

熔融拉锥光纤耦合器波长响应研究*

夏益民, 黄明辉, 段吉安, 帅词俊, 苗健宇

(中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 基于变分理论, 分析了常规对称单模熔融拉锥光纤耦合器的腰部区域和梯度区域的耦合行为, 得出了耦合器耦合比与波长的关系, 并在熔融拉锥机的实验平台上进行了相应的波长响应实验, 理论和实验结果都表明: 在一定波长范围内, 耦合比不但对波长敏感, 且响应具有单调性。利用此特性, 光纤耦合器有望作为光波长敏感元件, 开发出结构简单、造价低廉的光波长探测器。

关键词: 光纤耦合器; 耦合比; 波长; 光波长探测器

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2005)12-0032-03

Research on wavelength response of fused-tapered optical fiber coupler

XIA Yi-min, HUANG Ming-hui, DUAN Ji-an, SHUAI Ci-jun, MIAO Jian-yu

(Coll of Mech and Elct Engin, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on variational calculus theory, the coupling behaviors of the waist zone and the trapezoidal zone of the common symmetrical fused-tapered optical fiber coupler have been analysed, and the correlation between coupling ratio and wavelength has been gotten, and the response experiment has been done on a fused biconical taper machine. The result indicates that in a certain range of wavelength, not only the coupling ratio is sensitive to wavelength, but also the function is monotonic. Using this characteristic, the optical fiber coupler may be used as a sensitive element of optical wavelength, which helps to develop a kind of optical wavelength detector, whose structure is simple and cost is low.

Key words: optical fiber coupler; coupling ratio; wavelength; optical wavelength detector

0 引言

熔融拉锥型光纤耦合器是一种光分路与合路的重要光无源器件, 它具有附加损耗低、方向性好、环境稳定性强、控制方法简单和生产成本低等特点, 广泛应用于光纤通信、光纤传感和信号处理等系统中^[1]。目前, 绝大部分光波长探测器的核心组成部分都离不开光栅, 这也是它的价格高的主要原因之一。经研究发现, 常规对称熔融拉锥型光纤耦合器的耦合比不但对波长敏感, 并且, 在一定波长范围内, 响应具有单调性, 若把它作为光波长敏感元件, 则可大大降低光波长探测器的成本。首先, 本文用变分理论推导出光纤耦合器耦合比与波长的关系式, 然后, 通过实验对其进行验证。

1 熔融拉锥光纤耦合器波长响应机理

单模熔融拉锥光纤耦合器是用熔融拉锥法制作而成的, 即将2根除去涂覆层的光纤以一定的方式靠拢, 在高温下熔融, 并同时顺轴线向两侧拉伸, 最终, 在加热区形成双

锥形式的特殊波导结构。图1可用来定性地表示熔融拉锥型光纤耦合器的工作原理。入射光功率在双锥体结构的耦合区发生功率再分配, 一部分光功率从“直通臂”继续传输, 另一部分, 则由“耦合臂”传到另一光路^[2,3]。

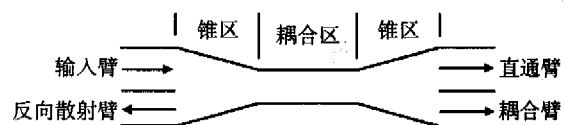


图1 光纤耦合器工作原理

Fig 1 Work principle of optical fiber coupler

图2为对称单模熔融拉锥型光纤耦合器中心区域横截面。对组合波导腰部区域(耦合区)作弱导和弱耦近似后, 在该段区域内组合波导横截面近似不变。耦合区两臂间主要功率交换发生在等效圆柱型平行波导内。该区长度可由拉锥长度控制。信号从一根光纤输入, 在独立光纤中传播时, 其模场分布为贝塞耳函数。耦合波是一种波导内2个最低次模的相拍, 该波导可认为是由包层与周围介质

