

# 2×2 单模光纤耦合器的改进控制方法

易子旭,段吉安,苗健宇,侯玲珑

(中南大学 机电工程学院,长沙 410083)

**摘要:** 探讨了熔融拉锥过程中工艺参数的优化设计,提出了一种在拉伸到一个较小预定分光比之后只进行加热熔融的耦合器制造的新方法,通过理论分析了其可行性,并通过 VC++ 程序实现了该工艺的控制过程。通过大量的实验表明,该方法制造的 2×2 单模光纤耦合器的性能有显著提高,而且可靠性明显优于普通熔锥型光纤耦合器。因此这种方法是一种耦合器的改进型制造方法。

**关键词:** 熔融拉锥;工艺参数;控制;性能测试

**中国分类号:** TN253;TP271 **文献标志码:** A

## 1 引言

光纤耦合器是一类重要的无源器件,其基本功能是实现光功率分配和光波长分配。单模光纤耦合器是光纤通信系统、光纤传感器、光纤测量技术和信号处理系统中一种应用十分广泛的无源器件。

目前,国内外普遍采用熔融拉锥法(FBT)制作光纤耦合器。熔融拉锥法是将两根(或两根以上)除去涂覆层的光纤以一定的方式靠拢,在高温加热下熔融,同时向两侧拉伸,最终在加热区形成双锥体形式的特殊波导结构,从而实现传输光功率耦合的一种方法。这种技术在制作的效率和产品的性能等方面具有一定的优势,是当前制作光纤耦合器的主要方法。以这种方法制作形成的光纤耦合器性能较前有了显著提高。但是,随着光纤耦合器在军事、航天等高新技术领域的大量应用,对插入损耗的平坦度、偏振灵敏度、器件的可靠性、工作带宽和工作功率等方面的要求越来越高。这些实际需要对耦合器的制造工艺提出了更高的要求。为了满足这些要求,科学家对各种制造工艺进行了大量的相关研究<sup>[1-4]</sup>。

本文从简化工艺参数、提高控制的可行性出发,

收稿日期:2005-09-28。

项目基金:国家自然科学基金重点项目(No.50235040)资助。

作者简介:易子旭(1983-),男,硕士研究生,主要研究方向为光电子器件制造理论和机电控制。

在到达一个较小的预定分光比之后就停止拉伸,只单独进行加热,通过熔融时光纤纤芯里固有的 Ge<sup>2+</sup>的热扩散来继续光耦合并达到最终的分光比。在这个只熔融不拉伸的过程中,可以通过动态调整气体流量来调节火焰温度,这将使得分光过程更为平缓从而提高耦合器的性能及其可靠性。

## 2 耦合原理

2×2 单模光纤耦合器可看作是两个锥体相互靠近形成的,其基本结构如图 1 所示。它的基本思想是:相耦合的两波导中的场,各自保持了该波导独立存在时的场分布和传输系数,耦合的影响表现在场的复数振幅的沿途变化。设两波导中的复数振幅为  $A_1(z)$  和  $A_2(z)$ 。由于耦合作用,它们沿途变化。其变化规律可用两联立的一阶微分方程组表示<sup>[1-3]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dA_1(z)}{dz} = i(\beta_1 + C_{11})A_1 + iC_{12}A_2 \\ \frac{dA_2(z)}{dz} = i(\beta_2 + C_{22})A_2 + iC_{21}A_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $A_1$ 、 $A_2$  分别是两根光纤的模场振幅; $\beta_1$ 、 $\beta_2$  是两根光纤在孤立状态下的传播常数; $C_{ij}$  是耦合系数。他们都是传播方向  $z$  的函数。当两根光纤相同时, $\beta_1 = \beta_2$ ,  $C_{12} = C_{21} = C$ ,于是方程(1)的解析解为:

$$\begin{cases} A_1(z) = [A_1(0)\cos(Cz) + iA_2(0)\sin(Cz)]\exp(i\beta z) \\ A_2(z) = [A_2(0)\cos(Cz) + iA_1(0)\sin(Cz)]\exp(i\beta z) \end{cases} \quad (2)$$

将上式归一化处理,且令  $P_1$  为直通臂中的光功率, $P_2$  为耦合臂中的光功率,可得:

$$\begin{cases} P_1 = \cos^2(CL) \\ P_2 = \sin^2(CL) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $L$  为耦合区的有效相互作用长度,也可以近似为熔融拉伸长度; $C$  为耦合系数。

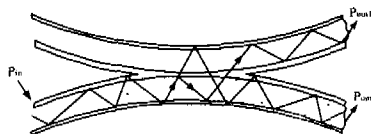


图 1 2×2 单模光纤耦合器

2x2 单模光纤耦合器的改进控制方法

其中:

$$C = \frac{(2\Delta)^{1/2} U^2 K_0 (Wd/r)}{rV^3 K_1^2 (W)} \quad (4)$$

上式中,  $r$  是光纤半径,  $d$  是两光纤中心的间距,  $U$  和  $W$  是光纤的纤芯和包层参量,  $V$  是孤立光纤参量,  $K_0$  和  $K_1$  是零阶和一阶修正的第二类贝塞尔函数。

