

微纳光纤耦合器光致热引起的全光强度调控特性

于洋^{1,2}, 卞强², 张学亮², 杨俊波¹

¹国防科技大学文理学院, 湖南 长沙 410073;

²国防科技大学海洋科学与工程研究院, 湖南 长沙 410073

摘要 对微纳光纤耦合器(OMC)光吸收致热引起的全光强度调控特性进行了理论分析和实验研究。理论分析结果显示,OMC 全光强度调控器件的调制响应效率与 OMC 腰区长度、抽运光在 OMC 腰区的损耗系数及抽运调制光强成正比,而与 OMC 腰区耦合光纤的半径成反比。通过实验将强度调制的 980 nm 抽运光注入 OMC 以加热其腰区,实现了对 OMC 传输的 1550 nm 工作光的全光调控功能。在百微瓦量级的调控光功率作用下,OMC 全光强度调控器件即可实现整周期、大调制深度的强度调制,且在较小调制光功率下,调制响应信号幅度与调制信号幅度呈线性响应关系。OMC 光热调控最小响应调制光功率为几十微瓦量级。研究成果为开发基于 OMC 光致热效应的光衰减、光开关及强度调制器等全光功能器件提供了实验数据,并为微纳光子集成光路热稳定性管控及片基量子通信系统安全性研究提供了可借鉴的研究方案。

关键词 光纤光学; 微纳光纤耦合器; 全光调制; 光致热效应; 光热效应; 强度调制

中图分类号 O431.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0606003

All-Optical Intensity Modulation Characteristics of Optical Microfiber Coupler Based on Light Induced Thermal Effect

Yu Yang^{1,2}, Bian Qiang², Zhang Xueliang², Yang Junbo¹

¹College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

²College of Meteorology and Oceanology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Based on light induced thermal effect, all-optical intensity modulation characteristics of optical microfiber coupler (OMC) are studied. The theoretical analysis shows that, the modulation response efficiency of OMC is proportional to the waist length, loss coefficient, and pump modulation intensity, and is inversely proportional to the radius of the OMC waist coupling fiber. In the experiment research, the intensity modulated 980 nm pump light is injected into the OMC to heat the waist region, and the all-optical control function of the 1550 nm working light transmitted by OMC is obtained. The results show that, the OMC can realize intensity modulation with a whole cycle and a large modulation depth under modulation pump power of hundreds of microwatts. In addition, the amplitude of the modulation response signal has a linear response to the amplitude of intensity modulated 980 nm pump light in a low power region. The threshold of the required modulated pump light power is as low as several dozens of micro watts. The research has provide experimental data for the development of all-optical functional devices, such as optical attenuation, optical switch, intensity modulator, and it also provides a reference scheme for the control of the thermal stability of photonics integrated equipment and the security of quantum communication system.

Key words fiber optics; optical microfiber coupler; all-optical modulation; light induced thermal effect; photothermal effect; intensity modulation

OCIS codes 060.1810; 060.4080; 060.2370; 230.4000; 190.4870

收稿日期: 2017-12-15; 收到修改稿日期: 2018-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(61705262)

作者简介: 于洋(1984—),男,博士,讲师,主要从事光纤传感、微纳光纤等方面的研究。E-mail: yuyang08a@nudt.edu.cn

1 引言

光纤型及波导型耦合器是实现光学系统集成和构成其他功能型光电子器件的基础器件。其中,微纳光纤耦合器(OMC)作为一种介观光子器件,一方面便于与现有光学系统集成,实现传感、光束滤波、光调控等功能^[1-14];另一方面具备亚波长尺度波导特性,即具有微纳光子器件的相应特性,使 OMC 在微纳光子集成和新型微纳光子功能器件开发应用等方面存在巨大的研究价值^[13-15]。OMC 的耦合腰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),可视为 2 根平行微纳光纤组成的复合波导或准圆柱型的单根“微纳光纤”^[1]。

早期研究显示,微纳光纤具有更高效的光吸收致热性能,并具有较大的表面积体积比,可使微纳光纤热传导能力更强,现已被开发成基于光热效应的全光相位调制器^[16],这意味着 OMC 较细的耦合腰区也可能具备较强的光吸收致热效应。另外,特定参数下的 OMC 耦合腰区对环境温度十分敏感,并已用于温度传感^[10-12]。若 OMC 中产生较强的内光吸收致热效应,则会使其耦合区波导折射率和波导结构发生变化,进而对其传输信号光产生调制。另外,值得关注的是,在片基量子密钥分发(QKD)系统中,广泛采用波导耦合器及其构成的各类功能器件,并多采用热光调制效应(或金属镀膜微加热器)便可实现光调制、衰减等光强调控功能^[17-19]。而在这种微纳光子集成光路中,波导间光耦合及器件的热稳定性将会直接影响稳定性、信噪比、误码率等系统性能^[17]。因此,对 OMC 的光热调控特性展开研究,一方面利于获得基于 OMC 光热效应的全光强度调制功能器件,另一方面也可为微纳光子集成光路热稳定性控制及片基量子通信系统安全性提供可借鉴的研究方案。

