

全光纤型分支器件系列产品的研制

林光, 李志元, 陈锐

(杭州永翔光电子有限公司, 浙江 杭州 311251)

[摘要] 主要介绍了全光纤型分支器件系列产品的分类及技术要求, 讨论了全光纤型分支器件的熔融拉锥工艺及全光纤型分支器件的耦合机理、技术关键、研制结果和产品水平。

[关键词] 分支器; 耦合器; 波分复用器

[中图分类号] TN253 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1006-1908(2002)03-0021-05

The development of all optical fiber branching devices series products

LIN Guang, LI Zhi-yuan, CHEN Rui

(Hangzhou Flying Optoelectronics Technology, Co., Ltd., Hangzhou 311251, Zhejiang, China)

Abstract: The classification and specifications of all optical fiber branching devices series products are introduced. The coupling mechanism, fused biconical taper technology and key technical points for the all optical fiber devices are expounded. At last the results and technical level of the product developed is introduced.

Key words: branching devices; coupler; wavelength division multiplexer

1 前言

光无源器件是光纤通信设备的重要组成部分,也是光纤传感和其它光纤应用领域不可缺少的光器件。在光无源器件中光分支器件又占有举足轻重的地位。近年来随着光纤通信、光纤用户网、光纤CATV、无源光网络(PON)、光纤传感技术等领域的迅猛发展,光分支器件的应用也越来越广泛。本文主要介绍全光纤型分支器件的分类及技术要求,全光纤型分支器件的熔融拉锥工艺(Fused Biconical Taper, FBT)、耦合机理、技术关键、研制结果和产品水平。

2 全光纤型分支器件的分类及技术要求

根据2001年7月1日开始实施的中华人民共和国通信行业标准YD/T 1117-2001《全光纤型分支器件技术条件》有关定义:全光纤型分支器件是光信号传输通路全部由通信石英光纤构成的光器件。

光纤分支器件是在两根或两根以上光纤之间实现信号的耦合及再分配的光无源器件。

全光纤型分支器件主要分为光纤宽带耦合器、光纤波分复用耦合器两大系列产品。前者也称为“非波长选择光分支器件”,用于实现特定波段光信号的功率耦合及再分配;后者也称为“波长选择性光分支器件”,用于实现两个不同波长光信号的复用和解复用。

光纤宽带耦合器按工作窗口可分为单窗口宽带和双窗口宽带;按工作形态可分为树型($1 \times N$)和星型($N \times N$);按引出端口的组态可分为尾纤型和连接器型。

熔融拉锥型光纤波分复用耦合器通常为两波长复用/解复用器件,主要有1310nm/1550nm, 980nm/1550nm, 1480nm/1550nm。表1至表3给出了光纤宽带耦合器的光学性能,表4给出了光纤波分复用耦合器的光学性能。全光纤型分支器件环境和机械性能试验项目有:振动试验、冲击试验、湿热试验、高温试验、低温试验、高低温试验、光缆抗拉试验、光缆扭转试验、水浸泡试验,要求试验后插入损耗变化量 $\Delta IL \leq 0.1 \log_2 N$ (dB), N 为分支数。

[收稿日期] 2002-01-08

[作者简介] 林光(1941—),男,福建省福州市人,杭州永翔光电子有限公司总工程师。

表1 1×2或2×2光纤宽带耦合器光学特性

| 性能参数 | 指标要求 | |
|----------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| | 单窗口宽带 | 双窗口宽带 |
| 工作波长 λ/nm | 1310 或 1550 | 1310 和 1550 |
| 工作带宽/nm | ±40 | ±40 |
| 分光比 | 1/99 到 50/50 | 1/99 到 50/50 |
| 插入损耗/dB | ≤0.2 | ≤0.3 |
| 附加损耗/dB | ≤22.4-11.0× lg(100P) ¹⁾ | ≤24.0-11.8× lg(100P) |
| 均匀性/dB ²⁾ | ≤0.9 | ≤1.2 |
| 方向性/dB | ≥55 | ≥55 |
| 偏振相关损耗/dB | ≤0.3 | ≤0.3 |
| 最大承载功率/mW | 300 | |
| 工作温度/°C | -40~+85 | |

