

# 双异质结(DH)激光器-光纤高效耦合

周汝生 朱柏生 张伦

(中国科学院半导体研究所)

1980年12月2日收到

## 提 要

用非子午面光线追迹法,对单芯锥、套层锥以及双芯锥光纤和DH激光器的耦合效率,双芯锥的分光比做了数值计算。实验中有的耦合效率可达92%以上,光纤输出功率11.4mW,并做了双芯锥耦合的前向分光激光器样管。

## 一、前 言

近年来,由于DH激光器和光纤的研究进展很快,光纤传输系统已进入实用阶段。在应用的光纤系统中,DH激光器和光纤的高效率耦合是一个重要的课题。只有解决了耦合、密封及分光反馈以稳定光功率输出,DH激光器长寿命、有效可靠地工作,光纤系统才能实用化。

关于激光器和多模光纤的耦合,已经报道了大量的研究工作。最常用的耦合方式有:直接耦合、球端光纤、柱透镜、自聚焦透镜和锥状光纤耦合等。其中,锥状光纤耦合效率高,结构简单,是一种较好的耦合方式。Ozeki用芯径 $80\mu\text{m}$ 的光纤,耦合效率高达97%<sup>[1]</sup>。按已知的锥端光纤耦合效率公式计算,结宽 $20\mu\text{m}$ 的激光器与芯径 $50\mu\text{m}$ 的锥端光纤耦合,效率不高于75%。1978年,我们用弧光放电加热光纤拉制而成锥,用上述激光器与光纤耦合,效率达到80%以上<sup>[2]</sup>。

为了说明实验结果的可靠性,选择较好的耦合方式,选取最佳的耦合参数,我们用非子午面光线追迹法,对DH激光器和三种锥状光纤的耦合效率进行了数值计算,还计算了双芯锥的分光比。为了验证计算方法的正确性,我们还排出了LD及LED直接耦合,球端及柱透镜等各种耦合方式的计算程序。本文给出了部分计算及耦合样管的测试结果。

我们做出了耦合的激光器样管,有的效率可达92%,入纤功率11.4mW;我们还采用双芯锥耦合,做出了前向分光反馈的激光器样管。

## 二、套层锥耦合效率计算方法简介

有三种类型的锥状耦合器,我们称之为:a)单芯锥(图1(a)),用饱和的HF酸腐蚀而成;b)套层锥(图1(b)),是一种通常使用的结构;c)双芯锥(图1(c)),我们研究了这种新结构,用来耦合分光。

为了计算光源轴向位置和角度偏差对耦合效率的影响,考虑激光器的线度及 LED 的发光面积,对套层锥及双芯锥用子午面光线近似是不够精确的。我们对 LD 及 LED 各种

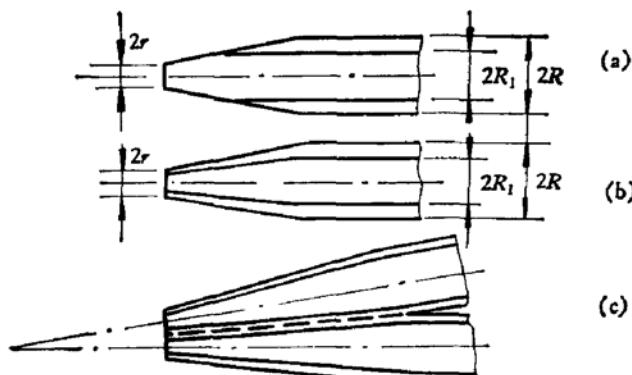


图 1 锥端耦合器结构

方式的耦合效率，用非子午面光线进行了计算。共计 29 个题，平端套层锥就是其中的一个，我们以此为例，说明计算的方法。

目前所用的锥端光纤的耦合效率公式，是由单芯锥的计算得出的。端面有效数值孔径加大，从而提高耦合效率。许多作者实际上多采用套层锥光纤。入射到锥的套层中的光线，有一部分可能进入芯中传输。所以，套层锥增加了入射光的接收孔径。考虑到锥部套层的作用，参数较多，很难给

