

Study of Fiber-Optic Coupler Strain Characteristic Based on Coupling Mode Theory*

MA Bin¹, SUI Qing-mei^{1*}, XU Jian²

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;
2. Computer Department, Shandong Finance Institute, Jinan 250013, China)

Abstract: According to the sensitive characteristic of the ratio of single-mode fiber-optic coupler's output power to the length variety of coupling zone, the coupling-mode mechanism of fused biconical taper is conceived and described in detail. Researching the characteristic of the fiber-optic coupler using spiral micrometer to avoid the disturbance of cantilever self-weight and self-vibration, the measurement precision was enhanced effectively. The influence of environment temperature and transverse strain to the experimental result was analysed simultaneously. The result indicates that the fused biconical taper coupler is sensitive to the strain, and also was a strain function changed monotone and linear. At the same time it has good temperature stability and anti-transverse-disturbance.

Key words: fused biconical taper; single-mode optical fiber; optical fiber coupler; coupling ratio; strain
EEACC: 7230E

基于耦合模理论的光纤耦合器应变特性研究*

马 宾¹, 隋青美^{1*}, 徐 健²

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061;
2. 山东财政学院计算机系, 济南 250013)

摘 要: 根据单模光纤耦合器的输出功率的比值对耦合区长度变化敏感的特点, 分析了熔融拉锥型光纤耦合器的工作原理。采用螺旋测微仪对光纤耦合器的应变特性进行研究, 避免了悬臂梁结构自重、梁的振动等不可控因素对测量结果的影响, 有效提高了测量精度。同时详细分析了环境温度以及光纤耦合器的横向应变对试验结果的影响。实验证明, 熔融拉锥式单模光纤耦合器不但具有应力敏感性, 而且随应变呈线性单调变化, 同时也具有较好的温度稳定性和横向抗干扰性。

关键词: 熔融拉锥; 单模光纤; 耦合器; 耦合比; 应变

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)09-1519-05

在集成光学中, 最普遍和应用最广的器件便是耦合器, 它可以将以一定方向传播的导波模耦合到一起, 因而可以用作滤波器、分束器和偏振器等。随着光纤耦合技术的发展, 各种低损耗, 高性能的光纤耦合器相继研制出来。光纤耦合器不仅可以用于光网络系统中的分光与合光; 作为一种基本的器件结构, 光纤耦合器的分光比还对耦合区的应变非常敏感^[1]。由于光纤耦合器具有体积小、成本低、抗电磁干扰、耐腐蚀、解调方式简单等优点, 所以, 对耦合区的应变特性研究具有重要的意义。

国外的 Tekippe V J 等通过对光纤耦合器的制作, 性能和可靠性的研究, 指出耦合器的分光比与输入光波长和耦合区的长度有关^[3-5]。国内的顾炳生等人也对熔融拉锥型光纤耦合器的理论模型进行了分析, 报道了通过控制耦合区的长度可以得到不同分束比的宽带耦合器^[2, 6-8]。本文根据单模光纤耦合器的输出功率的比值对耦合区长度变化敏感的特点, 采用螺旋测微仪对光纤耦合器的应变特性进行了研究。避免了悬臂梁结构自重, 梁的振动等不可控因素对测量结果的影响, 有效地提高了测量精度。

基金项目: 山东省中青年科学家奖励基金项目资助(2006BS05007); 山东省自然科学基金资助(Z2006G05)

收稿日期: 2008-04-20 **修改日期:** 2008-05-30

同时研究了环境温度以及光纤耦合器的横向应变对试验结果的影响。

1 耦合器的应变的响应机理

熔融拉锥型光纤耦合器就是将两根除去涂覆层的光纤以一定的方式靠拢,固定在拉锥的夹具上,在高温下进行加热熔融,同时通过夹具向光纤的两端拉伸,最终在光纤的加热区形成双锥形的特殊波导结构,从而来实现光纤耦合的一种方法。由于熔融拉伸使加热区的直径逐渐减小,耦合器的性能参数也会随之不断发生变化,形成以包层为纤芯,芯外介质(一般为空气)作为新包层的新的复合光波导结构。如图1所示,光纤耦合器的几何结构包括熔融区和锥区两部分, L 为耦合区的长度; l_0 为熔融区的宽度,即等于火焰的宽度;其两端 l_1 和 l_2 为锥区部分,其各点的直径随位置的变化而不同。在熔融区部分,两根光纤的位置可以认为相互平行且靠得足够近,因而,可以利用模式耦合理论对耦合器的传输性能和能量分布进行分析。

