

# 微光纤耦合器制作及振动传感特性研究

于洋 张学亮 宋章启 卫正统 孟洲

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要** 分析了微光纤耦合器的基本光学特性,利用微纳光纤拉制平台,在线监测制作出具有良好光学性能的微光纤耦合器,对微光纤耦合器的振动信号响应特性进行分析与实验研究,并进行了行人走动引起的振动信号的响应测试,实验结果表明微光纤耦合器对外界振动具有高灵敏度的传感性能,在区域点警戒方面具有一定的应用价值。

**关键词** 光学器件;微纳光纤;微光纤耦合器;振动传感;光纤传感

中图分类号 O431.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.1105002

## Investigation of Fabrication and Vibration Sensing Properties of Optical Microfiber Coupler

Yu Yang Zhang Xueliang Song Zhangqi Wei Zhengtong Meng Zhou

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** The basic optical properties of the optical microfiber coupler are discussed. Optical microfiber couplers with well optical property are achieved by using the optical microfiber drawing system with online optical monitoring system. The vibration characteristics of the optical microfiber coupler are analyzed and studied experimentally. Person stepping signals are caught successfully by the optical microfiber coupler sensing system, which proves that the optical microfiber coupler sensing system has high sensitivity to the vibration signal and it may have potential value in the local area monitoring fields.

**Key words** optical devices; optical microfiber; optical microfiber coupler; vibration sensing; fiber sensing

**OCIS codes** 230.4000; 060.2370

### 1 引言

微纳光纤因其独特的光学性能,在高灵敏度光传感、非线性光学、原子诱捕,微纳尺度光子器件、光子器件间的倏逝场耦合与集成等方面展现了良好的应用价值<sup>[1-9]</sup>。但单根低损耗、单模传输的微纳光纤并不能完全满足以上各领域的多路光学器件等复杂要求。为此,人们开展了多端口的微纳光纤器件,即微光纤耦合器(OMC)的研究,文献[6]报道了具备一定滤波功能的单模宽带微光纤耦合器,初步实现了400~1700 nm的准单模传输(其锥腰直径约为1.5 μm)。此外,人们还开展了微光纤耦合器的

光学特性及传感应用研究,对微光纤耦合器的温度传感、折射率传感以及基于微光纤耦合器的谐振腔特性进行了研究<sup>[10-12]</sup>。其中一种基于强度检测的微光纤耦合器温度计可实现室温约为1511 °C的温度响应(其锥腰直径约为12.56 μm),分辨率可达0.66 °C(其锥腰直径约为4.8 μm)<sup>[10]</sup>。另一种基于光谱扫描的微光纤耦合器温度计灵敏度可以达到11.96 pm/°C,空间分辨率为200 nm(其锥腰直径约为2.5 μm)<sup>[11]</sup>。文献[12]报道的基于微光纤耦合器的折射率传感器在1.3340~1.3800范围可以实现2723 nm/RIU(RIU为折射率单位)的折射率分

收稿日期: 2014-01-10; 收到修改稿日期: 2014-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(61177073)

作者简介: 于洋(1984—),男,博士研究生,工程师,主要从事光纤传感、光电子器件等方面的研究。

E-mail: 56046728@qq.com

导师简介: 孟洲(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事光纤传感、光纤器件等方面的研究。

E-mail: zhousheng6806@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

分辨率,在 1.3340~1.3515 范围的折射率分辨率高达 4155 nm/RIU。以上研究表明,微光纤耦合器不但具有良好的光学传输特性,还具有高灵敏的传感性能。目前基于微纳光纤的振动传感器已有研究<sup>[13-14]</sup>,而对微光纤耦合器的振动传感性能报道还较少。本文利用微纳光纤拉制平台,制作了具有良好光学性能的微光纤耦合器,并通过拉制过程实时监控信号分析等手段,分析研究了其传光特性。在此基础上,对其振动传感特性进行了初步研究,探究了微纳光纤在区域安全警戒领域的应用潜力。