由于含有贝塞耳函数, 式(4)相对比较复杂, 可简化如下:

$$C = \frac{V\lambda}{4n_0 a^2} \exp[-c_0 + c_1 \bar{d} + c_2 \bar{d}^2] \quad (5)$$

式中,  $a$  是纤芯半径,  $\bar{d} \equiv d/a$ ,  $d$  为两纤芯间的距离。常数  $c_0, c_1, c_2$  依赖于  $V$ 。

在耦合器的制作过程中, 先进行熔融拉锥, 到待一定分光比分停止拉伸, 只用火焰加热。在这个后加热过程中,  $L$  成为了定值, 那么  $P_1, P_2$  仅仅依赖于  $d$  变化, 它们的关系如图 2 所示。

由图 2 可见, 只熔融不拉伸时, 直通臂和耦合臂的输出功率是周期振荡变化的, 其振荡周期随着时间增加而不断减小。因此, 在单纯的控制加热时间的情况下也可以得到预定耦合比的不同产品。

### 3 改进的熔融拉锥控制方法及其实现

#### 3.1 工艺分析

熔融拉锥制造过程主要包括加热时间、拉伸速度、加热温度、预设分光比系数等一系列重要参数。这些工艺参数集中体现了耦合器制造技术的复杂性与经验性, 直接决定着光纤耦合器的质量和成品率。传统的常规耦合器制造过程如图 3。

通过常规过程制作的耦合器具有明显变细的拉锥区, 因此耦合区的应力比较集中, 容易发生断裂, 从而导致可靠性降低。另外, 到达预设分光比后, 同时停止拉伸和加热, 分光比仍然有一定的变化, 这种变化使得实际的分光比误差较大。

当距离实际分光较远时停止拉伸, 只单独进行加热。由于没有收到横向的拉锥力, 直径的变化趋于缓慢。在熔融区域内, 一方面, 光纤纤芯里固有的  $Ge^{2+}$  的热扩散现象使得

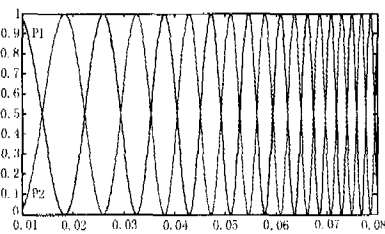


图 2  $P_1, P_2$  与  $d$  的关系

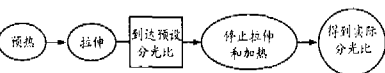


图 3 传统拉锥工序

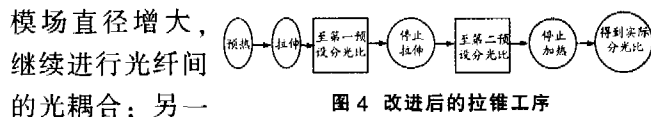


图 4 改进后的拉锥工序

模场直径增大, 继续进行光纤间的光耦合; 另一方面, 分光比的变化只受加热的单方面影响, 这将使得该过程更容易控制, 从而得到更精确的分光比。改进后的熔融拉锥过程如图 4 所示。

#### 3.2 程序实现

以 PC 作为上位机, 基于 VC++, 通过专用运动控制卡对电机进行控制, 从而完成工艺动作。系统启动后, 用户通过菜单执行各种操作。系统软件采用模块化设计, 各个模块按功能进行划分, 不同模块可单独编辑、编译, 它们相互之间通过参数或数据文件来传递信息。同时, 系统软件划分为界面层、编译层、控制层和辅助层, 各部分的操作相对独立。为了方便操作人员操作, 系统设计了友好的操作界面, 它可以实时的显示各个轴的位置信息以及分光比和光功率损耗值。部分程序代码如下:

```
void CEasyColdDlg::OnLocate()
{
    //1.WZ 轴定位
    card=0x300;
    axis=0;
    motion=3;
    backlash=par[24];
    mm=par[25];
    nn=par[26];
    startvel=par[27];
    acc=par[28];
    lastvel=par[29];
    targetpos=0;
    Operation();
    UpdateData(true);
    status=mpc2004_read_pos(card,axis,&currentpos);
    m_wzCurrentPos=currentpos;
    UpdateData(false);
    while((currentpos!=0)&&(status==0))
    {
        status =mpc2004_read_axis_status (card, axis,
        &ACT_rdy, &POS_ok, &DEC_ok);
        //读 WZ 轴的状态
        Exception(status);
        status =mpc2004_read_pos (card,axis,&current-
        pos);
    }
}
```