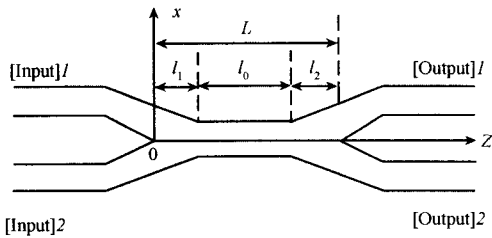


图1 光纤耦合器结构模型

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

其中 $\beta = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}$ 为两传播常数的平均值;

$$F = \left[1 + \frac{(\beta_1 - \beta_2)^2}{4C^2} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

F 为光纤之间耦合的最大功率;

$C = \frac{(2\Delta)^{1/2} U^2 k_0 W d / r}{r V^3 K_1^2 W d / r}$, 为耦合系数^[4]; 且有

$$\begin{cases} U = r(k^2 n_{c0}^2 - \beta^2)^{-1/2} \\ W = r(\beta^2 - k^2 n_{c1}^2)^{1/2} \\ \Delta = \frac{(n_{c0}^2 - n_{c1}^2)^{1/2}}{2n_{c0}^2} \\ V = k r n_{c0} (2\Delta)^{1/2} \\ k = \frac{2\pi}{\lambda} \end{cases} \quad (4)$$

其中 r 为光纤半径; d 为两光纤中心的间距; Δ 为光纤剖面高度的参量; k 为真空中的波数; λ 为光

当入射光 P_0 进入输入端 $input_1$, 随着两个波导逐渐靠近, 两个传导模开始发生重叠现象, 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。可以假设, 光波最初从一个光纤输入, 传输一定距离后, 这部分光就会逐渐交换到另一光纤内传输, 然后又逐渐返回到最初的光纤中传输, 整个传输过程随距离呈周期性变化^[2-3]。

对组合波导的腰部作弱导和弱耦合近似后, 在该段区域内组合波导的横截面近似不变, 耦合区两臂间的功率交换主要发生在等效圆柱型平行波导内。根据弱耦合模理论分析可知: 相耦合的两波导中的场, 各保持该波导独立存在时的场分布和传输系数, 耦合的影响仅表现在场的复数振幅的变化。假设光纤是无吸收的, 则沿耦合区的纵向(图1中 z 轴的方向), 两波导间的横向耦合可用一阶微分方程组表示如下:

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

式中: A_1 和 A_2 为两光纤的模场振幅; β_1 和 β_2 为两光纤在孤立状态下的传播常数; C_{11} 和 C_{22} 为光纤的自耦合系数; C_{12} 和 C_{21} 为互耦合系数。自耦合系数相对互耦合系数很小, 可以忽略, 且近似有 $C_{12} = C_{21} = C$ 。当方程组(1)在 $z = 0$ 时满足 $A_1(z) = A_1(0), A_2(z) = A_2(0)$, 其解为:

波长; n_{c0} 和 n_{c1} 分别为纤芯和包层的折射率; U 和 W 为光纤的纤芯和包层的参量; V 为孤立光纤的光纤参量; k_0 和 k_1 分别为0阶和1阶修正的第二类贝塞尔常数。

假设入射光从光纤耦合器的一端进入, 其边界条件为 $A_1(0) = 1, A_2(0) = 0$, 由玻印廷(Poynting)理论^[9]可以解得两出口的光功率为:

$$\begin{cases} P_{A1} = |A_1(z)|^2 = \left[z \sqrt{C^2 + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2} \right]^2 + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2 \frac{\sin^2 \left[z \sqrt{C^2 + (\Delta\beta/2)^2} \right]}{C^2 + (\Delta\beta/2)^2} \\ P_{A2} = |A_2(z)|^2 = \frac{C^2 \sin^2 \left[z \sqrt{C^2 + (\Delta\beta/2)^2} \right]}{C^2 + (\Delta\beta/2)^2} \end{cases} \quad (5)$$

特别的, 在同步的条件(传播常数相同)下, $\Delta\beta$

= 0, (即 $\beta_1 = \beta_2$ 时) 上式可以简化为

$$\begin{cases} P_{A1} = \cos^2(Cz) \\ P_{A2} = \sin^2(Cz) \end{cases} \quad (6)$$