## 2 微光纤耦合器制作及特性分析

采用基于“改进型火焰扫描法”的微纳光纤拉制平台<sup>[15]</sup>,将两根光纤靠紧,参照微纳光纤以及常规光纤 3 dB 耦合器研制技术,制作出了微光纤耦合器,其结构示意图如图 1 所示。微光纤耦合器的组成部分可分为两个锥形过渡区和一个中间均匀腰区,并带有四个尾纤端口。值得注意的是,其均匀腰区(即火焰扫描加热区)直径可以达到微米量级或纳米量级(即波长或亚波长尺度),均匀腰区长度可以控制在几毫米到几十毫米。

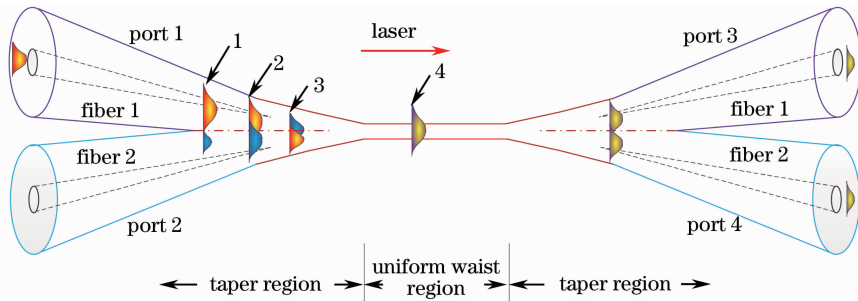


图 1 微光纤耦合器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the optical microfiber coupler

如图 1 所示,光从端口 1(port 1)注入并在锥形过渡区传输时,随着光纤 1 直径逐渐减小,光场将从光纤 1 的纤芯扩散到包层传输,形成“包层-外包层”模,当光纤 1 与光纤 2 的纤芯距离满足耦合条件时,光纤 1 中传输光将耦合到光纤 2 中,此时端口 4(port 4)将有光输出,图 1 中由箭头 1 位置表征该状态。随着锥形过渡区继续变细,将有更多的光从光纤 1 耦合到光纤 2,最终端口 3(port 3)和端口 4 输出能量比将达到 1:1,若此状态下两光纤不再拉锥,即可形成常规 3 dB 光纤耦合器(图 1 中由箭头 2 位置表征该状态)。当锥形过渡区直径继续拉伸减小(即超过 3 dB 耦合点),由光纤 1 耦合到光纤 2 的光强将随着腰区直径减小和拉锥长度的增大而发生周期性波动,并且波动周期会逐渐减小(图中由箭头 3 位置表征该状态)。锥形过渡区的拉制过程会伴随着高阶模式的激励、模式间的耦合与截止等问题,锥形过渡区的外形轮廓、尺寸等参数直接决定微光纤耦合器的耦合系数、偏振特性、传输损耗等光学传输性能,因此,需对拉锥参数进行合理地优化设计与精确控制。

当光场从锥形过渡区耦合进入均匀腰区时,其传输特性将由均匀腰区波导特性决定。而对于这种熔锥拉制的微光纤耦合器,其均匀腰区直径可以达到微米量级甚至纳米量级,两光纤在锥腰区其实已

经熔融堆化形成一根准圆柱形导光纤维,此时的锥腰区完全成为“微纳光纤”。这时,耦合器前端锥形过渡区可以视为光纤合束器,后端锥形过渡区则为光纤分束器。微纳光纤自身具有一定模式选择能力,如锥腰区直径小到一定程度,锥形过渡区对称性足够好,则光场由锥腰区耦合到右端锥形过渡区时,即可实现单模、宽带、对称的光场输出(图中由箭头 4 位置表征该状态)<sup>[6]</sup>。这种带有四端口的特殊“微纳光纤”将在微纳光子器件集成与复用、激光器、传感等领域展现良好应用价值。

