

# 四端口微纳光纤制作及特性研究

于 洋 张学亮 谢杰辉 宋章启 孟 洲

国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 针对通过双光纤直接拉伸法获得的腰区直径达到波长甚至亚波长尺度的微纳光纤耦合器(OMC)进行了制作与实验研究;实验结果显示,当OMC的腰区直径小于 $2.5\ \mu\text{m}$ ,其腰区耦合功能将消失,OMC将成为具有合束和分束功能的四端口微纳光纤(FPOM);通过在线监测样品拉制过程、工作稳定性测试、波长扫描等实验方法,分析并界定了OMC和FPOM的光学特性差异;采用基于光吸收制热效应的全光调制方法,分别对OMC和FPOM的光调制能力进行测试分析;FPOM具备稳定的光学传输特性,其分束比对波长、温度、传输光功率波动等物理参量不敏感,可用于微纳光子器件的集成;而经过结构优化设计的OMC不但可以用于温度、振动等传感研究,还具备作为全光调制器的潜力。

**关键词** 光纤光学;微纳光纤耦合器;全光调制;光致热效应

**中图分类号** O431.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0105002

## Investigation on Fabrication and Characteristics of Four Ports Optical Microfiber

Yu Yang Zhang Xueliang Xie Jiehui Song Zhangqi Meng Zhou

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

**Abstract** In this paper, optical microfiber coupler (OMC) with wavelength scale of waist region which is obtained with two twisted optical fibers by direct draw method is manufactured and experimentally studied. Experimental results show that coupling capacity will almost disappear when the diameter of the waist region is less than  $2.5\ \mu\text{m}$ . And the OMC will serve as the four ports optical microfiber (FPOM) with the capacity of combining and splitting light. We analyze and distinguish the optical properties between OMC and FPOM by the method of online monitoring the sample drawing process, the stability measurement and the wavelength scanning. Especially, an all optical modulation method based on thermal effect caused by light absorption is adopted for measuring the optical modulation capacity of the OMC and FPOM. The stable optical transmission properties of the FPOM are verified, and the splitting ratio is almost insensitive to wavelength, temperature, transmission optical power fluctuation and other physical parameters. Such properties ensure that the FPOM can be utilized to multiplex and integrate micro photonic devices. The OMC with structure optimization can be employed to sense the temperature and vibration, as well as potentially being used as an all optical modulator.

**Key words** fiber optics; optical microfiber coupler; all-optical modulator; light induced thermal effect

**OCIS codes** 230.4000; 060.2370

收稿日期: 2014-06-27; 收到修改稿日期: 2014-08-08

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,主要从事光纤传感、微纳光纤等方面的研究。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: zhoulm6806@163.com

## 1 引言

微光纤耦合器(OMC)作为重要的微纳光纤器件,已得到广泛研究,其主要获取方式有基于倏逝场耦合的微纳光纤搭靠法和双光纤直接拉伸法。其中采用双光纤直接拉伸法获得的OMC,结构及性能更为稳定,已被用于宽谱单模传输<sup>[1]</sup>以及温度、折射率、振动等物理参量传感研究<sup>[2-4]</sup>。已有研究介绍的该类型OMC,其腰区直径多在几个微米量级,但该类OMC制作过程中,一方面在其熔融拉伸过程中,会发生堆化现象,特别当其横向尺寸达到微米或亚微米尺寸时,两根光纤波导的物理边界将模糊;另一方面,OMC腰区耦合可视为平行并且无限靠近的两根光纤之间的耦合,但两光纤直径过细时,光纤间的模场重叠将过大,复合波导支持的反对称模式成为泄漏模,两光纤间将无法发生有效耦合<sup>[5]</sup>。而OMC拉伸腰区的横向尺度达到波长甚至亚波长量级,腰区两光纤间的模场重叠区将随着直径的减小而快速增大,OMC腰区的光场传输是否可以视为两根独立波导间的光场耦合,值得研究。并且,当光纤波导横向尺度达到波长甚至亚波长尺度后,通常被视为微纳光纤(OM)。为此,本文将对腰区尺寸达到波长量级的OMC进行制作与实验研究,并将腰区丧失耦合能力的OMC器件称之为四端口微纳光纤(FPOM)。并通过制作过程在线监测、波长扫描等一系列实验方法,定性分析出FPOM与以往文献[2-4]所报道的OMC(特指腰区具备耦合能力的OMC)的性能差异及光学特性表征。并采用基于光吸收制热效应的全光调制方法,从光学传输的内在物理本质上,对OMC和FPOM进行性能对比和功能开发。