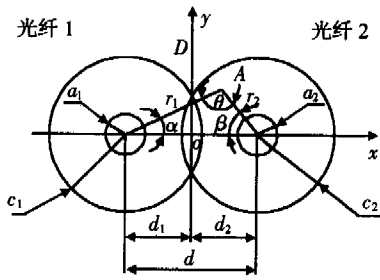


图 2 光纤耦合器腰部横截面

Fig 2 Cross section of waist zone of optical fiber coupler

形成的组合波导。原来在纤芯中的模场可认为是在组合波导中传播的,但由于纤芯经熔融拉锥后变得很细,其场分布近似为三角形分布,此场激发另一根光纤的模场,该模场也以三角形近似分布。上述三角形近似场有相当部分叠加,其最低次模取为叠加的同相模,第 2 个低次模取为叠加的反相模^[4]。

$$\Psi_+(x, y) = b_+ [(1 - r_1/c_1) + a_+ (1 - r_2/c_2)], \quad (1)$$

$$\Psi_-(x, y) = b_- [(1 - r_1/c_1) - a_- (1 - r_2/c_2)]. \quad (2)$$

式(1)与式(2)分别为同相模叠加和反相模叠加,其中

$$r_1 = [(x + d_1)^2 + y^2]^{1/2}, r_2 = [(x - d_2)^2 + y^2]^{1/2}, \quad (3)$$

$$d_1 = \frac{1}{2d}(d^2 - c_2^2 + c_1^2), d_2 = \frac{1}{2d}(d^2 + c_2^2 - c_1^2), \quad (4)$$

式中 d_1 和 d_2 分别为两光纤中心到坐标原点 o 的距离; d 为两光纤中心轴的距离; c_1 和 c_2 为两光纤纤芯的半径; r_1 和 r_2 为考察点 $A(x, y)$ 到两光纤中心的距离; a_+ 和 b_+ 为常数(“+”和“-”分别对应着同相模和反相模); Ψ_+ 和 Ψ_- 为传播模,且满足正交条件

$$\iint_{s_1+s_2} \Psi_+ \Psi_- dx dy = 0, \quad (5)$$

式中 s_1 和 s_2 分别为两光纤腰部区域的横截面。

假设 $\Psi = \Psi_z e^{j\beta z}$, 其中, β 为模式传播常数, z 为考察点 A 所在的横截面到耦合区起始端面(左侧)的距离。

组合波中, Ψ_+ 和 Ψ_- 为独立波导中基模的叠加,模场满足标量 Helmholtz 方程

$$\nabla^2 \Psi + n^2(x, y) k^2 \Psi = 0, \quad (6)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为自由空间中的波数, λ 为波长, $nm; n(x, y)$ 为折射率分布,联合式(3)解方程,得模式传播常数的变分表达式

$$\beta_{\pm}^2 = k^2 n_2^2 + \frac{I_1 + a_{\pm}^2 I_2 - [\pi(1 + a_{\pm})^2 \pm 2a_{\pm} I_p]}{\frac{\pi}{6} c_1^2 + a_{\pm}^2 \frac{\pi}{6} c_2^2 \pm 2a_{\pm} I}, \quad (7)$$

其中

$$I = \iint_B (1 - \frac{r_1}{c_1})(1 - \frac{r_2}{c_2}) dx dy, \quad (8)$$

$$I_p = \frac{1}{c_1 c_2} \iint_B \cos \theta dx dy, \quad (9)$$

$$I_n = \pi a_n^2 k^2 (n_1^2 - n_2^2) (1 - \frac{4a_n}{3c_n} + \frac{a_n^2}{2c_n^2}) \quad (n = 1, 2), \quad (10)$$

式中 B 为两光纤交叠部分; θ 为点 A 与两光纤轴线所成夹角; n_1, n_2 分别为纤芯折射率和包层折射率。

相应得耦合拍长

$$z_c = \frac{\pi}{\beta_+ - \beta_-}. \quad (11)$$

根据式(3)解出 a_+ 和 a_- , 从而求得 β_+, β_- 和 z_c 。

假设耦合器输入功率为单位功率(等于 1), 并且, 忽略附加损耗, 在 $z = z_c$ 时, 组合波导内的反相模经历了 π 相位的变化, 因此, 在 $z = z_c$ 点, 对耦合臂(光纤 2) 横截面积分可得耦合臂间最大可交换功率

$$\begin{aligned} P_{2max} &= \iint_{s_2} (\Psi_+ - \Psi_-)^2 dx dy \\ &= \iint_{s_2} [b_+ a_+ (1 - r_2/c_2) + b_- a_- (1 - r_2/c_2)]^2 dx dy \\ &= \frac{4a_+^2 a_-^2}{(a_+ + a_-)^2} \cdot \frac{c_2^2}{c_1^2} \end{aligned}$$