光纤耦合器的输出耦合比可以表示为

$$R = P_{A2} / (P_{A1} + P_{A2}) \times 100\% \quad (7)$$

根据上述公式可得两输出端光功率 P_{A1} 和 P_{A2} 的变化曲线。如图 2 所示, 光功率随耦合区的长度的变化进行周期性的变换, 耦合区长度的变化可以通过输出端两输出光功率比值的变化来反映。假设当 $z = 0$ 时, $P_{A1} = 1$ 和 $P_{A2} = 0$; 能量从 input₁ 输入, 传输一个距离 Z_1 后, $P_{A1} = 0$ 和 $P_{A2} = 1$; 再通过一个距离 Z_2 重新有 $P_{A1} = 1$ 和 $P_{A2} = 0$; 即导波模的能量又回到光纤 1 中。利用这一特性, 使耦合器工作在 A-B 区, 将耦合器粘贴在不同的被测物体上, 可以得到不同的灵敏度, 实现对外界物体应变的测量。

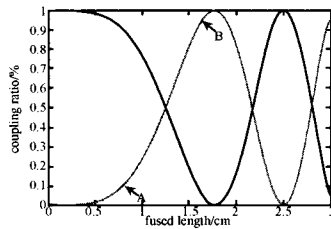


图 2 耦合输出的功率变化

2 实验研究

在上述公式中取 $r = 4.5 \mu\text{m}$, $d = 56.5 \mu\text{m}$, $n_{co} = 1.46$, $n_{cl} = 1.452$, $\lambda = 1558 \text{ nm}$; 可以求出, 当耦合长度 $L = 12.457 \text{ mm}$ 时, 分光比为 50:50。由光纤耦合器的工作机理分析可知, 光纤耦合器的输出对耦合长度的变化非常敏感, 耦合区的应变每改变 $100 \mu\epsilon$, 耦合比的变化为 5.12%。利用耦合器的这一特性, 可以制成耦合式光纤应力传感器, 实现对应变的测量。由于螺旋测微仪能够精确的控制被测对象的形变, 具有结构稳定, 控制精度高等优点。试验中采用改造后的测微仪对光纤耦合器的应变特性进行研究, 避免了悬臂梁结构自重, 梁的振动等不可控因素对测量结果的影响, 有效提高了测量精度。同时详细分析了环境温度对试验结果的影响, 以及光纤耦合器的横向应力响应特性。

结构复合材料是用人工办法将高强度、高模量纤维与韧性基本材料结合起来而形成的新型结构材料。可以根据需要做成不同的强度、刚度的材料, 具有形变恢复快、抗疲劳等优点。本次试验选用的材料是采用单向连续碳纤维增强的复合材料。将耦合区粘贴在复合材料上, 在耦合器的一侧粘贴微应变片, 对比测量耦合器的输出的变化率。将材料固定

在微应变仪上, 通过微应变仪给予复合材料不同的拉力和压力引起复合材料的形变, 观察应变片和耦合器的测量输出与微应变仪的对应关系。选用耦合输出比为 50:50 的单模光纤耦合器, 入射光源是深圳朗光公司生产的 ASE-150 型宽带光源, 输出带宽为 1525~1560 nm, 输出光功率为 20 mW。输出端采用 EXFO FPM-602 型光功率计, 测量范围为 10~70 mW, 测量精度为 0.1 nW, 满足本试验的要求。如图 3 所示。

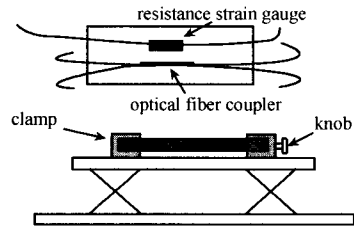


图 3 试验装置图

2.1 纵向应变的响应

首先, 用电阻应变片对复合材料的应变进行标定, 测得微应变仪每拉伸和压缩 0.01 mm, 电阻应变片的变化约为 $45.5 \mu\epsilon$ 。耦合器的两个输出臂的输出分别随着应变的变化呈单调性的增加或减少。由图 4, 5 可知耦合输出与应变有非常明显的线性关系, 拉伸时 output₁ 端的输出随着应变的增加逐渐减小, output₂ 端的输出随着应变的增加逐渐变大; 线性拟合曲线为 (式中 S 为微应变的变化量, 单位为 $\mu\epsilon$, R 为耦合输出比, 单位为 %):