以上定性分析了微光纤耦合器的光场传输特性,而要获得光场传输函数,需要求解由纤芯、包层及填充介质(或空气)所构成耦合区的矢量波动方程,精确求解十分繁琐。常规耦合器的功率交换主要发生在腰区,而在这段区域组合波导的模截面可近似为不变,所以可以假定功率耦合是在腰部的一对平行波导间发生的,腰部界面用矩形或椭圆形波导近似。而微光纤耦合器具有较长的锥形过渡区,并且锥区逐渐变细并熔锥为一体,直至达到微米量级甚至亚微米量级的准圆柱形的正规微纳波导,这其中包含弱耦合区、强耦合区以及准正规微纳波导传输区。因此,对于微光纤耦合器,采用弱耦合波导模型和强耦合波导模型分段讨论较为合适<sup>[16]</sup>。实际的微光纤耦合器的锥形过渡区域,即横截面随纵向距离变化的梯度区域,对

微光纤耦合器的耦合性能起着主导作用；腰区直径小到一定程度时，主要起滤波以及多模或单模传输功能。本文的微光纤耦合器拉制时，参考了文献[17]的理论模型，其外形轮廓与拉伸长度是严格满足特定函数关系。为满足绝热条件，锥形过渡区外形多为指数型或二次型。锥区梯度变化足够缓慢。根据不同参数，可以采用局部模式耦合理论来分析，即两根单模光纤相互作用的任一位置处的能量是由该位置前面所有能量耦合的叠加。微光纤耦合器的总耦合是过渡区耦合和均匀区耦合的叠加。耦合器两输出端的功率表示为<sup>[18-22]</sup>

$$\begin{cases} P_3(z) = P_0 \cos^2 \left[ \int_0^l C(z) dz \right] \\ P_4(z) = P_0 \sin^2 \left[ \int_0^l C(z) dz \right] \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $P_0$  为输入光功率； $C(z)$  为微光纤耦合器不同位置耦合系数， $l$  为耦合区长度。

要想更为清晰了解微光纤耦合器的模场传输特性，可以采用局域耦合模理论结合有限元方法，进行进一步数值分析，这里不展开讨论。

本文采用的微纳光纤控制系统结构示意图如图 2 所示。将两根常规通信光纤 (SMF-28, Corning) 去涂覆区域缠绕贴紧并固定在微动控制台的安装支架上，采用电控微加热头 (CMH-7019, NTT-AT) 熔融光纤拉锥区，通过微动控制台往复移动并拉伸实现光纤的熔融拉锥。通过精确控制加热宽度、熔融温度、拉伸速度、拉锥锥角等参量，可以拉制出不同外形轮廓的微光纤耦合器。

如图 2 所示，微光纤耦合器拉制时，采用波长范围为 1525 ~ 1570 nm 的宽谱光源 (CF17M, OPEAK) 从端口 1 注入光，并用光电探测器 (OE-200) 对端口 3 和端口 4 输出的光进行实时监测，进而了解微光纤耦合器拉制过程的光传输与耦合特性。