## 2 OMC和FPOM制作及特性对比测试分析

采用两根常规通信光纤(SMF-28),在基于“改进型火焰扫描法”的OM拉制平台上,直接拉制OMC和FPOM样品<sup>[1,6]</sup>。所拉制的FPOM外形结构如图1所示,包括两个与常规光纤相连的锥形过渡区和一个中间均匀腰区。

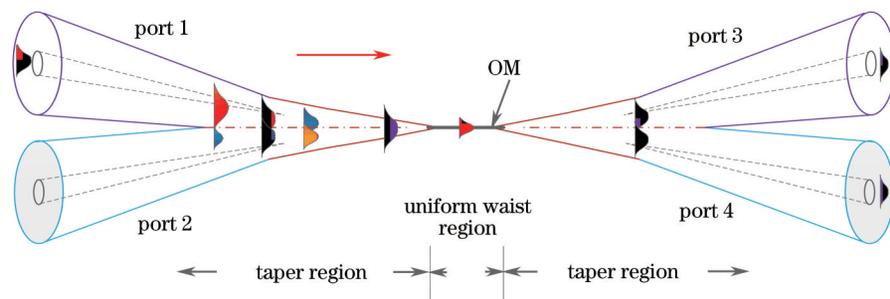


图1 四端口微纳光纤结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the four ports optical microfiber

与以往报道的OMC相比,FPOM的锥形过渡段与OMC外形相似,主要差别在于腰区不同。以往报道的OMC的耦合腰区具有耦合功能,可以视为两根平行、无限靠近的微纳尺度圆柱波导,可以用强耦合模理论进行分析<sup>[7]</sup>。而FPOM均匀腰区直径将达到波长或亚波长尺度,因其在熔融拉锥过程将会发生堆化现象,达到一定尺寸时,原有两根圆柱波导将堆化成为一根准圆柱形导光纤维,在受力均匀对称的情况下,将成为正规圆柱型波导,并丧失耦合效能。

在OMC和FPOM的锥形过渡段,均可视为两平行波导间的耦合。根据两波导直径以及距离的差异,可以分段为弱耦合区和强耦合区进行讨论,总耦合系数为各耦合段积分结果。但随着两波导直径逐渐减小,两波导间的模场重叠区将逐渐增大(模场重叠区大小与两波导直径一一对应)。当模场重叠达到一定值时,复合波导支持的反对称模式将截止,反对称模式成为泄漏模,两光纤间将无法发生有效耦合<sup>[5]</sup>。该模场重叠值对应的两波导直径可认为是双平行光纤耦合临界直径,当两波导直径小于该值时,将不能再视为两根独立波导,也不再会有波导间耦合现象发生,可以视为“单根波导”。以上讨论的FPOM的熔锥堆化段,其所起作用也可由以上耦合临界直径双平行光纤耦合临界直径来判定。