$$(\Psi_+, \Psi_- \text{ 只含 } (1 - \frac{r_2}{c_2}) \text{ 项}). \quad (12)$$

直通臂和耦合臂的输出功率(假设分别为 P_1, P_2) 是在 $z = L$ 时(L 为耦合区长度)的功率

$$\begin{aligned} P_2 &= P_{2max} \sin^2 \int_0^L (\frac{\beta_+ - \beta_-}{2}) dz \\ &= P_{2max} \cdot \sin^2 [\frac{\pi}{2} \int_0^L \frac{1}{z_c} dz] \\ &= P_{2max} \cdot \sin^2 (\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L}{z_c}), \end{aligned} \quad (13)$$

式中 $\int_0^L \frac{1}{z_c} dz = \frac{L}{z_c}$, 因为耦合区近似为平行段^[5-8], z 轴正方向垂直于 xoy 平面向里。

由于 z_c 是波长的函数, 则耦合器耦合比与波长的关系式为

$$\begin{aligned} R_c &= \frac{P_2}{P_1 + P_2} \times 100\% = P_2 \times 100\% = \frac{4a_+^2 a_-^2}{(a_+ + a_-)^2} \cdot \\ &\frac{c_2^2}{c_1^2} \cdot \sin^2 (\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L}{z_c(\lambda)}) \times 100\%. \end{aligned} \quad (14)$$

在上述公式中, 取 $c_1 = c_2 = 62.5 \mu\text{m}$, $a_1 = a_2 = 4.25 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.460, n_2 = 1.456$. 可算得 $a_+ = a_- = 1$, 在 $\lambda = 1600 \text{ nm}$ 处, $z_c = 20.9 \text{ mm}$, 为了使 $\lambda = 1600 \text{ nm}$ 时的分光比具有最大值(如图 3), 耦合器耦合区长度应等于 $\lambda = 1600 \text{ nm}$ 时的耦合拍长, 即 20.9 mm 。

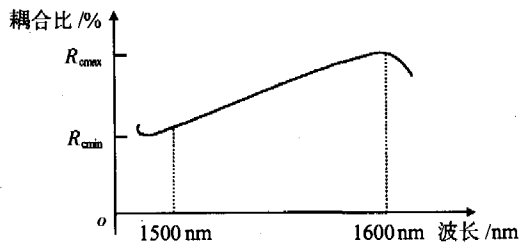


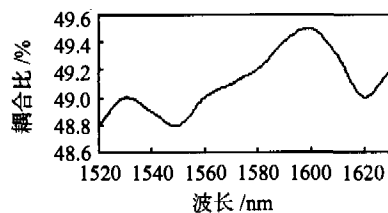
图3 耦合比波长理论响应曲线

Fig 3 Theoretic response curve of coupling ratio and wavelength

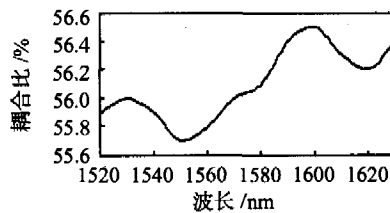
2 实验

(1) 材料

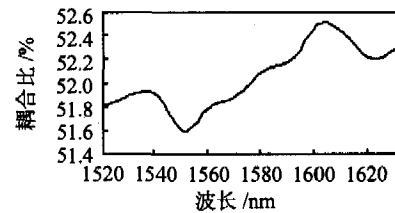
选用康宁 SMF28 光纤, 纤芯折射率为 1.460, 直径为 $8.5 \mu\text{m}$, 包层折射率为 1.456, 直径为 $125 \mu\text{m}$, 涂覆层直径为 $250 \mu\text{m}$ 。



(a) 耦合区长为 21.0 mm/ 初始分光比为 48.8% 时
(a) when coupling zone length is 21.0 mm and initial spectrum ratio is 48.8%



(b) 耦合区长为 20.8 mm/ 初始分光比为 55.7% 时
(b) when coupling zone length is 20.8 mm and initial spectrum ratio is 55.7%