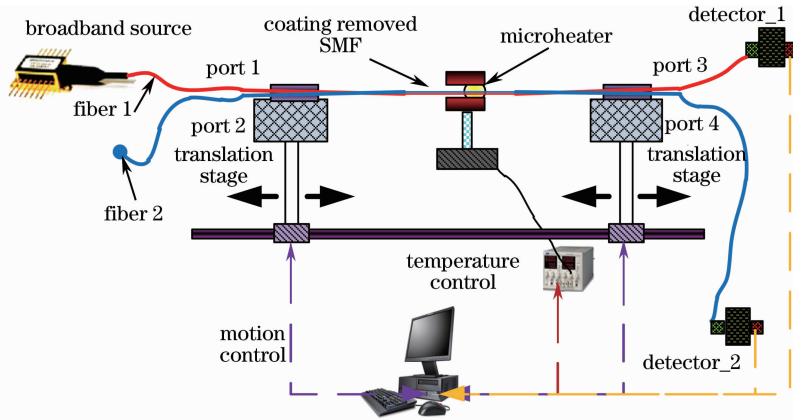


图 2 微纳光纤控制系统示意图

Fig. 2 Schematic illustration of the microfiber coupler fabrication setup

图 3 为一根拉锥长度约为 56 mm，均匀腰区长度  $L$  约为 10 mm，锥腰直径  $D$  约为  $2 \mu\text{m}$  的微光纤

耦合器样品在光学显微镜下的实物拍照图，从图中可以看出均匀腰区已基本熔锥成一根微光纤。

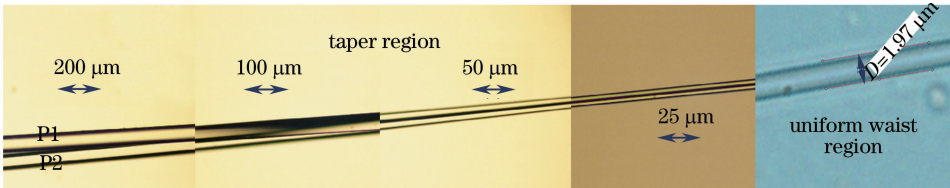


图 3 微光纤耦合器光学显微镜实物拍照图

Fig. 3 Images of the OMC in optical microscope

图 4 为一根拉锥长度约为 56 mm、均匀腰区长度  $L$  约为 10 mm、锥腰直径  $D$  约为  $2 \mu\text{m}$  的微光纤耦合器样品拉制过程中，两臂 (端口 3 和端口 4) 输出光监测结果。由该过程功率测试结果可得，该微光纤耦合器的损耗为 0.2 dB。如果将该损耗全部

算为耦合器中间的微纳光纤的损耗，则由此获得的均匀腰区长度  $L$  约为 10 mm、锥腰直径  $D$  约为  $2 \mu\text{m}$  的微纳光纤损耗大小不超过 0.02 dB/mm。

对整个拉制监测过程进行了详细分析。由图 4 可见，拉制初期并无能量耦合，表明光纤 1 中光场仍

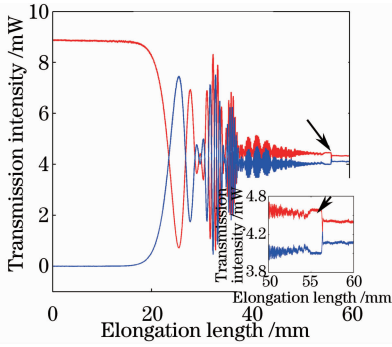


图 4  $L=10$  mm,  $D=2$   $\mu\text{m}$  的微光纤耦合器样品  
控制过程传光监测结果

Fig. 4 Transmission intensity of the microfiber coupler with 10 mm length and 2  $\mu\text{m}$  diameter during the fabrication process

被束缚在其纤芯内,两纤芯距离还不满足模式耦合条件。当拉伸长度约大于 10 mm, 光纤锥腰直径约小于 20  $\mu\text{m}$  时(光纤拉锥长度与锥腰直径实际上满足特定函数关系<sup>[17]</sup>), 光纤 1 中的传输光场开始耦合到光纤 2 中, 并快速达到 3 dB 耦合点, 此时已经形成常规光纤 3 dB 耦合器的功能。随着光纤继续拉伸, 耦合器两臂能量开始来回交替耦合, 同时发生强度波动。随着锥区直径继续变细, 波动周期和幅度逐渐减小(此时的耦合器锥腰直径约在 4~20  $\mu\text{m}$  之间), 这一阶段可以制作成光纤滤波器和波分复用器等光学器件。从图中可以看出, 波动谱中存在慢漂包络, 这是由偏振因素引起的<sup>[23-24]</sup>。