本文以双光纤直接拉伸而成的 OMC 为研究对象,对其光热全光强度调控特性进行理论分析,并进行实验测试研究。

2 OMC 光热调控原理及特性分析

2.1 OMC 耦合特性

双光纤拉伸而成的 OMC 大多采用文献[20]的体积绝热拉伸模型拉制而成,主要由 2 个锥形过渡区和 1 个中间均匀腰区组成,并带有 4 个尾纤端口。整个 OMC 结构包含弱耦合段和强耦合段,但其锥区梯度变化足够缓慢,故可采用局部模式耦合理论

对 OMC 的耦合特性进行定性分析,即在 OMC 耦合区较小的局部区域内,可视为 2 根独立波导(光纤)之间的耦合,其能量是该位置前面所有能量耦合的叠加。OMC 总的耦合是过渡区耦合和均匀腰区耦合的叠加,其耦合输出特性由较细的锥形过渡区和腰区决定^[1],假定 OMC 波导结构对称时,两输出端的功率可表示为^[2]

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

式中: P_0 为输入光功率; l 为耦合区长度; $c(z)$ 为微纳光纤耦合器不同位置的耦合系数。 $c(z)$ 可表示为^[2]

$$c(z) = \frac{3\pi\lambda}{32n_2r^2} \frac{1}{(1+1/V)^2}, \quad (2)$$

$$V = krn_2(2\Delta)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

式中: Δ 为相对折射率差, $\Delta = \frac{(n_2^2 - n_3^2)}{2n_2^2}$; k 为真空中的波数, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; r 为耦合光纤的半径; λ 为光波长; n_2 和 n_3 分别为光纤包层和空气包层(或外层介质)折射率; V 为导模的归一化频率。由(1)式和(2)式可见,OMC 耦合比由光纤包层、外层介质包层、工作波长、耦合区长度及耦合光纤半径共同决定,改变以上各参量将对 OMC 输出光谱产生调控作用,进而实现传感及调制等功能^[3-12]。

OMC 均匀腰区(即火焰扫描加热区)直径可以达到微米或纳米量级,在拉伸过程中,其较细腰区的 2 根光纤会发生熔锥现象,当腰区细到一定程度甚至可以视为准正规微纳光纤^[1]。由微纳光纤传输特性可知,随着 OMC 腰区光纤直径的减小,两耦合微纳光纤内所传输基模的场重叠区会增大,进而导致耦合系数增大,而耦合系数过大会出现反对称模截止现象^[22]。由此可以推断,对于 OMC 较细的腰区,当两光纤间的模场重叠过大时,其耦合已经不能视为复合波导两基模间的“干涉”,这意味着,OMC 腰区细到一定程度,其输出耦合比与传输光波长和波导折射率的相关性将减弱,即 OMC 两臂能量耦合及输出特性对工作波长及波导折射率变化的敏感度降低。因此,该类型 OMC 对环境不敏感,不适用于传感应用^[23]。基于此,OMC 已被开发成宽谱单模传输分束器件^[1]。

2.2 OMC 光热全光调制特性

全光调控器件基本工作原理大多是用一路自身带有特定调制信号的调制光注入调制器,使调制器波导材料产生相对应的热效应或非线性效应等,进而对调制器中传输的另一路工作信号光产生相位调制、开关、强度调制或信号加载等作用^[24-25]。OMC 全光调控工作原理是:当一路强度调制抽运光经 port2 端口注入 OMC 时,部分抽运光会被光纤材料

吸收,进而对 OMC 较细腰区产生加热作用;而光热效应会使 OMC 腰区波导折射率发生变化,进而使 OMC 耦合系数发生变化,因此会对 port1 端口注入的工作光产生调控作用,从而使 OMC 的 port3 和 port4 端口的输出工作光产生共轭强度调控功能,如图 1 所示。对于 OMC 较粗的锥形过渡期,因单位长度加热体积较大,热光调制效率较低,对 OMC 强度调控影响可以忽略不计^[16,24]。