Exception(status);

```

}
.....
}
    
```

## 4 制备及实验

### 4.1 制备

选用康宁 SMF28 光纤, 在耦合段剥去 20~30mm 的涂覆层并进行清洁处理, 绞合后置于精密夹具中, 使其紧密接触。在光纤耦合器的控制过程中, 光功率探测器将探测到的光功率转换成电信号, 经过数模转换电路转换成数字信号并传送到计算机系统。这样来实现分光比的实时监测。通过在线监测, 熔融过程中的能量耦合情况清晰可见。拉锥机通过 6 个步进电机来实现 6 个自由度的运动。运行自动控制程序, 耦合器的制作步骤是: 首先, 火焰熔烧两根光纤, 并利用夹具使两根光纤向两侧拉伸。当耦合器的耦合端的功率实时显示的分光比达到第一预定分光比后停止拉伸, 只用火焰熔融两根光纤。随着耦合端的继续熔融, 直通臂的功率  $P_1$  下降的速度和耦合臂功率  $P_2$  上升的速度都趋于平缓, 计算机在达到第二预定分光比时火焰头退出。此时的耦合段极易损坏, 为此必须立即安装石英玻璃基体以保护耦合段, 然后从夹具上卸下, 进行性能测试。如性能符合要求, 即可安装壳体, 成为可供使用的 2x2 单模光纤耦合器。

### 4.2 实验比较

表 1 为用熔融拉锥法和改进拉锥法制作的 3dB 耦合器的耦合区的直径。由表 1 可以看出熔烧法制作的 3dB 耦合器耦合区的直径明显粗于熔融拉锥法制作的耦合器, 故可靠性将优于后者。

## 5 2x2 单模光纤耦合器的性能测试

耦合器性能测试框图如图 5 所示, 本实验利用安捷伦公司的 Agilent 86142B 型光谱仪和 Agilent 86142B 型可调谐光源搭建测试系统。

耦合器的主要性能参数有附加损耗和分光比, 附加损耗是所有输出端口的光功率总和相对于全部输入光功率的减小值。该值以分贝 (dB) 表示的数

表 1 耦合区直径比较

直径 ( $\mu\text{m}$ )	#1	#2	#3	#4	#5
传统拉锥法	8.5	7.2	6.8	8.5	9.0
改进拉锥法	11.4	10.6	9.9	10.1	9.8

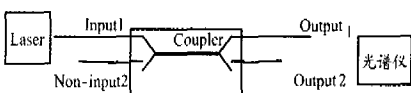


图 5 光纤耦合器性能测试图

学表达式为:

$$E.L = -10 \lg \frac{\sum P_{out}}{P_{in}} \text{ (dB)} \quad (6)$$

本文以改进的熔融拉锥法制作的 3dB 单模光纤耦合器为试验对象。实验数据(表 2)表明其附加损耗远小于 0.1dB, 达到了通信系统用 2x2 单模光纤耦合器的性能指标, 同时此种耦合器还具有良好的光谱特性。

表 2 2x2 单模光纤耦合器测试结果

编号	#1	#2	#3	#4	#5
附加损耗 (dB)	0.04	0.04	0.01	0.03	0.05

## 6 结论

我们对 2x2 单模光纤耦合器的只加热不拉伸过程进行了理论分析, 该过程完全可以实现光纤的耦合, 还可以提高控制的精确度, 较大的锥区将大大提高耦合器的环境可靠性。同时, 还介绍了改进后的光纤耦合器的制作工序以及该方法的程序实现。我们利用高精密光学仪器搭建了测试系统, 通过大量的试验表明, 此种耦合器性能不仅达到了光纤通信用光纤耦合器的性能标准, 而且在一定程度上有所提高。本文对耦合器制作过程的控制和提高耦合器性能有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] 姚维夏. 光纤耦合器制造设备的微机控制系统[J]. 集美大学学报, 1996, 1(2): 20-24.
- [2] NTT Opto-electronics Laboratories. Tokai-mura Thermodynamic analysis of WDM fiber couplers fabricated by using a microheater [J]. Journal of Non-Crystalline Solids 1996, (202): 272-278.
- [3] ABEBE M, CARL, VILLARRUEL A. Reproducible Fabrication Method for Polarization Preserving Single-Mode Fiber Couplers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1988(6): 1191-1198.
- [4] 吕迅, 官洪运. 熔融拉锥控制系统的改进[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2003(2): 597-600.
- [5] 杨伟. 光纤无源器件技术发展趋势[J]. 宽带世界, 2003(3): 38-40.
- [6] 陈华山. 耦合器最佳封装之研究. 国立中山大学光电工程研究所, 1999, 6: 2-6.
- [7] 李玲, 黄永清. 光纤通信基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999
- [8] 宋金声. 光纤无源器件的技术概况和发展趋势[J]. 电子元件与材料, 1998(17): 19-22.
- [9] 魏道平, 赵玉成. 新型 2x2 单模双锥光纤耦合器的研制[J]. 北方交通大学学报, 1998, 22(3): 35-38.
- [10] SHUAI Ci-jun, DUAN Ji-an. Effect of Technology Parameters on performance and Structural Shape of Fused Biconical Taper, 7th ICPMT, 2004 (7): 46-49.