$$R = 0.0482S + 49.7 \quad (8)$$

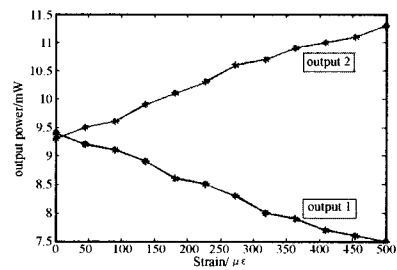


图 4 拉伸时的输出功率变化

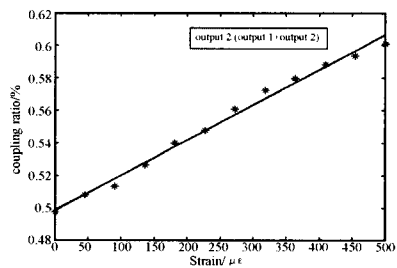


图 5 拉伸时耦合比的变化曲线

压缩时 output₁ 端的输出随着应变的增加逐渐变大, output₂ 端的输出随着应变的增加逐渐减小

(如图6,7所示);利用耦合输出的这一特性,可以在标定后,制成光纤应变传感器。线性拟合曲线为(式中 S 为微应变的变化量,单位为 $\mu\epsilon$, R 为耦合输出比,单位为%):

$$R = -0.0487S + 49.7 \quad (9)$$

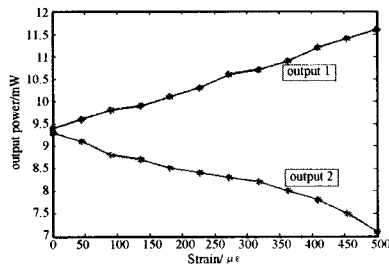


图6 压缩时的输出功率变化

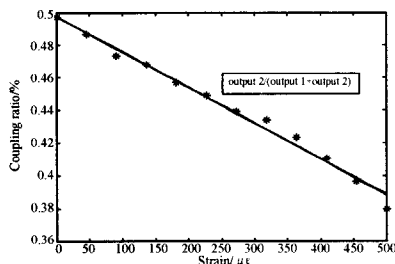


图7 压缩时耦合比的变化曲线

2.2 温度对测量结果的影响

由公式(6)可知,耦合器的输出功率是耦合系数和耦合长度的函数,而耦合系数又是由耦合光纤的截面形状、折射率、两光纤的中心距离等因素决定。温度的变化会对耦合区的折射率,和耦合区的形状产生影响。在光纤耦合器的熔合区周围外部介质的折射率变化会影响相互作用模的相对相速度,因而也就会影响耦合比。如果外部介质(比如大多数聚合物材料)具有较大的 $\delta n/\delta T$ 系数,则器件的耦合输出比受温度的影响就会较大。我们在试验中测量了温度从 -10°C ~ 40°C 的范围内,耦合器的输出比随温度变化的曲线。耦合比的变化和温度的变化呈现良好的线性关系,而且还能根据耦合比的变化方向分辨出温度变化的方向。从图8可知,在 -10°C ~ 40°C 的范围内,耦合比从49.2%增加到50.9%。由温度产生的误差小于2%。输出变化的拟合曲线方程为(式中 T 为温度的变化量,单位为 $^{\circ}\text{C}$, R 为耦合输出比,单位为%):

$$R = 0.00034T^2 + 0.0234T + 46.39 \quad (10)$$

由上式可知,耦合器的输出比在小范围的温度变化内,其温度影响较小;这也是耦合器的重要优点之一,即对温度补偿的要求较低。通过适当的选择耦合区涂覆层的材料,以及控制拉伸过程中耦合区横截面的形状,可以有效地避免温度的变化对传感

器性能的影响。有试验表明,在耦合区的外臂采用结晶毛细石英管,由于熔结硅光纤固有的温度稳定性,耦合比从10%~90%的范围内,漂移可以稳定在0.5%以内^[5]。

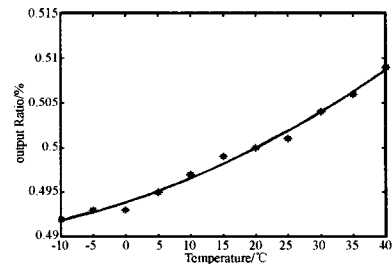


图8 温度对输出耦合比的影响

2.3 横向应力的影响

横向应力的响应是检验传感器抗干扰性能的一个重要指标,将耦合器横向粘贴在复合材料上,调节微应变仪,传感器的输出如图9所示,当横向对传感器施加拉力或压力时,由于耦合区的体积很小,产生的形变几乎可以忽略,耦合器的输出比基本没有什么变化,器件呈现出非常良好的抗干扰性。