注:上述指标针对0.25mm尾纤型耦合器,不包括连接器损耗。

1) P 是以百分比表示的相关一端的光功率百分数。如某一端的光功率为50%,则附加损耗=22.4-11.0×lg(100×50%)=3.7dB。

2) 针对均匀分光器件。

表2 1×N(N>2)树型光纤宽带耦合器光学特性

| 性能参数 | 指标要求 | |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | 单窗口宽带 | 双窗口宽带 |
| 工作波长 λ/nm | 1310 或 1550 | 1310 和 1550 |
| 工作带宽/nm | ±40 | ±40 |
| 插入损耗/dB ^{1),2)} | ≤0.5+3.5× log ₂ N | ≤0.6+3.6× log ₂ N |
| 均匀性/dB ²⁾ | ≤1.0+0.7× log ₂ N | ≤1.5+0.7× log ₂ N |
| 方向性/dB ¹⁾ | ≥55 | |
| 偏振相关损耗/dB ¹⁾ | ≤0.1(1+log ₂ N) | |
| 最大承载功率/mW | 300 | |
| 工作温度/°C | -40~+85 | |

注:1) 不包括连接器损耗。

2) 针对均匀分光器件。

3 FBT 工艺及全光纤型分支器件的耦合机理

3.1 FBT 工艺

我们制作全光纤型分支器件采用的是熔融拉锥法,这种方法就是将两根(或两根以上)除去涂覆层

表3 N×N(N>2)星型光纤宽带耦合器光学特性

| 性能参数 | 指标要求 | |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | 单窗口宽带 | 双窗口宽带 |
| 工作波长 λ/nm | 1310 或 1550 | 1310 和 1550 |
| 工作带宽/nm | ±40 | ±40 |
| 插入损耗/dB ^{1),2)} | ≤0.5+3.5× log ₂ N | ≤0.9+3.6× log ₂ N |
| 均匀性/dB ²⁾ | ≤1.0+0.7× log ₂ N | ≤1.5+0.7× log ₂ N |
| 方向性/dB ¹⁾ | ≥55 | |
| 偏振相关损耗/dB ¹⁾ | ≤0.1(1+log ₂ N) | |
| 最大承载功率/mW | 300 | |
| 工作温度/°C | -40~+85 | |

注:1) 不包括连接器损耗。

2) 针对均匀分光器件。

表4 光纤波分复用耦合器光学特性

| 性能参数 | 类型1 | 类型2 | 类型3 |
|-----------|-----------|-----------|----------|
| 工作波长 λ/nm | 1310/1550 | 1480/1550 | 980/1550 |
| 工作带宽/nm | ±15 | ±5 | ±10 |
| 插入损耗/dB | ≤0.3 | ≤0.5 | ≤0.4 |
| 波长隔离度/dB | ≥18 | ≥15 | ≥18 |
| 方向性/dB | ≥55 | ≥55 | ≥55 |
| 回波损耗/dB | ≥40 | ≥40 | ≥40 |
| 偏振相关损耗/dB | ≤0.15 | ≤0.2 | ≤0.15 |
| 最大承载功率/mW | 300 | | |
| 工作温度/°C | -40~+85 | | |

注:1) 上述波分复用耦合器均为单级(非级连)基本型器件,全光纤结构;

2) 插入损耗值为0.25mm尾纤型器件指标,不包括连接器损耗;

3) 回波损耗指器件本身的指标,若端口为连接器,则连接器回波损耗须优于40dB。

的光纤以一定方式靠拢,在氢氧焰高温下相互熔融,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,以实现光功率耦合。