综上所述,FPOM的前锥形过渡区为合束区,后锥形过渡段为分束区。腰区OM将对光场起重新滤波作用,器件的分束特性由后锥形过渡区的耦合特性决定。

为验证 OMC 和 FPOM 的光学传输特性差异,首先对两类样品的制作过程进行了在线监测。实验时,采用 1550 nm 高相干半导体激光器(RIO, 3 kHz 带宽)从图 1 所示端口 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。采用高相干光源监测 OMC 和 FPOM 样品拉制过程,有利于得到其拉制过程中模式耦合及演变过程的细节信息。图 2、3 所示分别为 OMC 和 FPOM 样品拉制过程中,端口 3 直通端口的传输光监测结果及拉制系统显示的 OM 腰区直径(即 OMC 理论拉伸半径,忽略熔融堆化现象)。两样品设定的均匀腰区拉伸长度均为 10 mm,为最大限度保证锥形过渡区相似,设定的锥角修正参数也相同。

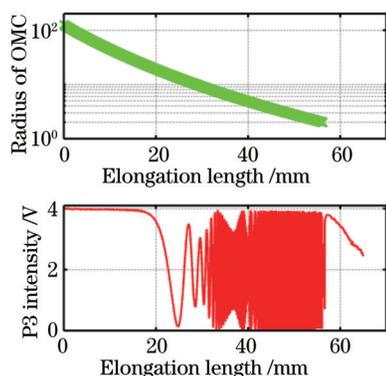


图 2 OMC 样品拉制过程在端口 3 输出在线监测结果及拉制系统显示的 OMC 腰区半径值(拉伸长度约 56 mm, 拉锥程序终止)

Fig.2 Monitoring results of port 3 and the waist radius shown in the control system during drawing process of OMC sample (when the waist radius reaches 56mm, the program terminated)

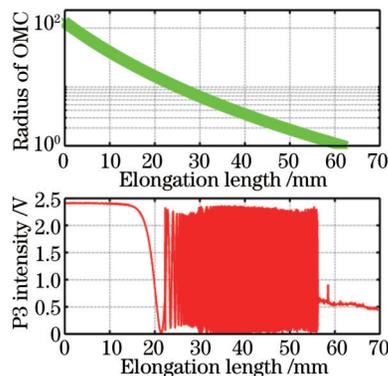


图 3 FPOM 样品拉制过程在端口 3 输出在线监测结果及拉制系统显示的 OMC 腰区半径值(拉伸长度约 62 mm, 拉锥程序终止)

Fig.3 Monitoring results of port 3 and the waist radius shown in the control system during drawing process of FPOM sample (when the waist radius reaches 62 mm, the program terminated)

如图 2 所示,在 OMC 样品拉制完成前时刻(拉伸长度约 56 mm,拉锥程序终止),端口 3 传输光强仍随拉伸长度增加发生周期性波动,即 OMC 两波导间仍有耦合现象。而在 FPOM 样品拉制过程中,在系统拉伸长度约 57.8 mm,OM 拉制系统显示的 OM 直径(即 OMC 腰区半径)约为 1.23  $\mu\text{m}$  后,端口 3 传输光强趋于稳定,两波导间耦合现象消失。

对于一根直径为 1.23  $\mu\text{m}$  的 OM,若传输 1550 nm 光,则有约 80% 的光场能量在 OM 波导物理边界内传输,即有约 20% 的能量以倏逝场在波导边界外传输<sup>[7]</sup>。该实验结果验证了前述分析结论,即腰区两波导直径小到一定值时,将不再视为两根独立的波导,而是融为一体的微纳光纤,其腰区耦合效能消失,该 OMC 将成为 FPOM。

实验时,分别对 OMC 和 FPOM 样品进行了光学显微镜实物照拍测试,如图 4 所示。FPOM 样品腰区双波导界限不复存在,而是形成单一圆柱波导,即成为微纳光纤,测试直径为 1.43  $\mu\text{m}$ ,相对于系统初始设定的直径为 2  $\mu\text{m}$ ,熔融堆化现象明显。OMC 样品的测试结果显示其腰区直径约为 3  $\mu\text{m}$ ,其结构为两平行波导,界限明显。

