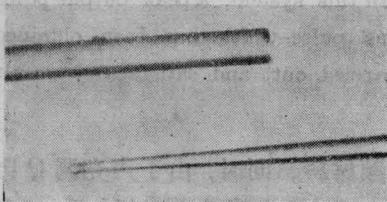


图 5 实物照片

上图为未经任何处理的光纤;

下图为去包层球锥透镜的光纤

实验用条形 DHGaAlAs 激光器, 条宽为 15 微米, 阈值电流为 160 毫安, 工作电流为 180 毫安, 发射激光功率为 1 毫瓦, 激光束

在垂直于  $p-n$  结方向上, 在  $1/e^2$  光强处的发散角为  $\pm 45^\circ$ 。

我们作了下面二个耦合实验:

1. 用 5 根 50 厘米长具有本文所述的去包层球锥透镜的光纤维与激光器耦合, 测得耦合效率分别为 90%、84%、85%、85%、90%。

2. 在一根光纤端面上, 相继制成不去包层的球锥透镜、去包层的半球透镜和去包层的球锥透镜, 分别与激光器耦合。实验结果如下: 不去包层的球锥透镜, 直径比  $R$  为 3, 半球的半径为 30 微米, 前端面外径为 50 微米, 测得耦合效率为 70%。然后这一只不去包层的球锥透镜用饱和氢氟酸腐蚀, 使包层厚度减少, 再作成半球透镜, 其前端面外径为 30 微米, 半球的半径为 20 微米, 测得耦合效率为 90%。切去去包层的球锥透镜, 再用饱和氢氟酸腐蚀, 腐蚀之后光纤的外径为 80 微米, 然后作成半球的半径为 45 微米的透镜, 测得耦合效率为 60%。可以看出本文所述的去包层球锥透镜的耦合效率为最高, 与我们的理论分析相一致。上述透镜的几何参数都是用投影仪观察测量的, 投影仪的放大率为 100。

#### 参 考 文 献

- [1] 虞丽生;《光学纤维通信中的光耦合》, 邮电出版社, 1979 年。
- [2] B. S. Kawasaki; *Electronics Letter*, 1976, **12**, 607.
- [3] 刘弘度等;“具有端面圆锥透镜的折射率台阶分布多模光纤与 GaAlAs/GaAs 条形双异质结激光器的耦合”, 第五届欧洲光通信会议, 1979 年。
- [4] 聂朝江;“条形 DHGaAs 激光器与多模光纤间光耦合的理论分析及其实验结果”, 上海光机所第二届科学报告会报告, 1979 年。
- [5] C. C. Timmerman; *Appl. Phys.*, 1976, **15**, 2432.
- [6] H. Kuwahara; *Proc. IEEE*, 1979, **67**, No. 10, 1456.
- [7] 谢黄海等;“GaAs 双异质结激光器与多模光纤的耦合”, 同[4]。
- [8] C. A. Brackett; *J. Appl. Phys.*, 1974, **45**, 2636.