如图 4 中的小图所示, 当耦合器拉锥到一定程度, 耦合波动几乎停止, 耦合器两臂输出能量基本不变。这一方面是由于均匀腰区承载高阶模式逐渐截止, 宽谱光源平均效应及系统噪声导致无法有效分辨细微的耦合波动。另一方面由于锥形过渡区已基本形成, 锥腰区两根光纤已基本熔锥成一根“微纳光纤”, 耦合系数基本稳定。值得注意的是, 当微光纤耦合器控制完成移开热源时(图中箭头所指位置), 耦合器两臂输出能量及耦合比会发生波动, 这主要是由于光纤固化造成折射率及耦合长度的变化所致。与文献[6](耦合器锥腰直径为 1.5  $\mu\text{m}$ )所述的情况略有不同, 本文的耦合器样品的耦合系数并不是 50:50。首先, 由于在微光纤耦合器控制时, 为增强耦合机械稳定性, 并使两光纤良好贴近, 本文将两根光纤做了缠绕, 拉伸时两根光纤熔融拉锥过程受力会有所不同, 导致拉锥直径存在差异, 即锥形过渡区不完全对称; 其次, 控制系统控制工艺及参数也会有所差异。通过监测微光纤耦合器拉锥过程的输出光谱变化情况, 也可以得出以上结论。

图 5 为样品拉制完成后的光谱特性测试结果, 测试光谱仪的光谱分辨率为 0.01 nm。该结果与文献[6]中所示的微光纤耦合器锥腰直径为 4  $\mu\text{m}$  时的输出光谱相比, 波动周期更小。

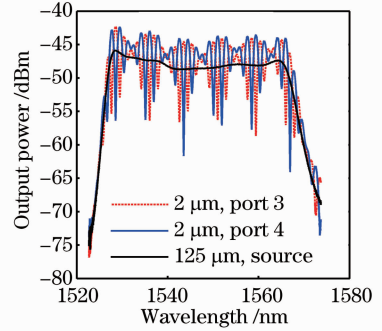


图 5 微光纤耦合器样品( $L=10$  mm,  $D=2$   $\mu\text{m}$ )光谱特性测试结果(黑色线为输入到耦合器的光源光谱, 红色和蓝色线分别为两个输出端口的测试光谱)

Fig. 5 Optical spectral characteristic of the optical microfiber coupler with 10 mm length and 2  $\mu\text{m}$  diameter (The black curve represents the input light spectrum. The red and blue curves represent spectra from the two output ports, respectively)

### 3 微光纤耦合器振动传感特性分析及实验研究

振动信号作用在耦合器上, 会引起耦合区折射率和耦合区长度发生变化, 从而导致耦合输出变化。根据作用原理不同可以分为低频振动和高频振动。低频振动对耦合器输出的影响主要表现在引起耦合区的耦合长度改变, 而高频振动信号对耦合器输出的影响主要表现为引起耦合区的折射率变化。本文只讨论微光纤耦合器低频振动响应特性, 并采用图 6 所示的悬臂梁振动传感器结构进行测试。其中, 微光纤耦合器的耦合区处于悬浮状态。将传感器固定在振动台上, 当振动台发生振动时, 振动信号将使耦合器的耦合区产生应变, 进而导致耦合器的耦合长度和折射率发生变化。折射率的变化会影响耦合器的耦合系数发生变化, 但耦合系数的变化比长度的变化要小的多, 可以忽略不计。所以, 只考虑耦合区长度的变化对耦合输出的影响。受到振动干扰后的传感器耦合输出可以表示为<sup>[14,25]</sup>

$$\begin{cases} I_3(l, t) = I_0 \cos^2 \left\{ \int_0^l C(z) [1 + \varepsilon(z, t)] dz \right\} \\ I_4(l, t) = I_0 \sin^2 \left\{ \int_0^l C(z) [1 + \varepsilon(z, t)] dz \right\} \end{cases}, (2)$$



式中  $\epsilon(z, t)$  为振动信号引起的耦合区动态应变变量, 其大小与耦合区截面半径的平方成反比。相对于常规光纤耦合器, 微光纤耦合器耦合区更长, 直径更小, 其较细的耦合区起到一个振动转换器的作用, 因此灵敏度会更高, 一致性更好。

从(2)式可以看出, 横向振动信号引起的输出波动正好为共轭关系, 因此两臂信号相减可以使振动传感灵敏度提高一倍, 并一定程度上抑制系统噪声。假设耦合器分数比为 1:1, 则微光纤耦合器两臂的输出功率之差可表示为

$$\Delta I = I_4(l, t) - I_3(l, t) = I_0 \sin\{2C \int_0^l C(z) [1 + \epsilon(z, t)] dz\}. \quad (3)$$