图 5 所示为 FPOM 样品锥形过渡段中,开始发生明显熔融堆化现象的区域显微镜照拍图。从图中平行线及箭头所指示位置可以看出,两波导中间不再是清晰的分界线,并随着腰区光纤逐渐变细(图中箭头指示方向),中间“凹陷”区逐渐消失,两波导融为一体。此过渡段的光学显微镜直径测试结果约为 2.6  $\mu\text{m}$ ,与 FPOM 样品拉制过程中所监测到的两波导能量交换终止位置对应的 OMC 腰区直径相近(约 2.46  $\mu\text{m}$ )。两实验手段分别证明了,对于双光纤拉锥型 OMC,当期腰区直径小到一定值时(以上实验测量值显示该值示约为 2.5  $\mu\text{m}$ ),一方面由于熔融堆化现象存在;另一方面由于腰区直径小到一定尺度后,两波导的模场重叠区过大,将视为一根波导,腰区将丧失耦合功能,此类 OMC 即为 FPOM。

以上实验通过样品的物理结构特性测试,对 OMC 和 FPOM 进行了特性表征界定,下面将对两类器件的光学传输特性进行测试分析。

在 OMC 和 FPOM 样品拉制完成后,分别对两样品进行了工作稳定性测试。图 6 所示为两样品监测过程

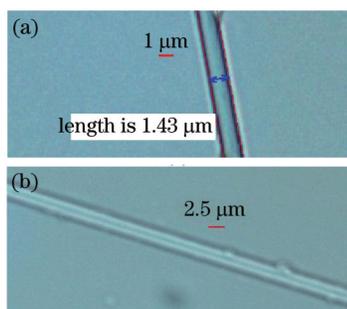


图4 (a)FPOM及(b)OMC样品腰区光学显微镜实物拍照图  
Fig.4 Diagram of microscope photographs of (a) FPOM and (b) OMC

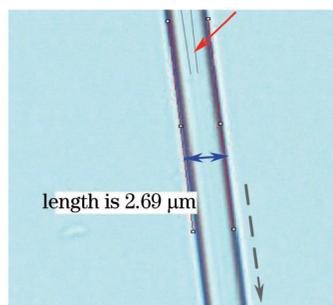


图5 FPOM过渡区的熔锥堆化段光学显微镜实物拍照图  
Fig.5 Diagram of microscope photographs of the FPOM's fused deposition area

中,其耦合比测试结果。在监测过程中,OMC的耦合比会发生大比例的周期性慢漂。这主要是由环境温度变化导致OMC其腰区折射率 $n$ 发生变化,进而导致OMC耦合比变化。因OMC腰区具备强耦合能力,因此对外界环境较为敏感,顾不适合作为稳定的光传输器。

相比之下,FPOM的分束比则较为稳定。其少许波动(约0.05)表明,决定其分束特性的后锥形过渡区仍会受环境影响。通过合理的锥角设计,可以一定程度上降低其锥形过渡区对环境的响应。

另外,还对两样品的波长特性进行了测试。实验时,采用Agilent光源,在1550 nm工作波长附近,对样品进行波长扫描实验,实验结果如图7所示。随着光源输出波长的变化,OMC耦合比会发生有规律的整周期变化(约扫描2.8 nm,耦合比波动一个周期),调制深度甚至接近1。OMC的输出特性对传输波长变化十分敏感,甚至可以感受到激光器波长扫描过程的阶梯突变。相较而言,FPOM的耦合比波动幅度则很小,对波长相关性不强。以上实验验证了FPOM传光特性较为稳定,相较OMC,其腰区耦合效能消失,对外界温度、湿度等环境变化不敏感。

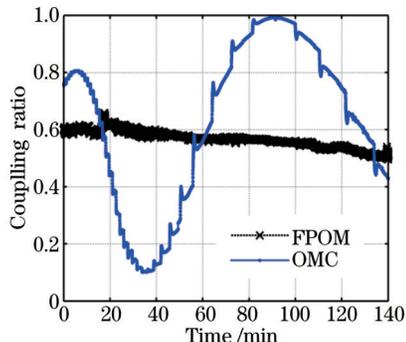


图6 1550 nm光注入OMC和FPOM样品置实验室自然环境下的耦合比变化情况

Fig.6 Coupling ratios of the OMC and FPOM sample under the natural laboratory environment with injecting the light of 1550 nm

