

文章编号: 0258-7025(2001)08-0757-04

高分光比光纤零耦合器临界耦合特性的理论分析与实验论证*

李佟 彭江得 刘小明 刘丹
(清华大学电子工程系 北京 100084)

提要 对光纤失配非对称耦合器中的模式耦合特性进行了理论和实验研究,给出了两光纤失配量的临界判据 $r_2/r_1 = 0.62 \sim 0.63$,指出当失配度超过此下限后,因出现高阶模的耦合而降低分光比。合理控制失配量,研制出分光比为 $5 \times 10^3 \sim 10^5$,损耗为 0.1~0.2 dB 的光纤零耦合器。

关键词 零耦合器, 光纤, 失配

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

Experimental and Theoretical Study on the Critical-coupling Characteristic of Fiber Null Coupler with High Splitting Ratio

LI Tong PENG Jiang-de LIU Xiao-ming LIU Dan
(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The mode coupling characteristic in the asymmetrical coupler is studied theoretically and experimentally. The critical fiber mismatch criterion of $r_2/r_1 = 0.62 \sim 0.63$ is given. It is shown that when the fiber mismatch exceeds the limit, higher order mode coupling occurs and the splitting ratio decreases. By controlling the fiber mismatch properly, the fiber null coupler with splitting ratio of $5 \times 10^3 \sim 10^5$ and loss of 0.1~0.2 dB is made.

Key words null coupler, fiber, mismatch

1 引言

近年来,光纤零耦合器因其在波分复用(WDM)高速光通信网络中作为可调分插复用器和光开关的潜在应用而引起人们的关注^[1]。由于它是全光纤器件,与光纤系统具有很好的兼容性,插入损耗极低;另外,它采用与传统熔烧型耦合器类似的工艺,技术较为成熟,成本低廉。新近报道在光纤零耦合器腰区刻制光栅,成功实现了上/下信道的功能,效率可达90%以上^[2],但波长调谐范围有限;而利用在光纤零耦合器腰区加声波的可调光纤声光滤波器^[3],切换速度较快,波长调谐范围宽,具有重要实用前景。为避免实际光纤系统中信道间的交叉互扰,实现低损耗、高消光比的光纤零耦合器是这类光纤声光滤波器的关键,而高消光比的获得又取决于构成

非对称耦合器的两根光纤失配量的严格控制。

本文对光纤失配非对称耦合器中的模式耦合特性进行了理论和实验研究,给出了构成零耦合器的两光纤失配量的临界判据 $r_2/r_1 = 0.62 \sim 0.63$,指出当失配度超过此下限后,非对称耦合器中因出现高阶模式的耦合而降低分光比,研制出分光比为 $5 \times 10^3 \sim 10^5$,损耗为 0.1~0.2 dB 的光纤零耦合器。

2 理论分析

图1所示为由两根单模光纤构成的熔烧型耦合器,进入一根光纤的光将同时激发腰区的两个最低阶模式,其过程可以用下面的表达式来描述^[4]

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{\xi}{\sqrt{1+\xi^2}} \phi_{01} + \frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}} \phi_{11} \\ \phi_2 &= \frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}} \phi_{01} - \frac{\xi}{\sqrt{1+\xi^2}} \phi_{11} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 ϕ_1 和 ϕ_2 为两光纤单独存在时的场, ϕ_{01} 和 ϕ_{11}

* 国家自然科学基金(项目号:69782003)资助项目。

收稿日期:2000-05-09;收到修改稿日期:2000-06-26

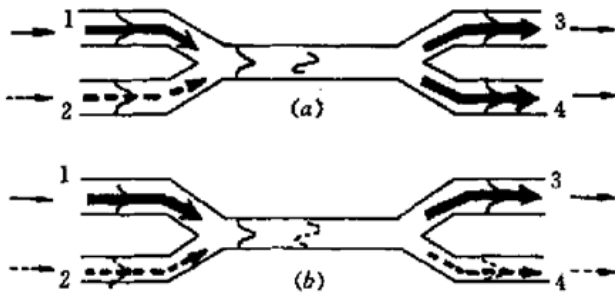


图1 光在耦合器中的演化
(a) 对称耦合器; (b) 零耦合器

Fig. 1 Evolution of light launched into fiber coupler
(a) symmetric coupler; (b) null coupler