振动引起的微光纤耦合器产生的应变  $\epsilon(z, t)$  是一个很小的量, 并忽略耦合系数的变化影响[令  $C(z) = C$ ], 则两臂输出功率差用三角函数展开后可以近似为

$$\Delta I \approx 2Cl\epsilon(z, t). \quad (4)$$

从(4)式可以看出, 耦合器两输出端的输出功率之差是振动的强度和频率的函数, 因此可以实现振动信号的传感。

本文构建了如图 6 所示的微光纤耦合器声/振动传感实验系统。系统采用高相干半导体激光光源 (ORION™, RIO, 带宽约为 3 kHz), 从 OMC 端口 1 注入光, 分别用两光电探测器对端口 3 和 4 进行监测, 所用光电探测器与前述型号相同。将微光纤耦合器悬空夹固在安装支架上, 两安装支架距离约 200 mm, 安装支架本身固定在振动台上, 构成悬臂梁振动传感器结构。

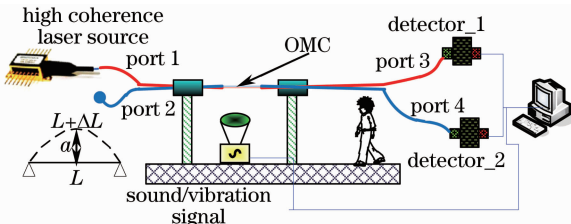


图 6 微光纤耦合器声/振动传感系统示意图

Fig. 6 Schematic configuration of the microfiber coupler sensing system

实验时, 对微光纤耦合器振动传感系统施加了不同形式的振动信号。首先, 在两安装支架中间位置的振动台上施加横向振动冲击信号, 冲击信号频率为 5 Hz, 测试结果如图 7 和 8 所示。

图 7 为施加振动信号时, 微光纤耦合器端口 3 和端口 4 的监测结果, 图中红色曲线为端口 3 监测

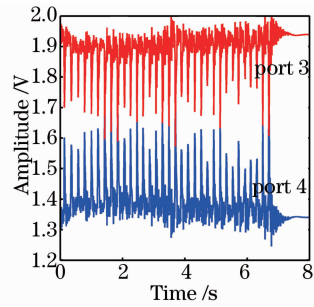


图 7 微光纤耦合器响应横向冲击振动信号的端口 3 和端口 4 两臂监测结果

Fig. 7 Experimental results of the transverse vibration signals from port 4 and port 3

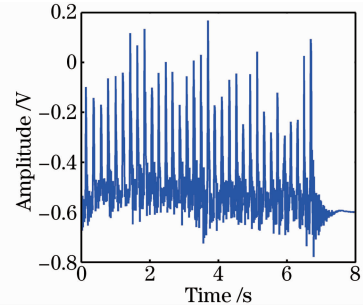


图 8 微光纤耦合器响应横向冲击振动信号时端口 3 和端口 4 两臂信号相减结果

Fig. 8 Results of the vibration signals from port 4 minus port 3 of the microfiber coupler

到的光强波动, 蓝色曲线为端口 4 监测的光强波导, 可以看出两路信号波动幅度相同, 方向相反, 与理论分析结果一致。

图 8 为施加振动信号时, 微光纤耦合器端口 3 和端口 4 的信号相减解调的结果, 正好将系统振动信号灵敏度扩大一倍。从图 7 看到, 系统响应信号与施加的横向冲击振动信号频率一致。表明微光纤耦合器对横向冲击振动信号响应灵敏, 失真较小。

另外, 利用该微光纤耦合器振动传感系统, 对行人在距离振动台 5 m 位置向远处走去产生的振动信号进行了监测, 测试结果如图 9 所示。图中 12 个强度波动包络分别对应实验员向远处走去时每一步引起的声/振动信号。图 10 为步行产生的包络信号的放大图。表明该微光纤耦合器振动传感系统对低频振动信号响应良好, 预期可以用于防盗报警系统。