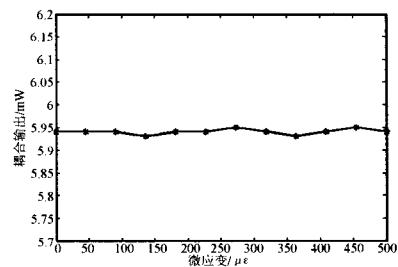


图9 横向应力的影响

3 试验分析及结论

我们分别从耦合器的纵向应变响应、横向应变响应、以及温度的影响等方面对耦合器的耦合输出变化进行了测量,实验表明熔锥型耦合器可以用来进行应变的测量。熔锥单模光纤耦合器不但对应变敏感(其敏感性较电阻应变片高),而且还能根据耦合比的变化方向分辨出应变的方向,如图10所示,其变化在一定范围内(耦合比为10%~90%之间)有明显地单调性。

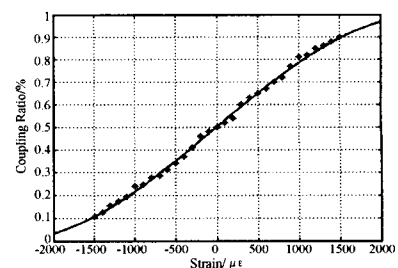


图10 耦合比与应变关系曲线

当应变为 $-500\sim 500\ \mu\epsilon$ 时,耦合器耦合输出比的变化范围是 $38\%\sim 62\%$ 。由理论分析可知,在耦合比 $25\%\sim 75\%$ 的范围内,其对应的应变范围为 $2\ 000\ \mu\epsilon$,耦合输出都具有明显的单调性。普通的混凝土结构,铸铁结构的断裂应变范围基本都在 $600\sim 1\ 000\ \mu\epsilon$ 之间。这一结果完全满足对桥梁,公路等建筑结构的测量。

目前,光纤传感器大多是能量(光强)调制型,通过测量传感器输出光强的变化获取被测参量变化的信息,因此,光源、光纤、光探测器等引起的光强变化是造成测量误差的主要因素。而熔锥型光纤传感器采用耦合比的测量方法,通过耦合比的变化反映被测参量的变化。其本身具有光桥平衡补偿作用,可以消除光源输出功率波动,光探测器灵敏度漂移等因素所产生的测量误差。这样就成功地避免了其他类光纤传感器的温度和噪声等问题。

利用熔锥型单模光纤耦合器的应变传感特性,可以开发出一种新型的光纤应变传感器。这种传感器不仅具有良好的灵敏度,而且还可以克服传统的电测方法的局限,在电磁干扰、温度变化较大、湿度较高及腐蚀性较强等恶劣的环境中使用,同时,由于其传输损耗很低(大约 $0.05\ \text{dB/km}$),能够很好的解决远距离的测量中信号的有效传输问题^[6,8]。所

以,在土木建筑,油田煤矿,道路桥梁等作业环境较差,测量点较远的工作环境中,具有广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] 林学煌. 光无源器件[M]. 北京:人民邮电出版社,2001.
- [2] 程嘉薪. 熔锥型宽带光纤耦合器的研究[D]. 天津:天津大学精密仪器与光电子工程学院,2002.
- [3] Tekippe V J, Moore D R, Paul D K, Thomas A and Sen S. Production, Performance, and Reliability of Fused Couplers [C]// SPIE, 1998; 3666:56-61.
- [4] Salazar D, Felix M A, Jessica A V. A Simple Technique to Obtain Fused Fiber Optics Couplers[J]. Instrumentation and Development, 2001,5(3):170-174.
- [5] HONG Li-feng, GE Chun-feng. The Full Wave Optical Fiber Coupler of the Fused Tapered[J]. Acta Physical Sinica, 2003, 52(2):390-394.
- [6] 刘丽娜. 耦合型光纤应变传感器监测钢筋混凝土梁试验[J]. 南京:传感技术学报 2005,17(9):67-71.
- [7] 顾炳生. 熔锥型光纤耦合器宽带特性研究[J]. 光学学报, 1995,15(5):610-616.
- [8] 刘景琳,段吉安,苗健宇等. 熔融拉锥型光纤耦合器实验研究[J]. 中南大学学报, 2006,37(1):103-107.
- [9] 李家泽,阎吉祥. 光电子学基础[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005.



马 宾(1973-),男,山东大学控制科学与工程学院博士研究生;主要从事光纤传感技术及嵌入式系统研究,jnxmlb@126.com



隋青美(1963-),女,教授、博士、博士生导师。现任控制科学与工程学院过程控制研究所所长、测控技术与仪器系主任、检测技术与自动化装置学科点学术带头人。享受国务院政府津贴。主要研究方向为检测理论及应用、光纤传感技术。在国内外重要学术刊物上发表和国际国内学术会议上交流学术论文 60 余篇,qmsui@sdu.edu.cn