出其函数关系，我们用数值计算具体给出  $50\mu\text{m}$  芯径光纤的结果。锥长及锥度对耦合效率的影响和单芯锥是一样的。

选用空间直角坐标系 OXYZ, 如图 2 所示. 锥的主轴与 OZ 轴重合, 锥顶点在原点,

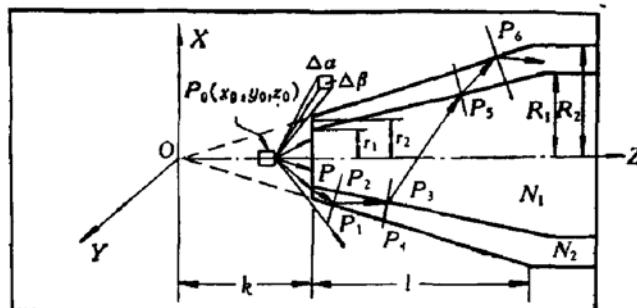


图 2 套层锥计算坐标系及光路图

锥端面与原点距离为  $s$ , 锥长为  $s + l$ . 光纤套层及芯的半径分别为  $R_2, R_1$ ; 锥端面套层及芯的半径是  $r_2, r_1$ ; 套层及芯的折射率分别为  $N_2, N_1$ . 套层锥面(用  $fT_2$  表示)的方程是:

$$x^2 + y^2 = \left( \frac{R_2 \cdot z}{\epsilon + l} \right)^2, \quad (1)$$

芯锥面(用  $fT_1$  表示)的方程是:

$$x^2 + y^2 = \left( \frac{R_1 \cdot z}{c + l} \right)^2. \quad (2)$$

套层柱面(用  $C_3$  表示)的方程是:

$$x^2 + y^2 = R_i^2. \quad (3)$$

芯柱面(用  $C_1$  表示)的方程是:

$$x^2 + y^2 = R_{\text{lo}}^2 \quad (4)$$

光源的位置在  $P_0(x_0, y_0, z_0)$  点, DH 激光器的光束按高斯分布:

$$P = P_0 \exp \left\{ - \left[ \frac{x^2}{W_x^2} + \frac{y^2}{W_y^2} \right] \right\}. \quad (5)$$

光源的光束张角在  $XZ$  向是  $\alpha$ ,  $YZ$  向是  $\beta$ ;  $\alpha, \beta$  各分成  $m, n$  等份:  $\Delta\alpha, \Delta\beta$ ;  $\Delta\alpha \cdot \Delta\beta$  张角内光功率以一条光线表示。设  $P_0P$  (以  $R_i$  表示) 为其中任一条光线。讨论  $P_0P$  是否入射到光纤中, 并能在芯中传输。同样计算所有  $m \cdot n$  条光线, 从而决定耦合效率。

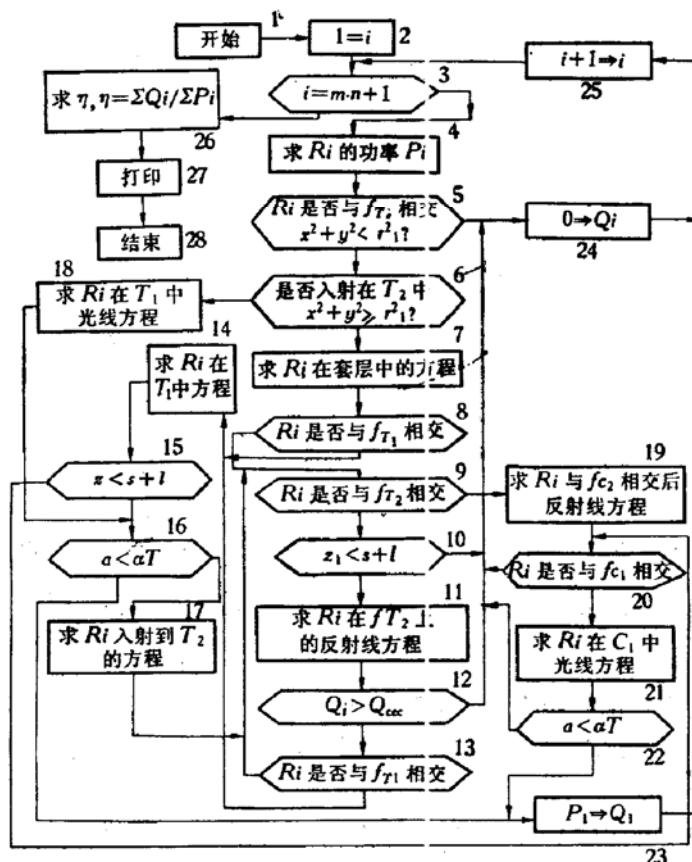


图 3 套层锥耦合计算方块图

图 3 是计算程序的方框图, 对照图 3 及图 2 说明计算过程。

(1) 开始, 有关变量赋值。

(2) 令  $i = 1$ , 若  $a, b, c$  分别是  $P_0P$  与  $X, Y, Z$  轴夹角,  $R_i$  光线 ( $P_0P$ ) 的方程是:

$$\frac{x - x_0}{\cos a} = \frac{y - y_0}{\cos b} = \frac{z - z_0}{\cos c} \quad (6)$$