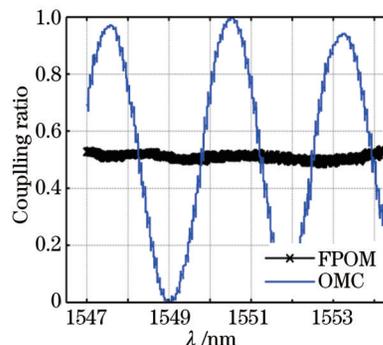


图7 光源波长扫描过程中,OMC和FPOM的耦合比变化情况

Fig.7 Coupling ratios of the OMC and FPOM sample with the scanning of light source

### 3 OMC及FPOM光致热调制性能测试研究

已有研究表明,利用掺杂光纤内的光吸收致热效应可实现全光相位调制,但调制效率较低<sup>[8-9]</sup>。而微纳光纤的强光约束能力和高效的热传导能力,则有利于提高光致热的全光调制效能。目前,已实现了基于微纳光纤的全光相位调制<sup>[10]</sup>。而OMC具有微米量级耦合腰区,若其中发生光致热效应,将使该区域的折射率和波导结构发生变化,而OMC的耦合输出特性又依赖其腰区波导折射率和波导结构,因此OMC传输光特性会受到光致效应调制<sup>[11]</sup>。OM的强光约束能力可将光功率密度放大近百倍,有利于实现更高效能的光与波导材料相互作用。而FPOM的腰区已成为OM,因此对OMC和FPOM样品进行光致热调制性能测试,有利于从光传输的物理机理上,了解两类器件的差异。

实验时,构建了如图8所示的光强度调制测试系统。其中信号光源(1550 nm 半导体激光器, RIO, 3 kHz 带宽)经隔离器与样品的端口1相连,样品输出端口3经 980/1550 nm WDM 与光电探测器 D1 相连,输出端口4直接与探测器 D2 相连,分别通过示波器和电脑采集检测信号光(1550 nm)的受调制情况。980 nm 抽运光经 3 dB 耦合(980 nm)后,一路与 980 nm/1550 nm WDM 的 980 nm 端口相连,将抽运调制光反向注入以加热样品腰区,一路与光电探测器(New Focus, Model 1623)D3 相连。采用 980 nm/1550 nm WDM 的目的是引入 980 nm 抽运光并分离 1550 nm 信号光中可能混有 980 nm 抽运光。端口2经光纤接头(FC)与匹配液匹配,最大限度消除端面反射。980 nm 抽运激光器由激光驱动源(ILX Light wave LDC-37488B)控制,通过信号发生器在激光驱动源上施加不同信号,以实现 980 nm 抽运光的驱动调制。