为复合波导(耦合器腰区)的两个最低阶模式 LP_{01} 和 LP_{11} 的场, 它们的激发比例为

$$\xi = \frac{\beta_2 - \beta_1}{2C} + \frac{1}{F} \quad (2)$$

这里 β_1, β_2 为两光纤基模的传播常数, C 为 ϕ_1 和 ϕ_2 的耦合系数, F 由下式给出

$$F = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(\beta_2 - \beta_1)^2}{4C^2}}} \quad (3)$$

假设光从光纤 1 输入, 即在输入端 ($z = 0$) 处, $P_1(0) = 1, P_2(0) = 0$, 则两光纤输出功率与纵向耦合区长度 z 的关系为

$$\begin{aligned} P_1(z) &= 1 - F^2 \sin^2 \left[\frac{Cz}{F} \right] \\ P_2(z) &= F^2 \sin^2 \left[\frac{Cz}{F} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

可以看出, F^2 代表最大归一化耦合功率。利用(3)式, 由(4)式定义分光比为输入光功率与交叉路最大耦合光功率之比

$$\frac{P_{in}}{P_{2max}} = \frac{1}{F^2} = 1 + \left[\frac{\beta_2 - \beta_1}{2C} \right]^2 \quad (5)$$

对于两根相同的光纤, 有 $\beta_2 = \beta_1$, 则分光比 $F^{-2} = 1$, 这是常规对称耦合器的情况。对于两根失配的光纤, 当 $|\beta_2 - \beta_1| \gg |C|$ 时, 分光比 F^{-2} 可达到相当高的值。根据绝热理论, 从传播常数较大的光纤进入腰区的光主要激发腰区的基模 LP_{01} , 而从传播常数较小的光纤进入腰区的光将主要激发次高阶模 LP_{11} 。这样从某根光纤进入的光将从同一光纤输出, 两光纤模场间几乎不发生功率耦合, 故称之为零耦合器(Null Coupler)。如果在零耦合器的腰区施加一个周期微扰(如加载声波或刻写光栅), 当微扰周期 Λ 等于某一波长的光在腰区的两个最低阶模

式的拍长 $L_B(\lambda_0)$ 时, 则这两个模式将会发生耦合。这样, 从一根光纤进入耦合器的光将在腰区发生模式转换而从另一光纤耦合输出, 即可实现光信道的上/下或者开关。显然, 在微扰作用下的最大耦合效率是由零耦合器腰区激发的两模式的比例 ξ 决定的, 可见大的 ξ 对实现高消光比、低串扰器件至关重要。

从(2)式和(5)式可以看出, 无论光纤失配量 $|\beta_2 - \beta_1|$ 的增大或者耦合系数 C 的减小都会引起模场激发比 ξ 或耦合器分光比 F^{-2} 的提高。但是理论和实验都表明, 为了保证零耦合器在微扰作用下能实现有效的模式耦合, C 又不能太小。这样, 在 C 一定的情况下, 提高光纤失配度将是一种有效的方法。问题在于对光纤失配度有没有限制。

在零耦合器实际制作中, 为实现高的分光比并减小偏振相关性, 一般采用弱熔烧拉制, 即两根光纤基本保持自己原来的形态。当光纤拉伸成细锥后, 芯区的作用已经可以忽略, 则两根光纤便演变成能容纳多个包层模的波导, 而将零耦合器看成是由两光纤包层构成芯区、空气构成包层的复合波导。

从光纤波导的本征值方程出发:

$$\beta^2 v^2 \left[\frac{1}{U^2} + \frac{1}{W^2} \right]^2 = \left[\frac{1}{U} \frac{J'_v(U)}{J_v(U)} + \frac{1}{W} \frac{K'_v(W)}{K_v(W)} \right] \cdot \left[k_1^2 \frac{1}{U} \frac{J'_v(U)}{J_v(U)} + k_2^2 \frac{1}{W} \frac{K'_v(W)}{K_v(W)} \right] \quad (6)$$