(3) 依次计算所有光线,  $i \leq m \cdot n$ , 全部算完转 (25)。

(4) 由方程 (5) 计算  $R_i$  的功率  $P_i$ 。激光器的总输出功率为  $\Sigma P_i$ 。如用 LED 光强分布表达式代替 (5) 式, 则可算 LED 的耦合效率。

(5)  $R_i$  是否与锥端面(用  $fT_e$  表示)相交? 即  $P_0P$  与  $z = s$  平面的交点  $P(x, y, z)$  是否在  $fT_e(r_s^2)$  之内。不相交, 即  $x^2 + y^2 \geq r_s^2$ ,  $R_i$  不能进入光纤内, 对光纤传输功率没有贡献; 转 (24), 即  $Q_i = 0$ , 返回计算其它光线。

相交, 即  $x^2 + y^2 < r_s^2$ ,  $R_i$  进入光纤中。转下:

(6) 判别  $R_i$  是进入芯中, 还是进入套层中。

$R_i$  入射到芯中, 即  $x^2 + y^2 < r_1^2$ , 转 (18)。

$R_i$  入射到套层中, 即  $x^2 + y^2 \geq r_1^2$ , 转下:

(7) 求入射到套层锥 ( $T_2$ ) 中的  $R_i$  光线方程。

(8) 判别  $R_i$  是否和芯锥面 ( $fT_1$ ) 相交。如相交则转 (14); 否则转 (9)。

(9)  $R_i$  与套层锥面不相交转 (19); 相交于  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  点转下:

(10)  $z_1 < s + l$  转 (11), 否则转 (19)。

(11) 求  $R_i$  在  $fT_2$  面的反射线方程。首先求  $P_1$  点处  $fT_2$  面的法线  $P_1P_2$ .  $P_1P_2$  的方向余弦由下式给出:

$$\cos a_1 = \frac{-f'_x(x_1 y_1 z_1)}{\sqrt{1 + f'^2_x(x_1 y_1 z_1) + f'^2_z(x_1 y_1 z_1)}} \quad (7)$$

$$\cos b_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + f'^2_x(x_1 y_1 z_1) + f'^2_z(x_1 y_1 z_1)}} \quad (8)$$

$$\cos c_1 = \frac{-f'_z(x_1 y_1 z_1)}{\sqrt{1 + f'^2_x(x_1 y_1 z_1) + f'^2_z(x_1 y_1 z_1)}} \quad (9)$$

$a_1, b_1, c_1$ , 分别是  $P_1P_2$  与  $X, Y, Z$  轴夹角。

由方程 (1), (7), (8), (9) 可求出法线方程。由反射线方程:

$$P_i P_3 = P P_1 - 2(P P_1 \cdot P_1 P_2) P_1 P_2 \quad (10)$$

上式中  $P_1P_2$  是法线的单位矢量,  $PP_1$  是入射线,  $P_1P_3$  是反射线。可以求出反射线方程。

(12)  $R_i$  反射线, 是否与芯锥面相交。相交转 (14), 否则转 (13)。

(13) 判别  $R_i$  光线能否在  $fT_2$  面全反射。 $R_i$  与法线  $P_1P_2$  的入射角  $\theta_i$  可由下式求出:

$$\cos \theta_i = \cos a \cdot \cos a_1 + \cos b \cdot \cos b_1 + \cos c \cdot \cos c_1 \quad (11)$$

已知氮气中套层锥面的全反射角  $\theta_{crit}$ 。如  $\theta_i < \theta_{crit}$ , 则  $R_i$  出射到光纤的外面, 转 (24), 即  $\theta_i = 0$ ; 否则, 继续运算。

(14) 前述在 (8) 及 (12) 中  $R_i$  与芯锥相交, 求出  $R_i$  在芯锥中的方程, 转 (15)。

(15) 如  $z < s + l$ , 即在锥的范围内, 转 (16); 否则转 (20)。

(16)  $R_i$  与  $Z$  轴夹角 ( $\alpha$  角) 如果小于芯的传输角  $\alpha T$  (即  $\alpha < \alpha T$ ), 则  $R_i$  可在光纤中传输, 即  $Q_i = P_i$  转 (23)。否则  $R_i$  又进入套层中, 转 (17)。