双锥体可使输入光从一根光纤按比例进入另一根光纤中,通过检测光纤输出端口光功率,设定所需

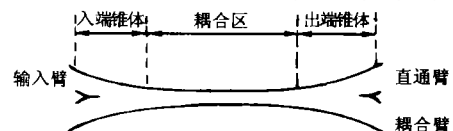


图1 熔融拉锥光纤耦合器示意图

的功率分配比例(分光比),整个熔融拉锥过程由计算机全程监控。通过精确控制各种过程参数,制作各种全光纤型分支器件。

3.2 宽带耦合器的耦合机理

熔融拉锥型全光纤耦合器工作原理如图1所示。众所周知,在单模光纤中传导模是对于第一高次模的截止特性,模归一化频率为 $\nu_c(LP_{11}) = 2.40483$ 。如果光纤中只传输 LP_{01} 模,则要求归一化频率为:

$$0 < \nu < 2.40483 \quad (1)$$

由光纤传输原理可知,归一化频率为:

$$\nu = 2\pi a(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} / \lambda \quad (2)$$

式中 a 为纤芯半径, n_1 为纤芯折射率, n_2 为包层折射率。 ν 值不但决定光纤中传输的模式,而且还决定纤芯和包层的功率分布, ν 值越小,则纤芯中的功率所占份额越小。

当传导模进入熔锥区时,随着纤芯的不断变细, ν 值逐渐减小,有越来越多的光功率进入到包层中。这时光功率是在由包层作为芯,包层外介质(一般是空气)作为新的包层的复合波导中传输。由于两光纤包层熔并在一起,纤芯是足够逼近,形成弱耦合,将一根光纤看作是另一根光纤的扰动,在弱导近似下,并假设光纤无吸收,则有耦合方程组:

$$\begin{aligned} \frac{dA_1(z)}{dz} &= i(\beta_1 + C_{11})A_1 + iC_{12}A_2 \\ \frac{dA_2(z)}{dz} &= i(\beta_2 + C_{22})A_2 + iC_{21}A_1 \end{aligned} \quad (3)$$

式中 A_1 、 A_2 分别是两光纤模场振幅, β_1 、 β_2 是两根光纤在孤立状态下的传播常数, C_j 是耦合系数。因自耦合系数可忽略,则 $C \approx C_{12} \approx C_{21}$,由此可以求得上述方程组满足 $z=0$ 时, $A_1(z) = A_2(0)$, $A_2(z) = A_2(0)$ 的解为:

$$\begin{aligned} A_1(z) &= \left\{ A_1(0)\cos\left(\frac{C}{F}z\right) + iF \right. \\ &\quad \left. \left[A_2(0) + \frac{\beta_1 - \beta_2}{2C}A_1(0) \right] \sin\left(\frac{C}{F}z\right) \right\} \exp(i\beta z) \\ A_2(z) &= \left\{ A_2(0)\cos\left(\frac{C}{F}z\right) + iF \right. \\ &\quad \left. \left[A_1(0) + \frac{\beta_1 - \beta_2}{2C}A_2(0) \right] \sin\left(\frac{C}{F}z\right) \right\} \exp(i\beta z) \end{aligned} \quad (4)$$

式中:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \\ F &= \left[1 + \frac{(\beta_1 - \beta_2)^2}{4C^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{耦合系数: } C = \frac{(2\Delta)^{\frac{1}{2}} U^2 K_0(Wd/r)}{rV^3 K_1^2(W)} \quad (6)$$

式(6)中 r 是光纤半径, d 是两根光纤中心的间距, U 和 W 是纤芯和包层参量, ν 是归一化频率, K_0 和 K_1 是零阶和一阶修正的第二贝塞尔函数。

$$\begin{aligned} U &= r(k^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2} \\ W &= r(\beta^2 - k^2 n_2^2)^{1/2} \\ \Delta &= (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2 \\ \nu &= krn_1(2\Delta)^{1/2} \\ k &= \frac{2\pi}{\lambda} \end{aligned} \quad (7)$$