其中 β 为传播常数, v 代表模场角向变化, 对于 LP_{01} 模, $v = 1$, 对于 LP_{11} 模, $v = 2$ 。 $U^2 = (k_1^2 - \beta^2) a^2$, $W^2 = (\beta^2 - k_2^2) a^2$, a 代表光纤包层的半径。分别求解光纤拉伸后在不同外径下 LP_{01} 和 LP_{11} 模的传播常数, 如图 2 所示。由图 2(a) 可见, 同一外径下, LP_{11} 的传播常数较小, 较细外径光纤的 LP_{01} 模与较粗外径光纤的 LP_{11} 模可能有相同的传播常数。图 2(b) 给出这种模场匹配情况下较粗光纤外径 r_1 与较细光纤外径 r_2 的对应关系, 实线和虚线分别表示 LP_{01} 模与 LP_{11} 模匹配以及 LP_{01} 模与 LP_{02} 模匹配时两光纤外径的对应关系。由图可见, r_1 和 r_2 二者之间基本满足线性关系, 当较细光纤与较粗光纤的外径之比 $r_2/r_1 = 0.62 \sim 0.63$ 时, 较细光纤的基模 (LP_{01}) 始终可以维持和较粗光纤中次高阶模 (LP_{11}) 的匹配; 而当 $r_2/r_1 = 0.46 \sim 0.47$ 时, 则会发生较细光纤的 LP_{01} 模和较粗光纤的 LP_{02} 模之间的完全耦合。很显然, 当预拉量进一步增加时, 还可能发生 LP_{01} 模与更高阶模的耦合。上述分析虽然是基于单波长, 但在模

式远离截止的情况下, 该结论对相当范围的波长都是适用的, 即与波长无关。

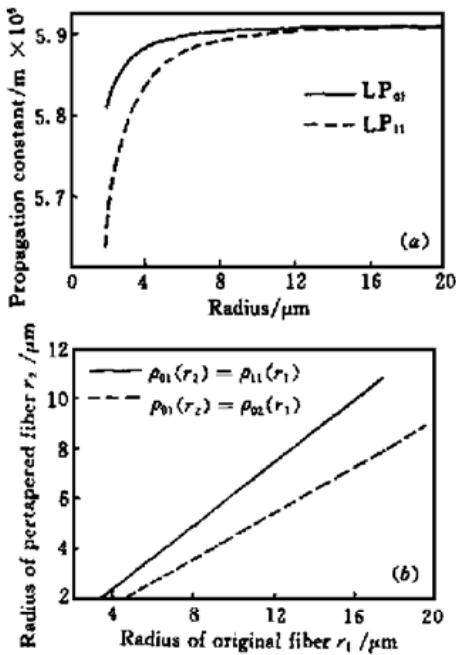


图 2 零耦合器模式及其耦合的理论计算曲线
(a) LP_{01} 模与 LP_{11} 模的传播常数;
(b) 模式匹配对应的外径关系

Fig. 2 Theoretical curve of the mode and coupling in null coupler
(a) propagation constant of LP_{01} and LP_{11} mode;
(b) mode-matching outer diameter ratio

3 实验结果

零耦合器的制作采用往返移动式氢氧焰火头熔烧拉制而成。光纤的失配是将一根光纤预拉伸而获得的。当预拉量较小时, 从预拉光纤通入单频(1550 nm)监测光, 在未预拉光纤输出端观测到部分耦合光输出。在熔烧温度一定的情况下, 改变光纤外径之比, 测得最大归一化耦合功率随外径失配的增大而减小, 如图 3 所示。由图可见, 在此实验温度下, 当 $r_2/r_1 < 0.8$ 时, 最大归一化耦合功率降到 0.01 以下, 分光比大于 100。

从图 3 曲线的趋势看, 随着外径失配的进一步增大, 功率耦合比似乎还将持续下降。但正如前面理论分析指出的, 当预拉光纤直径小到某一值时, 会出现基模与高阶模的耦合。图 4 (a) 给出光纤外径比 $r_2/r_1 = 0.624$ (预拉光纤外径 $78 \mu\text{m}$, 非预拉光纤外径 $125 \mu\text{m}$) 时耦合器熔拉过程中单频监测光的输出功率曲线。由图可见, 这时从非预拉光纤 (Cross) 确无耦合功率输出, 而从预拉光纤 (Bar) 的直通输出