(17) 求  $R_i$  在套层中的光线方程, 转 (9)。

(18) 如  $R_i$  从锥端面直接进入芯锥 ( $T_1$ ) 中, 求出  $R_i$  在芯锥中的方程转 (16)。

(19) 如果 (9) 中  $R_i$  不与套层锥面相交: (10) 中  $z_1 \geq s + l$  即  $R_i$  已越过锥的范围, 则  $R_i$  与光纤套层柱面 ( $C_2$ ) 相交, 并求出反射线方程, 转 (20)。

(20)  $R_i$  与芯柱面 ( $C_1$ ) 相交转 (21)。否则转 (24)。

(21) 求出  $R_i$  在芯柱内的方程。

(22) 如果  $R_i$  与  $Z$  轴夹角 ( $\alpha$ ) 小于  $\alpha T$ , 转 (23); 否则转 (24)。

(23)  $R_i$  是光纤的传输光线, 令  $Q_i = P_i$ 。转 (25)。

(24)  $R_i$  不是光纤的传输光线令  $Q_i = 0$  转 (25)。

(25) 令  $i = i + 1$ , 计算另一条光线, 转 (3)。

(26) 所有光线依次全部计算完毕,根据下式

$$\eta = \Sigma Q_i / \Sigma P_i \quad (12)$$

即可求出耦合效率.

(27) 打印结果.

(28) 计算完毕.

上述只是程序的主要逻辑关系及运算过程. 每一个方框内运算过程及有关公式推导,除了个别方框之外,都没有具体给出.

双芯锥的计算更复杂,全部程序的一半以上是有关双芯锥计算的.

### 三、耦合封装方法

要得到高耦合效率,首先要做出高质量锥来. 我们所用拉锥装置示意图,如图4所示. A, B是两根钨丝电极,交流4kV高压通过限流电阻给出约20mA的电流进行弧光放电产生高温加热光纤. F是需拉锥的光纤, C是有机玻璃底板, D, E为两条V形槽,加工要保证AB垂直DE; G, S是压紧盖片, S借弹簧给一定压力,使光纤可在E槽内滑动. G片固紧A, B通电加热后,拉长光纤,可做出高质量的锥来,成品率很高.

在这一装置基础上稍加改进,已做出满意的双芯锥. 光纤在加热拉锥之前,要仔细去掉涂覆包层,经显微镜检查,光纤没有伤痕及缺欠. 有的单位也采用这种方式,以放电高温烧掉涂覆层,这样处理不干净,严重影响耦合效率; 拉锥后,锥表面光洁平滑,锥与光纤同轴,锥部没有裂纹、气泡等缺欠; 锥长要超过2mm; 锥度比要大于4:1; 锥端面要求处理良好. 此拉锥装置结构简单,使用方便.

我们研究所研制的质子轰击条形DH激光器结宽15—20μm,已直流老化18,000小时以上. 经过200小时的老化筛选的激光器,一般可稳定工作几千小时<sup>[3]</sup>. 部分激光器正反向P-I特性一致,有的不一致. 特性一致的,后用Si-PIN管接收,可作光反馈以稳定输出功率; 特性不一致的,我们用双芯锥光纤耦合分光.

根据光通信系统的要求,我们的激光器耦合封装有两种形式: 带活动接头的; 以及带一段光纤的激光器,可以与光缆活动连接或固定连接. 尺寸为15×25×8mm<sup>3</sup>的耦合封装的激光器,其结构如图5所示. 首先通过光学准直使激光器光束与光纤同轴,然后用三维微调架调准,此时激光器直流工作,用光功率计监视光纤输出,调节至输出为最大值,然后用环氧树脂固定在管壳上. 通过耦合前后的直流P-I特性来定出耦合效率. P-I特性的测量是光进入积分球,通过XY记录仪描出的. 比较耦合前后一定电流下激光器的输