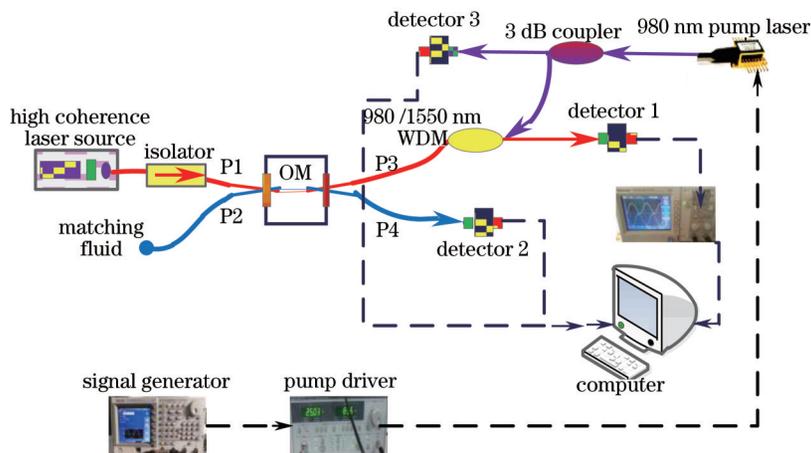


图8 全光强度调制测试系统示意图

Fig.8 Schematic diagram of the measurement system for light intensity

首先,采用准静态调制的方式对 OMC 和 FPOM 样品进行光调制性能测试。

为使 980 nm 抽运光发生准静态的增大或减小,在 980 nm 激光器的驱动源上施加  $f=0.01$  Hz 的甚低频的三角波调制,进而使 980 nm 激光器输出的光功率周期性地缓慢变化。利用示波器,对 980 nm 抽运光进行标定。通过在 980 nm 驱动源上施加合理的调制幅度和偏置电压,使 980 nm 激光器输出光的强度调制深度  $M$  约为 1。

在 980 nm 强度调制光的作用下,OMC 两输出端口(P3,P4)输出的 1550 nm 光功率均会同步发生周期性波动,并且变化趋势共轭。在 980 nm 强度光的一个调制周期内,随着输入 980 nm 光功率的增大,P3/P4 输出的 1550 nm 光功率会连续波动几个周期,并且调制深度可接近 1。说明 OMC 对光吸收致热效应较为敏感,在较小的调制光功率作用下,即可实现对工作光的整周期强度调制(调制深度  $M$  可达到 1)。

然而,在 980 nm 强度调制光的作用下,FPOM 两输出端口(P3,P4)输出的 1550 nm 光功率的变化趋势却一致,都随着 980 nm 调制光的增大同步地增大,即其耦合器效能基本消失。1550 nm 工作光功率输出会形成与 980 nm 抽运源的调制信号一致的三角波型。虽然 FPOM 也产生了传输光强度调制效能,但波动幅度不大。该调制可能是由于 OMC 腰区的 OM 被 980 nm 强度调制抽运加热,从而引起波导材料热膨胀,进而使传输损耗减小所致(当 OM 直径变大时,倏逝场比例会减小)。FPOM 的调制机理及特性与 OMC 明显不同,前者是热效应导致腰区传输损耗发生变化,后者则是热效应引起腰区耦合结构变化,进而使耦合效率发生明显改变。

图 9、10 所示分别为 980 nm 强度光调制下,OMC 和 FPOM 样品的耦合比变化情况。在 980 nm 强度调制光的作用下,OMC 的耦合比会大幅波动几个周期(调制深度  $M$  可接近 1),且随着调制光功率的增大,耦合比波动周期变大(与热量传导效率有关<sup>[8]</sup>)。而 FPOM 的耦合比波动周期与 980 nm 光调制周期一致,但波动幅度很小(约 0.04),几乎可以忽略。虽然 FPOM 的腰区会发生更高效的光与波导材料相互作用,但腰区丧失耦合效能,腰区的热效应只会改变腰区的损耗特性,而无法改变器件的整体分束比,即只剩下锥形过渡区对器件分束比起调制作用。故与 OMC 相比,FPOM 的基于光致热效应的光效率很低。

以上实验从光内在传输与调制机理上,再一次验证 FPOM 样品的均匀腰区耦合性能已基本丧失,其锥形

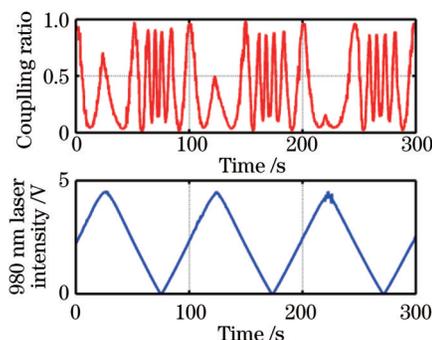


图9 980 nm强度调制光( $f=0.01$  Hz,  $P=0.3\sim 26$  mW)注入OMC样品过程中,其耦合比变化情况

Fig.9 Coupling ratios of the OMC sample during injecting the intensity modulation light (980 nm,  $f=0.01$  Hz,  $P=0.3\sim 26$  mW) to OMC sample