功率却随拉伸而呈现周期性损耗调制, 这可解释为预拉光纤中的基模随着光纤的拉伸而与非预拉光纤的次高阶模发生周期性耦合而损耗掉。

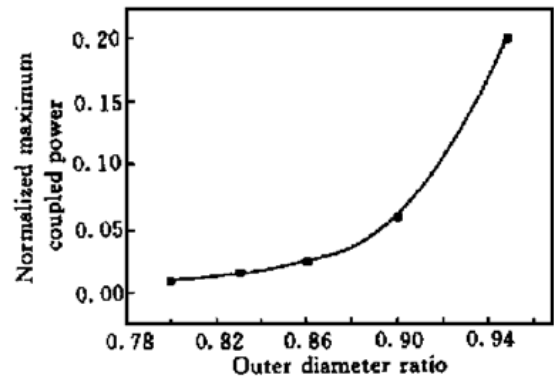


图 3 非对称耦合器最大归一化耦合功率与失配比的实验曲线

Fig. 3 Experimental curve of the relation between the maximum normalized coupled power and outer diameter ratio of null coupler

为说明这种损耗机制, 图 4 (b), (c) 给出宽谱光源分别从制成耦合器的预拉光纤和非预拉光纤输入时相应的输出光谱。虽然两种情况下在交叉路均无光功率耦合输出, 但图 4 (b) 表明从预拉光纤直通输出表现为随波长变化的损耗谱, 而图 4 (c) 则表明从非预拉光纤直通输出近乎平坦的透射谱。这是因为当光从预拉光纤输入时, 因其基模可与非预拉光纤中的次高阶模相匹配, 但非预拉光纤中耦合的次高阶模在经过后续熔烧过渡区时很难完全转化成基模输出, 这一耦合光功率的绝大部分都会在从腰区到后续锥区的传输过程中被损耗掉, 故直通输出光谱就呈现随波长变化的损耗谱, 而交叉路并无明显的光功率耦合输出。反之, 当光从非预拉光纤输入时, 因其基模传播常数大于预拉光纤中所有可能模式的传播常数, 不可能与预拉光纤中的任何模式匹配, 于是两光纤之间不存在任何功率耦合, 故直通输出平坦的透射谱, 交叉路亦无明显的光功率耦合输出, 即表现为类似正常零耦合器的特性。这就验证了前述理论分析关于零耦合器光纤失配度具有临界值 $r_2/r_1 = 0.62 \sim 0.63$ 的正确性。

上述实验表明, 为获得高分光比的零耦合器, 要求熔拉的两根光纤应有尽可能大的失配度; 但当失配外径比 r_2/r_1 低于 $0.62 \sim 0.63$ 时, 又会因发生基模与次高阶模的耦合而使预拉光纤的直通光产生损耗; 同时, 由于熔拉过程造成的光纤非对称性, 在过渡区总会有少部分次高阶模会转化成基模而从非预