设光功率由一根光纤注入,则初始条件为 $P_1(0) = 1$, $P_2(0) = 0$,于是

$$P_1(z) = |A_1(z)|^2 = 1 - F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F}z\right) \quad (8)$$

$$P_2(z) = F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F}z\right)$$

当两根光纤相同时,有 $\beta_1 = \beta_2$,由式(5)中 $F^2 = 1$,则上式就变成:

$$\begin{aligned} P_1(z) &= \cos^2(Cz) \\ P_2(z) &= \sin^2(Cz) \end{aligned} \quad (9)$$

这就是标准熔融拉锥单模光纤耦合器功率耦合比与拉伸长度的关系式,图2直观地显示了两者的关系。

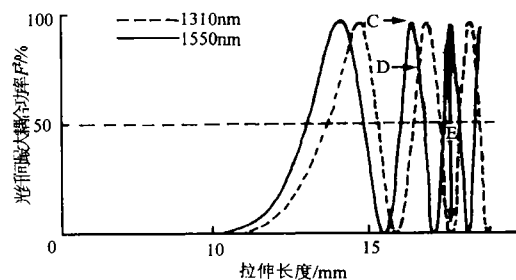


图2 耦合比与拉伸长度的关系

由图2可知,如拉伸终止点在C点,所获得的器件将对波长最不敏感,拉伸终止点跃过C点,则器件对于波长敏感性逐渐增大,如果能使C点处于我们所希望的分光比的位置,就能在相应的中心波长获得最大的工作带宽,这就是所谓的“单窗口宽带耦合器”。如果将拉伸终止点选在D点,就可以改善两个中心波长的工作带宽,获得所谓的“双窗口宽带耦合器”。

这项技术的关键点就是能够将C点或D点调整到我们所希望的功率分配位置,实质上就是要使两根光纤之间不完全功率转换,即光纤间的最大耦合功率 $F^2 < 1$ 。由式(5)可知,当两根光纤的传播常

数 β_1 与 β_2 不相同,可以保证 $F^2 < 1$,因此通过改变两根光纤的传播常数,可以实现宽带器件的制作。通常采用先将一根光纤进行预拉伸的方法来改变光纤的传播常数。

3.3 WDM 耦合器耦合机理

熔融拉锥型 WDM 耦合器是在上述理论的基础上发展起来的,由式(6)可知耦合系数 C 是波长的函数,故通过改变熔融拉锥条件,提高器件对波长的敏感性,达到图 2 中 E 点的状态,即两输出端以各自不同的波长全功率输出,这就是制作 WDM 耦合器的工作原理。其关键是要使器处于过耦合状态,器件的输出特性与波长的依存关系逐渐增强,以致形成振荡,使归一化耦合功率与波长的关系近乎呈正弦或余弦形式。

4 技术关键

1) 宽带耦合器的宽带特性

宽带耦合器具有下列关键指标:带宽、插入损耗、隔离度、偏振相关损耗、波长灵敏度。

实际上带宽与插入损耗以及波长灵敏度是息息相关的,为了提高宽带耦合器的工作带宽,必须降低宽带耦合器的波长灵敏度,以保证在整个带宽范围内宽带耦合器具有较低的插入损耗。用光谱分析仪可以很方便地看出宽带耦合器的插入损耗曲线是否平坦。

我们采用非对称的工艺改善宽带耦合器的波长敏感性,以提高工作带宽。在拉锥时控制好马达拉伸速度、火炬头高度、氢气流量以及拉伸长度这些参数,可使器件在 1270~1590nm 的 320nm 带宽内,插入损耗变化量 $\Delta IL < 0.4\text{dB}$ (如图 3 所示)。