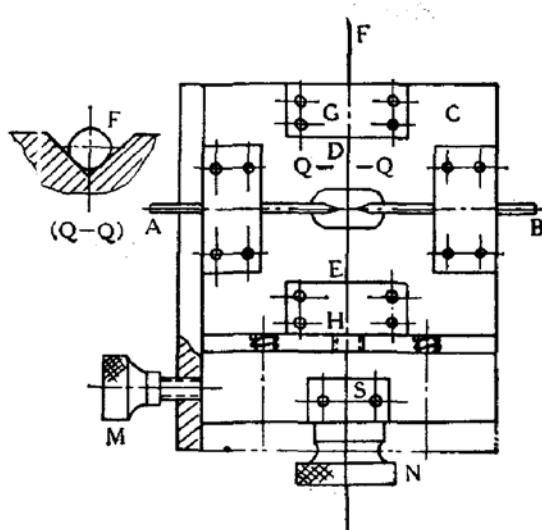


图4 拉锥装置示意图

出功率来定出耦合效率。最后将激光器充氮密封。

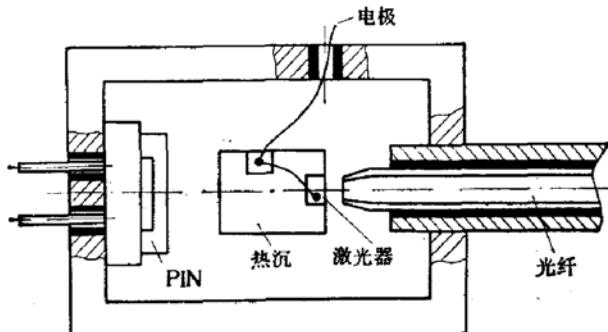


图 5 耦合封装激光器结构示意图

#### 四、计算及实验结果

调通计算程序,得出的计算结果与文献报道的实验结果及我们的实验结果是一致的。计算及实验中所用的光纤参数是:芯径  $50\mu\text{m}$ , 套层厚  $50\mu\text{m}$ , 数值孔径 0.17。

(1) 单芯锥: 计算出耦合效率  $\eta = 0.8575$ 。与下述(2)比较, 单芯锥效率比套层锥要低。

(2) 平端套层锥: DH 激光器与套层锥光纤耦合效率计算结果为 0.92, 我们实验结果为 0.8—0.9。

(3) 球端套层锥光纤: 光纤加热拉锥, 端面烧成半球形, 制备容易。计算耦合效率  $\eta = 1$  (忽略表面费涅尔反射)。我们实验结果  $\eta = 0.8—0.9$ 。

前后向  $P-I$  特性一致的激光器, 前向与套层锥光纤耦合, 反向用 PIN 管或光电二极管接收, 输出反馈信号。

90—9# 激光器耦合前输出  $12.34\text{mW}$  ( $200\text{mA}$ )、耦合后输出  $11.4\text{mW}$ , 耦合效率达到 92%。如图 6 所示。曲线(1)是该激光器初始功率, 曲线(2)是耦合后光纤输出功率。二者工作电流相同, 为清楚起见, 曲线(2)的电流原点移至  $O_2$ 。

一般耦合封装激光器耦合效率都在 75% 以上。1.1—1.2 倍阈电流工作, 输出 1—2  $\text{mW}$ 。激光器与锥端光纤耦合封装过程中, 影响效率的因素较多: ① 光纤锥端制备质量; ② 激光器在热沉上的安装位置; ③ 光纤锥端和激光器轴向及位置偏差, 对耦合效率影响较大, 环氧树酯固化时, 环境的震动会降低耦合效率。本文给出的耦合效率是样管封装后的结果。调试过程中曾得到过更好一些的数据。

(4) 平端双芯锥: 如图 7(a)所示, 激光器对准双芯锥的一芯(传导光纤), 另一根作为参考光纤。计算结果是: 传导光纤耦合效率  $\eta_{\text{传导}} = 0.4665$ , 参考光纤  $\eta_{\text{参考}} = 0.1047$ 。做出双锥为增加强度, 锥部加了 502 胶, 影响耦合效率,  $\eta_{\text{传导}} = 0.33$ ,  $\eta_{\text{参考}} = 0.04$ 。传导光纤及参考光纤输出的  $P-I$  特性如图 7(b) 所示。(I) 为激光器初始功率, (II) 为主光纤输出, (III) 为参考光纤输出。传输光纤与参考光纤的分光比, 可以调节双芯锥的  $x$  位置来改变, 为了应用方便可以控制在 10:1 左右。