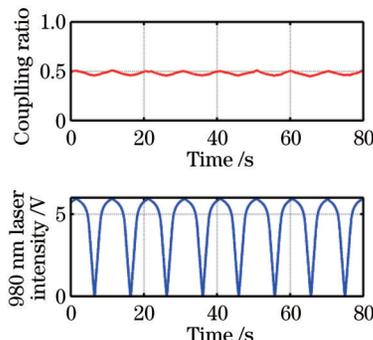


图10 980 nm强度调制光( $f=0.1$  Hz,  $P=17\ \mu\text{W}\sim 34$  mW)注入FPOM样品过程中,其耦合比变化情况

Fig.10 Changes coupling ratios of the FPOM sample during injecting the intensity modulation light (980 nm,  $f=0.01$  Hz,  $P=17\ \mu\text{W}\sim 34$  mW) to OMC sample

过渡区(即其合束功能和分束功能的区域)具有一定耦合效能。同时也说明,OMC的高效光调制效能主要来自其较细并具有强耦合能力的腰区。

其次,对OMC和FPOM样品进行了动态光调制实验。

实验时,将980 nm驱动源调制信号改为正弦波,调制深度保持 $M\approx 1$ ,分别对OMC和FPOM样品构成的全光强度调制系统的输出响应特性进行测试。图11、12分别为两样品的端口4输出1550 nm工作光信号的示波器测试图。从图中可以看出,基于OMC的光强度调制系统可以实现与980 nm强度调制光同频稳定的强度信号调制,且1550 nm工作光的强度调制深度可达42%。而基于FPOM的光强度调制系统,输出信号噪声较大,调制效率不高,1550 nm工作光的强度调制深度只有3%。

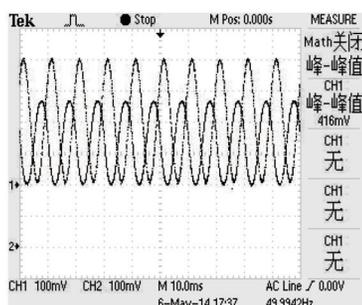


图11 OMC样品所构建的光调制系统,在其动态调制过程中( $f=100$  Hz),示波器显示的980 nm调制光信号(CH1)和系统输出值(CH2)

Fig.11 Oscilloscope display ( $f=100$  Hz) of 980 nm laser modulation signal (CH1) and the output of the system (CH2) for OMC sample

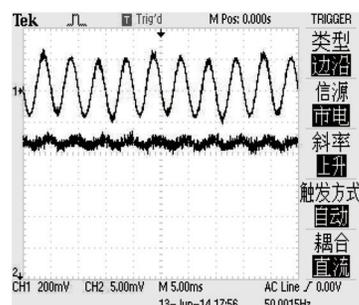


图12 FPOM样品所构建的光调制系统,在其动态调制过程中( $f=200$  Hz),示波器显示的驱动源调制电信号(CH1)和系统输出值(CH2)

Fig.12 Oscilloscope display ( $f=200$  Hz) of modulation signal of 980 nm laser pump driver (CH1) and the output of the system (CH2) for FPOM sample

另外,实验过程中,关闭980 nm调制光,P3/P4端口输出的1550 nm工作光的调制信号会立刻消失,而关闭1550 nm工作光时,P3/P4端口则无信号输出,表明1550 nm工作光中没有混有980 nm调制光,并证明样品传输的1550 nm信号光受980 nm抽运光强度调制。实验表明,两输出端口(P3,P4)测试结果相似,并且以图8所示的980 nm光注入方式,P4端口输出的1550 nm工作光中并未耦合980 nm光,该全光强度调制简单,方便光路集成。