实验时, 将一个喇叭悬空对准微光纤耦合器锥腰部施加声信号时, 系统没有明显响应, 这证明了该微光纤耦合器系统对空气中的声压信号不敏感。

以上实验表明, 微光纤耦合器可以结合一定的机械装置, 制作成振动传感器, 可在区域安全警戒系统中进行微小振动信号的监测警戒。不过, 该实验

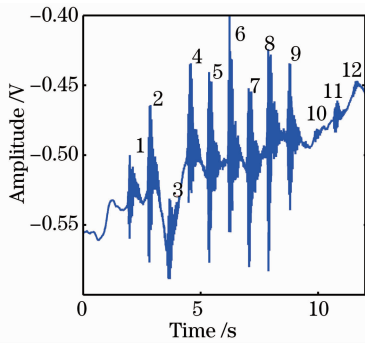


图9 实验员步行远离振动台时,传感系统监测到的振动信号测试图

Fig. 9 Vibration signals of the sensor when the experimenter walks away the sensing platform

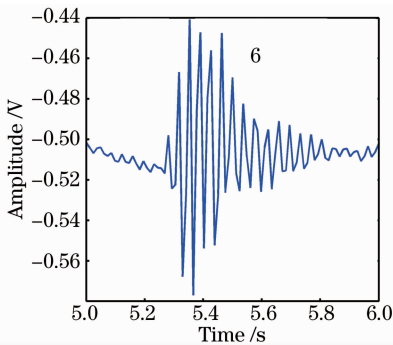


图10 传感系统对实验员步行振动信号检测结果局部放大图

Fig. 10 Megascopic vision of the sensing signals

系统也存在较大的系统本底噪声,这主要是由于系统存在光源波动、耦合器传感区域直接裸露在空气受环境影响较大等问题。要满足实际应用需进行更加细致的研究,设计优化传感探头结构和传感解调系统,进行合理的封装,屏蔽气流、温度等环境因素对传感器的不利影响,以实现特定带宽的高灵敏度传感。

## 4 结 论

分析了微光纤耦合器的光学传输特性,采用微纳光纤控制平台,通过在线监测及光谱分析手段,对微光纤耦合器不同控制阶段的传输损耗特性、波长选择特性、模式耦合特性等进行了实验研究。制作出了具有良好光学性能、以耦合器为连接端口的“微纳光纤”,并开展了振动信号传感的理论分析与实验研究。结果表明,该微光纤耦合器具有良好的振动传感性能,预期在区域振动信号警戒监测等方面具有一定的应用潜质。另外,微光纤耦合器具有双路输入和输出功能,采用双路注入方式,可拓展微纳光纤的传感光路结构,为进一步发掘其高灵敏度的传