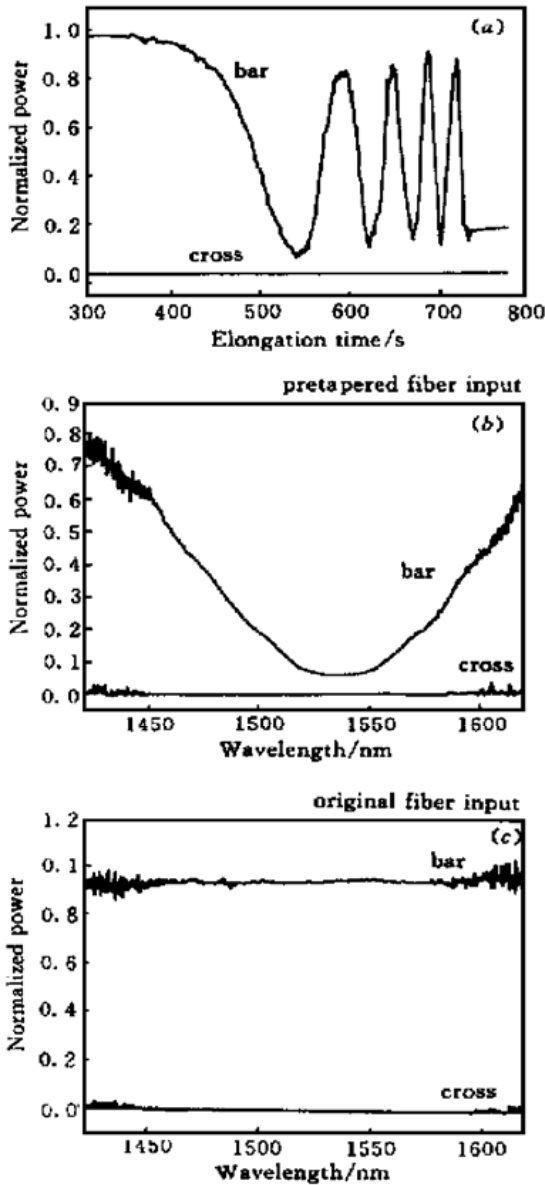


图4 光纤过失配非对称耦合器功率耦合特性实验曲线

(a) 非对称耦合器输出功率监测曲线; (b) 从预拉光纤输入的输出光谱; (c) 从非预拉光纤输入的输出光谱

Fig. 4 Experimental spectrum of over-mismatched asymmetrical coupler

(a) monitored output power during fabrication (light launched into pretapered fiber); (b) output spectrum (light is launched into pretapered fiber); (c) output spectrum (light is launched into original fiber)

拉光纤输出,这都会导致分光比降低。可见 $r_2/r_1 = 0.62 \sim 0.63$ 就确定了制作零耦合器光纤预拉量的下限。鉴此,实际制作零耦合器时,宜将光纤的预拉量控制在 $0.7 \sim 0.8$ 。

图5给出实验制作的超高分光比零耦合器的特性,光纤外径比 $r_2/r_1 = 0.72$ (预拉光纤外径 $90\mu\text{m}$,

非预拉光纤外径 $125\mu\text{m}$)。图5(a)是制作过程中单频监测光从预拉光纤输入时的输出光功率曲线,可见不存在模式转换。图5(b)是零耦合器的输出光谱特性,可见在 200nm 范围内光谱平坦,没有任何功率耦合或者模式转换。对固定波长而言,器件的分光比与耦合器长度有关,即与停止拉伸的时间有关。而拉伸停止的时间是相对随机的,故测量得到的器件最终分光比值分布在一个范围内,它在一定程度上反映式(5)定义的分光比。测得器件典型的最终分光比为 $5 \times 10^3 \sim 10^5$,损耗为 $0.1 \sim 0.2\text{dB}$ 。

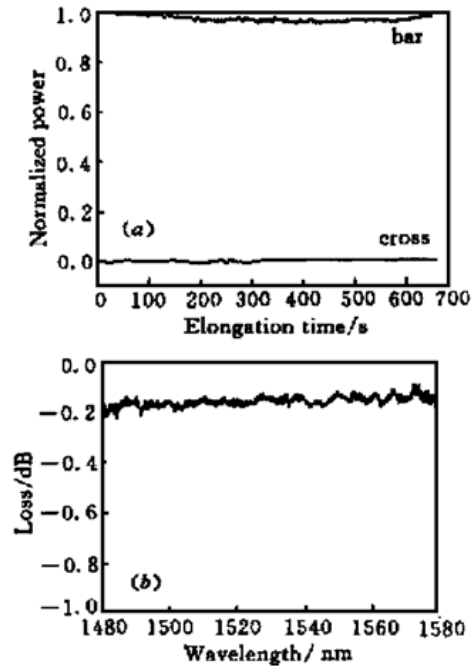


图5 超高分光比零耦合器功率耦合特性实验曲线 (a) 零耦合器输出功率监测曲线; (b) 零耦合器输出功率谱

Fig. 5 Spectrum of ultra-high splitting ratio null coupler

(a) monitored output power during fabrication; (b) output spectrum of null coupler

参 考 文 献

- 1 T. A. Birks, D. O. Culverhouse, S. G. Farwell *et al.*. 2×2 single mode fiber routing switch. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(10): 722~ 724
- 2 A. S. Kewitsch, G. A. Rakuljic, P. A. Willems *et al.*. All-fiber zero insertion-loss add-drop filter for wavelength division multiplexing. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(2): 106~ 108
- 3 D. O. Culverhouse, S. H. Yun, D. J. Richardson *et al.*. Low-loss all-fiber acousto-optic tunable filter. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(2): 96~ 98
- 4 A. W. Snyder, J. D. Love. *Optical Waveguide Theory*. London, England: Chapman and Hall, 1983