通过以上对OMC和FPOM两类器件,基于光致热效应的全光强度调制能力的对比测试,再一次验证了FPOM的腰区已经丧失耦合效能,并成为微纳光纤。FPOM光调制效率较低,器件分束比对传输光功率的波动不敏感,不会产生寄生的光传输特性变化,可用于光器件集成。而OMC具有很高的光调制效率,其耦合腰区的耦合效能对光致热效应极其敏感,传输光强度波动将引起其耦合比发生变化,存在寄生光学效应。同

时也验证了,经过合理结构优化设计的 OMC 将具备成为光调制器或光开关的能力<sup>[12]</sup>。为使 OMC 具备高效的光致热调制效能,其外形结构必须兼顾灵敏的耦合效能,最大限度增强光与波导材料的相互作用。

## 4 结 论

以往研究多关注 OMC 的耦合器作用,而较少关注其腰区尺度达到波长甚至亚波长尺度,并丧失耦合性能后的光学特性。通过对 OMC 和 FPOM 两类器件的制作与对比测试研究,界定了两类器件的光学特性表征。特别是采用基于光吸收致热效应的全光调制系统,对两类器件进行了性能测试,从光传输与调制的内在物理本质上对两类器件的光学性能进行了分析。FPOM 光学传输特性稳定,其分束比对波长、温度、传输光功率波动等物理参量不敏感,可用于微纳光子器件的集成。而 OMC 腰区对温度、振动、传输波长变化等物理参量极其敏感,除可进行传感外,还可实现全光调制器和光开关的功能。

## 参 考 文 献

- 1 Yongmin Jung, Gilberto Brambilla, David J Richardson. Optical microfiber coupler for broadband single-mode operation[J]. Opt Express, 2009, 17(7): 5273-5278.
- 2 Ming Ding, Pengfei Wang, Gilberto Brambilla. Fast-response high-temperature microfiber coupler tip thermometer[J]. Photonics Technology Letters, 2012, 24(14): 1209-1211.
- 3 Ming Ding, Pengfei Wang, Gilberto Brambilla. A microfiber coupler tip thermometer[J]. Opt Express, 2012, 20(5): 5402-5408.
- 4 Lin Bo, Pengfei Wang, Yuliya Semenova, *et al.*. High sensitivity fiber refractometer based on an optical microfiber coupler[J]. Photonics Technology Letters, 2013, 25(3): 228-230.
- 5 K Huang, S Yang, L Tong. Modeling of evanescent coupling between two parallel optical nanowires[J]. Appl Opt, 2007, 46(9): 1429-1434.
- 6 G Brambilla, F Xu, X Feng. Fabrication of optical fibre nanowires and their optical and mechanical characterization[J]. Electronics Lett, 2006, 42(9): 517-519.
- 7 F P Payne, C D Hussey, M S Yataki. Polarisation analysis of strongly fused and weakly fused tapered couplers[J]. Electronics Lett, 1985, 21(13): 561-563.
- 8 Limin Tong, Jingyi Lou, Eric Mazur. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides [J]. Opt Express, 2004, 12(6): 1025-1035.
- 9 M K Davis, M J F Digonnet, Richard H Pantell. Thermal effects in doped fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(6): 1013-1023.
- 10 M J F Digonnet, R W Sadowski, H J Shaw, *et al.*. Resonantly enhanced nonlinearity in doped fibers for low-power all-optical switching: a review[J]. Optical Fiber Technology, 1997, 3(1): 44-64.
- 11 Zhangqi Song, Yang Yu, Xueliang Zhang, *et al.*. All-optical phase modulator based on optical microfiber[J]. Chin Opt Lett, 2014, 3(1): 44-64
- 12 Yang Yu, Xueliang Zhang, Zhangqi Song, *et al.*. Investigation on an all-optical modulator based on an optical microfiber coupler[C]. IPTA 2014, 2014(5).

栏目编辑: 韩 峰