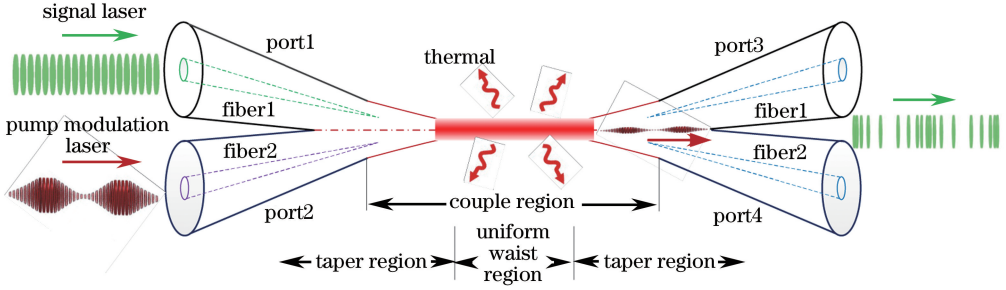


图 1 复合 OMC 结构及光热全光调控原理示意图

Fig. 1 Schematic of the composite OMC and the photothermal all optical modulation theory of OMC

对于光纤波导材料,热光系数远大于热膨胀系数(SiO_2 光纤的热膨胀系数为 $5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$,热光系数为 $1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$),因此,本文暂且只考虑光致热效应引起的波导折射率变化对 OMC 的调控作用。OMC 的腰区直径最细,可被视为 2 根“微纳光纤”组成的复合波导,且对光场的约束能力最强,故腰区的光致热调控效率也最高^[16,24]。实际上,OMC 均匀腰区对耦合输出起主导作用,为方便分析,可只考虑均匀腰区光吸收致热对耦合输出的影响^[16]。假设 OMC 耦合区截面光场能量分布均匀,即认为截面热场分布为阶梯型,则光致热效应引起的折射率变化各向同性。基于以上近似分析条件,可令腰区波导折射率变化量 $\Delta n_2(z) = \Delta n_2$ 。只考虑瞬态光热效应时(即忽略热传导问题),OMC 腰区的光致热转换公式可表示为

$$Q = Cm \Delta T = C \rho \pi r^2 L \Delta T = \eta \alpha L I_p, \quad (4)$$

式中: Q 为 OMC 腰区温度升高 ΔT 所需热量; m 为 OMC 均匀腰区光纤质量; C 为波导材料比热容 [SiO_2 材料为 $741 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]; ρ 为波导材料密度 (SiO_2 材料为 $2320 \text{ kg}/\text{m}^3$); α 为抽运光在 OMC 腰区的损耗系数; η 为光吸收转化为热量的转化系数; I_p 为抽运调制光强; L 为均匀腰区长度。则由(4)式可得,光热效应引起的 OMC 腰区折射率变化量为

$$\Delta n_2 = \gamma \Delta T = \gamma \frac{\eta \alpha I_p}{C \rho \pi r^2}, \quad (5)$$

式中: γ 为光纤热光系数。为方便计算,假设 OMC 样品对信号光分束比为 1:1。光致折射率变化引起 OMC 腰区耦合系数的变化可表示为 $\Delta c = \frac{\partial c}{\partial n} \Delta n$ 。若只考虑瞬态光热效应,则在强度调制抽运光作用下,光热调制引起的 OMC 输出端口信号光功率波动为

$$\Delta P = \pm \frac{P_0}{2} \sin(2L \Delta c) = \pm \frac{P_0}{2} \sin(2LM \Delta n) = \pm \frac{P_0}{2} \sin\left(\frac{2LM \gamma \eta \alpha I_p}{C \rho \pi r^2}\right), \quad (6)$$

式中: P_0 为注入 OMC 信号光功率; \pm 分别代表 OMC 的 port3 和 port4 输出端口。 M 为光致折射率变化引起的 OMC 腰区耦合系数变化率,其表达式为

$$M = \frac{\partial c}{\partial n} = \frac{3\pi^3}{8\lambda} \left[\frac{2}{(1+V)^2} - \frac{2V}{(1+V)^3} \right] - \frac{3\pi\lambda V^2}{32n_2^2 r^2 (1+V)^2} \quad (7)$$

在抽运调制光功率 I_p 较小的情况下,(6)式可表达为

$$\begin{cases} \Delta P_3 = -P_0 M L \frac{\gamma \eta \alpha I_p}{C \rho \pi r^2} \sin(\pi f t) \\ \Delta P_4 = P_0 M L \frac{\gamma \eta \alpha I_p}{C \rho \pi r^2} \sin(\pi f t) \end{cases} \quad (8)$$