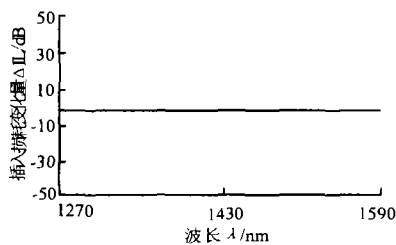


图 3 用光谱仪测得的宽带耦合器插入损耗

2) WDM 耦合器的波长隔离度

与宽带耦合器不同的是,我们要利用波长敏感性制作 WDM 器件。WDM 器件最关键的技术指标是波长隔离度,要提高 WDM 器件的波长隔离度,通常需要提高耦合比(理想值为 100%),如图 2 所示。由于不同波长的光,其耦合比与拉伸长度的关系

不一样,也就是说耦合的速度不一样,所以在制作 WDM 器件的时候,针对不同波长的光源,监控选择合适的耦合周期和拉伸长度,有助于提高波长隔离度。

3) 光源中心波长

用于监控耦合比和周期数的 LD 光源如果中心波长有偏差将不利于制作器件,尤其对于 WDM 器件的隔离度有很大的影响。因此,首要工作就是控制好 WDM 器件的中心波长,通常误差在 $\pm 5\text{nm}$ 范围内,比如说 1310nm/1550nm 型 WDM 器件,需要将其中心波长控制在 1305~1315nm/1545nm~1555nm。

4) 光纤类型的选择

单模光纤折射率分布有三种类型:凹陷包层光纤、上升包层光纤和匹配包层光纤,从上述耦合器机理可知,适当选用匹配包层光纤,其耦合效率最佳。此外,还要注意光纤性能,使器件达到较低附加损耗。

5) 环境条件

从耦合机理可知,空气已成为拉锥后新形成的波导结构的“包层”,故空气可直接影响器件性能,如不加以重视,则会对器件产生多方面严重后果。

6) 封装工艺

有的器件在拉锥工作台上产品性能尚可,但如不重视封装工艺,其结果可能会导致产品最终性能劣化,甚至变为废品。有些产品稳定性和可靠性变差,与封装工艺不无直接关系。

此外,还要注意填充材料的选择,凡是与光纤接触的材料,其折射率应当低于光纤的折射率;由于光纤固化胶、塑料套管、不锈钢管等材料的温度系数差别很大,故选材要十分慎重。

5 质量控制

质量是市场竞争获胜的一把利器,面对日趋激烈的市场竞争,提高和控制产品质量是企业制胜的

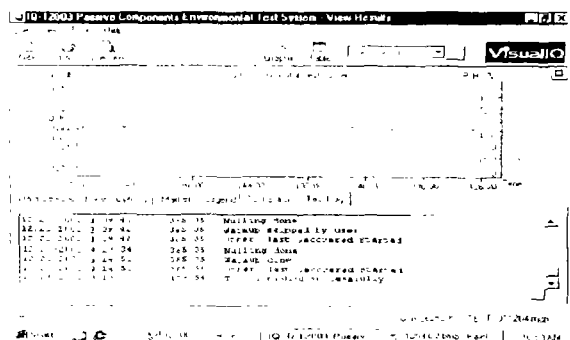


图 4 宽带耦合器环境测试结果

法宝。我们拥有从 Agilent、ANDO、Advantest、JDS、EXFO 等国外著名公司进口的一整套生产、检测和实验设备,并严格执行 Telcordia GR-1209 Core 标准,以确保产品性能优异。从图 4 可见,在 $-40\sim+75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\%\sim 80\%$ 相对湿度下,进行 42 次循环 14 天老化试验后,宽带耦合器插入损耗变化 ΔIL 小于 $\pm 0.07\text{ dB}$ 。