(5) 球端、柱透镜耦合效率计算结果与有关的报道接近, 与我们实验的结果也是一致

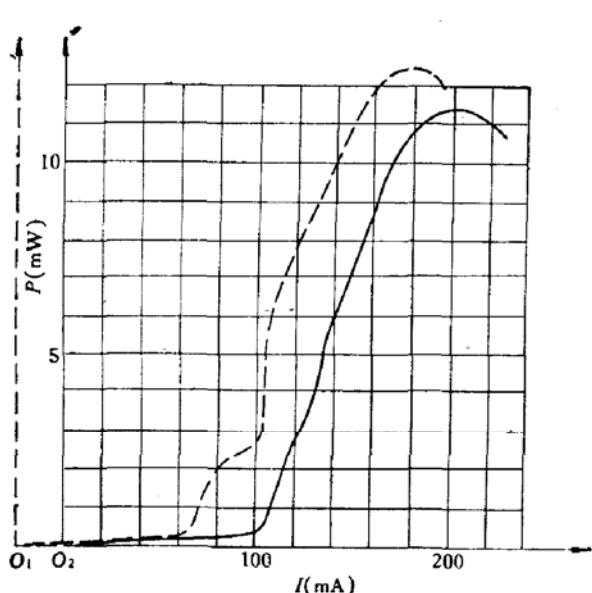
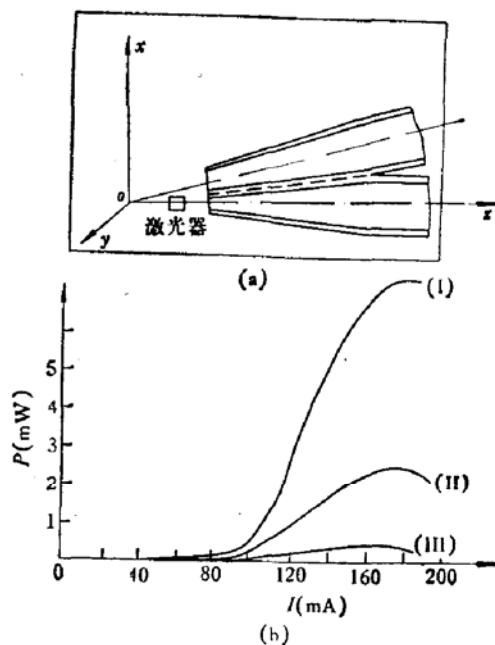
图 6 90-9# 激光器耦合前后  $P$ - $I$  特性曲线

图 7

(a) 平端双芯锥耦合  
 (b) 传导光纤及参考光纤输出的  $P$ - $I$  特性

的，说明计算方法是正确的。

(6) 端面出光 LED 与球端套层锥耦合，粗略计算的结果  $\eta = 0.5$ 。有的激光器荧光输出高，初始功率为 0.2—1mW，耦合后输出约 0.1—0.5mW。耦合效率比面发光 LED 高得多。面发光 LED 与锥端光纤的耦合问题，我们将在另外的文章中讨论。

从已报道的锥端光纤与激光器和发光管耦合实验结果以及我们的计算和实验结果来看，锥端光纤的确是最好的一种耦合方式，它的效率高、方法简单，可靠性、重复性好，而且不仅能适用于大芯径光纤，也可用于芯径较小的光纤。证明后一点正是我们进行繁琐数字计算的目的。有了密封的高效率耦合的 DH 激光器，是光纤通讯走向实用化的重要条件之一。

近年来，我室为国内应用单位提供批量耦合密封激光器，用于光纤系统、光纤及探测器参数的测试。其中桂林光通信研究所及铁道科学院的 10.35km 的光纤实验段，激光器人纤功率平均 1dBm 以上，通过电气机车跑车实验，光纤系统抗电磁干扰性能良好。

本工作得到王守武教授，王启明、庄婉如、杨培生、王丽明、马英棣、田慧良以及所计算站及冶金部有色金属研究院计算站的帮助，谨致谢意。

### 参 考 文 献

- [1] T. Ozeki et al., *Electron. Lett.*, 12, 407, 607(1976).
- [2] Liu Hong-du et al., Proc. of V ECOC and II Inter. Conf. on IOOC, Amsterdam, Sept. 1979, Post deadline Papers, paper 19. 8.
- [3] 中国科学院半导体研究所光电研究室；半导体学报 1 43(1980)。

## Highly Efficient Coupling between DH Laser and Fiber

Zhou Rusheng, Zhu Baisheng and Zhang Lun

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

### Abstract

The efficiency of coupling between DH lasers and tapered launchers with single core, clad-core and double core has been calculated by using skew ray tracing technique. Some packaged DH laser devices have been fabricated, and the optical power output from the fiber of some of these devices is up to 11.4 mW (coupling efficiency of 92%). A sample device with optical feedback splitted light from the front surface of the laser to stabilize power output has also been fabricated.