由(6)式可以看出,OMC 全光强度调控器件的调制响应效率与 OMC 腰区长度 L 、抽运光在 OMC

腰区的损耗系数 α 及抽运调制光强 I_p 成正比,而与 OMC 腰区耦合光纤的半径 r 成反比。因此,要获得较高调制效率的 OMC 全光强度调控器件,需采用腰区长度较长和腰区较细的 OMC 样品。利用(6)式对 OMC 的光热强度调控响应能量进行仿真计算,结果如图 2 所示。仿真时,光吸收转化为热量的转化系数 η 设为 0.1,抽运光在 OMC 腰区的损耗系数 α 设为 0.1 dB/mm,工作波长选为 1550 nm。由仿真结果可知,采用调制功率约为 0.5 mW 的抽运调制光时,OMC 即可实现整周期调制,调制深度可达 100%。另外仿真计算显示,OMC 腰区耦合光纤半径越小,OMC 调制效率越高。值得注意的是,OMC 腰区过细时,OMC 将丧失耦合“干涉”特性,即调制效率反而会降低。因此,要获得较高调制效率和较宽调制带宽的 OMC 强度调控器件,需对 OMC 结构进行进一步优化设计。另由(7)式可知,在较小的抽运光调制光作用下,OMC 调制响应幅度与抽运调制光功率呈正线性关系。因此,基于光热效应,通过改变抽运调制光的强度调制信号模式,可实现对 OMC 输出信号光不同形式的强度调控。

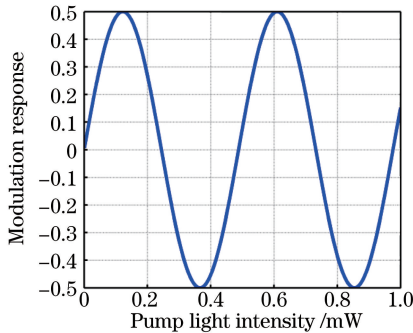


图 2 OMC 光热调制响应仿真结果

Fig. 2 Simulation results of the modulation response of the OMC

在 OMC 较细的耦合腰区,横向尺寸已达到微米量级,可视为 2 根“微纳光纤”间的光耦合。这意味着 OMC 腰区的热吸收及热传导特性与微纳光纤(OM)相似,也预示着 OMC 的光调制频响特性与 OM 相位调制器的频响特性相近,即调制响应效率与调制频率成反比^[16,26]。

3 OMC 光热全光调控特性测试

3.1 OMC 全光调控测试系统构建

由理论分析可见,OMC 要实现光热全光强度调控功能,其耦合比应与工作光波长及波导折射率的相关性较强,即应具备耦合“干涉”特性^[22]。参考以往文献所报道的传感型 OMC 结构参数^[23],本文

先将 OMC 的理论拉制参数设定为:OMC 样品腰区耦合光纤半径 $r=1 \mu\text{m}$,均匀腰区长度 $L=10 \text{ mm}$,其拉制过程的监测结果如图 3 所示。OMC 样品拉制过程即其耦合锥形过渡区和腰区变细增长的过程。而由(1)式和(2)式可知,随着腰区变细(即 r 减小),局部耦合系数 $c(z)$ 会逐渐增大,且随着耦合长度的增加,能量在两耦合输出端发生全交换时所需的耦合长度变化量会逐渐变小,发生全交换的周期也会逐渐减小,监测结果直观验证了以上分析结果。

由图 3 所示的监测数据时频分析结果可知,OMC 拉制过程中存在一条能量较强的干涉信号带(由红色表征,颜色越浅能量越小)。该干涉能量带代表耦合光纤两基模间的“干涉”信号,而其他能量较弱的干涉信号带为光纤包层激励的高阶模式所形成的模间干涉^[27-28](因光纤外折射率差大于光纤内折射率差,故两耦合光纤之间的能量耦合大于基模向高阶模式的能量耦合^[20,22])。OMC 样品拉制完成时(样品总拉伸时间约 562 s),其耦合输出仍存在“干涉”波动。监测数据时频分析结果表明,该样品的两基模具有耦合“干涉”特性,故该样品预期将具备热光调制响应能量。