6 研制结果及产品水平

表 5 1×2 宽带分支耦合器(分光比 5/95 的双窗口宽带)

| 项目 | 永翔光电子 | | JDS | | Oplink | |
|--------------------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|
| 工作波长 λ/nm | 1310/1550 | | 1310/1550 | | 1310/1550 | |
| 带宽/nm | ± 40 | | ± 40 | | ± 40 | |
| 方向性/dB | >60 | | >55 | | >55 | |
| 等级 | P | A | P | A | P | A |
| PDL/dB | <0.15 | | — | | 0.15 | |
| 插入损耗/dB | 13.70 ± 0.35 | 14.6 ± 0.5 | 14.6 ± 0.4 | 18.9 ± 0.5 | 15.20 ± 0.45 | 18.0 ± 0.5 |

表 6 1×2 超低偏振宽带耦合器(分光比 50/50)

| 项目 | 永翔光电子 | | Oplink | |
|--------------------------|----------|------|----------|------|
| 工作波长 λ/nm | 1550 | | 1550 | |
| 带宽/nm | ± 40 | | ± 40 | |
| 方向性/dB | >55 | | >55 | |
| 等级 | P | A | P | A |
| PDL/dB | 0.04 | 0.05 | 0.03 | 0.05 |
| 插入损耗/dB | 3.6 | 3.8 | 3.4 | 3.7 |
| 均匀性/dB | 0.6 | 1.0 | 0.5 | 0.8 |

注:JDS 同类产品作者未见报道。

过 60dB,保证了传输信号的定向性,并极大地减小了线路之间的串扰。

3) 良好的环境稳定性。在 $-40\sim+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,器件仍能稳定工作。

7 其它新产品研制

光纤偏振分束器是将输入光分成两个正交偏振输出光的全光纤型器件,这种器件在一定波长范围内可取代由块晶体材料制作的偏振分光棱镜,在光纤通信、光纤传感、光纤测量方面具有很好的应用前景。

光纤偏振合波器可将同一波长正交的两束光耦

经过半年时间的研制和批量生产,我们所生产的全光纤型分支器件系列产品,包括超低偏振相关损耗(PDL)宽带耦合器等在内的 12 个品种,达到国外先进水平,部分产品性能指标对比如表 5~表 7 所示,表中 P 表示特级,A 表示一级。

实践证明,我们用熔融拉锥法制作的全光纤型分支器件具有下列特点:

1) 低附加损耗。通常用这种方法制作的器件附加损耗可低于 0.5dB。

2) 方向性好。这类器件的方向性指标一般都超

表 7 1310nm/1550nm 光纤波分复用耦合器

| 项目 | 永翔光电子 | | JDS | | Oplink | |
|--------------------------|-----------|------|-----------|------|-----------|-----|
| 工作波长 λ/nm | 1310/1550 | | 1310/1550 | | 1310/1550 | |
| 带宽/nm | ± 15 | | ± 20 | | ± 15 | |
| 方向性/dB | >60 | | >60 | | >55 | |
| 等级 | P | A | P | A | P | A |
| PDL/dB | 0.1 | 0.15 | 0.1 | 0.15 | <0.1 | |
| 插入损耗/dB | 0.25 | 0.35 | 0.4 | 0.6 | 0.3 | 0.5 |
| 波长隔离度/dB | 19 | 18 | 16 | 15 | 17 | 16 |

合到一个光纤输入端,在光纤放大器,特别是在 Raman 光纤放大器中具有很大的用途。

我们通过不断的摸索实践,掌握了熔融拉锥技术的一些难点技术,并成功研制出光纤偏振分束器/合波器(PBS/PBC),分束消光比 $\rho\geq 15\text{ dB}$,插入损耗 $\alpha\leq 0.05\text{ dB}$ 。

[参 考 文 献]

- [1] 林学煌. 光无源器件[M]. 北京:人民邮电出版社, 1998.
- [2] 信息产业部电信传输研究所. 通信技术标准汇编[M]. 北京:中国标准出版社, 2000.
- [3] YD/T 1117-2001,全光纤型分支器件技术条件[S].