(c) 耦合区长为 20.6 mm/ 初始分光比为 51.6% 时
(c) when coupling zone length is 20.6 mm and initial spectrum ratio is 51.6%

图4 耦合比波长响应曲线

Fig 4 Response curve of coupling ratio and wavelength at different initial conditions

从以上 3 条耦合比波长响应曲线可以看出: 在 1550 ~ 1600 nm 波长范围内, 对称融锥光纤耦合器的耦合比与波长成单调递增的响应关系, 与理论基本相符。

3 结束语

对光纤耦合器的波长响应研究表明: 常规对称单模熔融拉锥光纤耦合器不但对波长变化敏感, 而且, 还能根据耦合比的变化方向分辨出波长变化的方向, 其变化在一定范围内呈单调型; 但用它作敏感元件的光波长探测器的性能不够理想, 还需通过改变工艺参数或增敏等方式加以改善。凭借其较强的波长传感特性及生产工艺成熟等优势, 有望开发出一种具潜力的、可大规模生产的光波长探测器产品。

参考文献:

- [1] 林学焯. 光无源器件[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001. 251-260.
- [2] 帅词俊, 段吉安, 苗健宇, 等. 光纤耦合器预拉时融锥区的热

(2) 仪器

XYGD-SA2002 型六轴熔融拉锥机(主要实验平台); Agilent 86142B 型可调谐激光光源(1520 ~ 1630 nm); 显微镜。

(3) 实验过程

用熔融拉锥机拉制出光纤耦合器后, 用显微镜测出耦合区长度, 光源换用 Agilent 可调谐激光光源(波长在一定范围内可任意调制), 应用耦合器的光电检测和数据处理模块, 在光源的不同波长输出下, 测出耦合比(由计算机直接读出), 最后, 记录数据。

(4) 结果与分析

耦合比波长响应曲线如图 4 所示。

分析[J]. 中南大学学报, 2004, 35(4): 618-621.

- [3] 帅词俊, 段吉安, 苗健宇, 等. 工艺参数对光纤耦合器性能影响的实验研究[J]. 光通信技术, 2004, (12): 13-16.
- [4] 魏道平, 赵玉成, 张劲松, 等. 波长响应特性平坦的熔锥型光纤耦合器研究[J]. 光通信研究, 1998, 4(88): 40-43.
- [5] 李川, 张以谟, 刘铁根, 等. 熔锥光纤耦合器的温度响应[J]. 传感技术学报, 2001, (3): 196-199.
- [6] 林小莉, 李平, 王强, 等. 熔锥型光纤耦合器扭转特性研究[J]. 光子学报, 2004, 33(5): 372-374.
- [7] 李欣, 李川, 张以谟, 等. Y 型熔锥型光纤耦合器的应变响应[J]. 光子学报, 2001, 30(11): 1353-1356.
- [8] Tekippe V J, Moore D R, Paul D K, et al. Performance and reliability of fused couplers[J]. SPIE, 1998, (3666): 56-61.

作者简介:

夏益民(1980-), 男, 江西万年人, 硕士研究生, 研究方向为光电子器件制造。

(上接第 31 页)

- [2] Kwang-Min Lee, Doh-Jae Lee, Hoon Ahn. XRD and TEM studies on tin oxide (II) nanoparticles prepared by inert gas condensation[J]. Materials Letters, 2004, 58: 3122-3125.
- [3] Gu F C, Zhao Z X, Li Y H, et al. Preparation of surface-modified Tin oxide nanoparticles[J]. Wuli Huaxue Xuebao, 2003, 19: 621-625.
- [4] 姚敏琪, 卫英慧, 胡兰青, 等. Preparation and properties of nano-sized SnO₂ powder[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2002,

10(5): 833-836.

- [5] 古凤才, 赵竹萱, 李英慧, 等. 表面修饰二氧化锡纳米微晶的制备与表征[J]. 物理化学学报, 2003, 19(7): 621-625.
- [6] 潘庆谊. 微乳液法纳米 SnO₂ 材料的合成、结构与气敏性能[J]. 无机材料学报, 1999, 14(1): 83-89.

作者简介:

万艳芬(1981-), 女, 四川峨眉山人, 硕士研究生, 主要从事传感器及材料研究和设计。