感功能提供可能。后续工作也将对基于 OMC 的传感器结构优化设计、多参量传感、分布传感等展开进一步研究。

## 参 考 文 献

- 1 Limin Tong, Rafael R Gattass, Jonathan B Ashcom, *et al.*. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. *Nature*, 2003, 426(18-25): 816-819.
- 2 Gilberto Brambilla, Fei Xu, Peter Horak, *et al.*. Optical fiber nanowires and microwires: Fabrication and applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(1): 107-161.
- 3 G Brambilla. Optical fibre nanowires and microwires: A review [J]. *Journal of Opt*, 2010, 12(4): 043001.
- 4 G Brambilla. Optical fibre nanotaper sensors [J]. *Opt Fiber Technol*, 2010, 16(6): 331-342.
- 5 Limin Tong, Fei Zi, Xin Guo, *et al.*. Optical microfibers and nanofibers: A tutorial [J]. *Opt Commun*, 2012, 285 (23): 4641-4647.
- 6 Yongmin Jung, Gilberto Brambilla, David J Richardson. Optical microfiber coupler for broadband single-mode operation[J]. *Opt Express*, 2009, 17(7): 5273-5278.
- 7 Zhengtong Wei, Zhangqi Song, Xueliang Zhang, *et al.*. KrF excimer laser fabricated Bragg grating in optical microfiber made from pre-etching conventional photosensitive fiber[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(4): 040603.
- 8 Zhengtong Wei, Zhangqi Song, Xueliang Zhang, *et al.*. Miniature temperature sensor based on optical microfiber [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(11): 110602.
- 9 Yang Yu, Xueliang Zhang, Zhangqi Song, *et al.*. Study on optical microfiber reflector with low reflectance [J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(1): 012301.
- 10 Ming Ding, Pengfei Wang, Gilberto Brambilla. Fast-response high-temperature microfiber coupler tip thermometer [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(14): 1209-1211.
- 11 Ming Ding, Pengfei Wang, Gilberto Brambilla. A microfiber coupler tip thermometer [J]. *Opt Express*, 2012, 20(5): 5402-5408.
- 12 Lin Bo, Pengfei Wang, Yuliya Semenova, *et al.*. High sensitivity fiber refractometer based on an optical microfiber coupler [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(3): 228-230.
- 13 G Y Chen, X L Zhang, G Brambilla, *et al.*. Theoretical and experimental demonstrations of a microfiber-based flexural disc accelerometer [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(18): 3669-3671.
- 14 G Y Chen, X L Zhang, G Brambilla, *et al.*. Enhanced responsivity of a flexural disc acceleration sensor based on optical microfiber [J]. *Opt Commun*, 2012, 285(23): 4709-4714.
- 15 G Brambilla, F Koizumi, X Feng, *et al.*. Compound-glass optical nanowires [J]. *Electron Lett*, 2005, 41(7): 400-402.
- 16 F P Payne, C D Hussey, M S Yataki. Polarisation analysis of strongly fused and weakly fused tapered couplers [J]. *Electron Lett*, 1985, 21(13): 561-563.
- 17 T A Birks, Y W Li. The shape of fiber tapers [J]. *J Lightwave Technol*, 1992, 10(4): 432-438.
- 18 Gu Bingsheng. Study on 3 dB wide band coupler in two-type waveguide model [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(2): 187-192.
- 顾炳生. 用两段式波导模型研究 3 dB 宽带光纤耦合器 [J]. *光学学报*, 1994, 14(2): 187-192.
- 19 He Na, Wu Chongqing, Wei Yan, *et al.*. Fused planar 3×3 single mode fiber coupler [J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(3): 323-327.
- 何娜, 吴重庆, 卫炎, 等. 熔锥平行排列 3×3 单模光纤耦合器的研究 [J]. *中国激光*, 2004, 31(3): 323-327.

- 20 Liang Huawei, Shi Shunxiang, Li Jiali. Theoretical study on coupling between nonparallel waveguides [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(4): 2993-2996.  
梁华伟, 石顺祥, 李家立. 非平行波导耦合理论研究[J]. 物理学报, 2007, 56(4): 2993-2996.
- 21 Liang Huawei, Shi Shunxiang, Li Jiali. Study on coupling in a multi-waveguides directional coupler [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(6): 1102-1106.  
梁华伟, 石顺祥, 李家立. 多波导定向耦合器耦合特性[J]. 光学学报, 2007, 27(6): 1102-1106.
- 22 Zhou Guorui, Feng Guoying, Yang Hao, *et al.*. The coupling efficiency between two bending nanofibers [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 38(7): 1767-1770.  
周国瑞, 冯国英, 杨 浩, 等. 弯曲纳米光纤的耦合问题研究 [J]. 光学学报, 2009, 38(7): 1767-1770.
- 23 M S Yataki, D N Payne, M P Varnham. All-fibre polarizing beam splitter[J]. Electron Lett, 1985, 21: 249-251.
- 24 J D Love, M Hall. Polarization modulation in long couplers[J]. Electron Lett, 1985, 21: 519-625.
- 25 Ma Bin. Design and Application Research of Coupling Fiber-Optic Vibration Sensor Based on Local Mode Coupling Theory [D]. Jinan: Shandong University, 2008. 59-75.  
马 宾. 基于局部模式耦合理论的耦合型光纤振动传感器设计与应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2008. 59-75.

栏目编辑: 王晓球