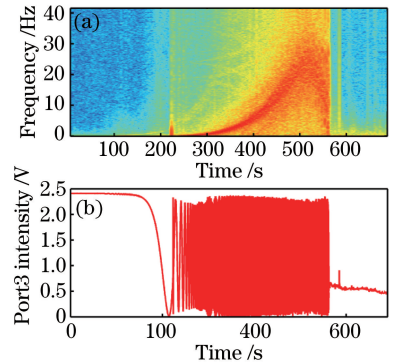


图 3 (a) OMC 样品拉制过程在线监测;
(b) port3 端口数据时频分析结果图

Fig. 3 (a) Transmission intensity of the OMC sample during the fabrication process;
(b) time-frequency analysis results of port3

采用以上传感型 OMC 样品构建了一套全光强度型调控测试系统,结构如图 4 所示。系统采用受强度调制的 980 nm 抽运光加热 OMC 腰区,同时监测 OMC 传输的 1550 nm 工作光变化情况,进而测试 OMC 的光热调制特性。系统中信号光源(1550 nm 半导体激光器,RIO 公司生产,2 kHz 线宽)经隔离器与样品的 port1 端口相连,样品输出端口 port3 经 980/1550 nm 波分复合器(WDM)与光电探测器 D1 相连,输出端口 port4 直接与探测器

D2 相连, 分别通过计算机采集检测信号光 (1550 nm) 的受调制情况。980 nm 抽运光经 3 dB 耦合器 (980 nm) 传导后, 一路与 980/1550 nm WDM 的 980 nm 端口相连, 将抽运调制光反向注入加热样品腰区, 另一路与光电探测器 (New Focus, Model 1623) D3 相连。采用 980/1550 nm WDM 的目的是引导 980 nm 抽运光进入 OMC, 并分离 OMC 输出的 1550 nm 信号光中可能混有的 980 nm

抽运光。port2 端口经光纤接头 (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 抽运光的强度调制。通过监测 OMC 两输出端口 (port3/port4) 的传光功率, 并结合一定数值计算, 可反馈调控 980 nm 抽运激光器, 进而可实现 OMC 的光控制功能。

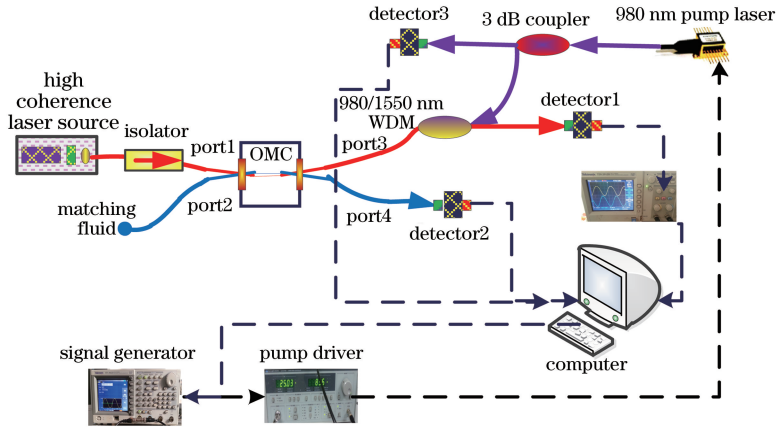


图 4 OMC 光强度控制系统结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram for the construction of OMC optical intensity modulation system

3.2 OMC 全光调控特性测试

为了解 OMC 的光致热调控响应特性, 采用准静态方式改变注入其腰区的 980 nm 抽运调制光功率, 并对其输出的 1550 nm 工作信号光的调控情况进行监测。在进行光调制实验之前, 对 980 nm 激光器的输出功率特性进行标定测试。激光器的电流驱动阈值约为 40 mA, 之后激光器输出功率会随着驱动电流线性增加而增加。

为使 980 nm 激光器输出标准的强度调制信号, 在抽运驱动源中加入不同幅度调制信号时, 需同时调整驱动偏置电压, 以保证抽运强度调制信号调制深度 $M \approx 1$ 。980 nm 抽运激光器输出幅度、频率均可调节, 且稳定的标准正弦信号。随着在 980 nm 激光器抽运源上调制信号幅度的增大 (调制深度 $M \approx 1$), 激光器输出的平均光功率也呈线性增大, 测试结果如图 5 所示。

实验时, 在 980 nm 抽运激光器的驱动源上施加甚低频的三角波调制, 使 980 nm 抽运激光器输出的光功率周期性地缓慢增大或减小。图 6 为 980 nm 抽运光驱动调控频率 $f = 0.01$ Hz, 调制光功率 $P_{980 \text{ nm}} = 300 \mu\text{W} \sim 27 \text{ mW}$ 情况下, OMC 耦合比的变化情况 (图中 980 nm 抽运光光强数据为光电探测器检测的电信号结果)。结果显示, OMC 耦合

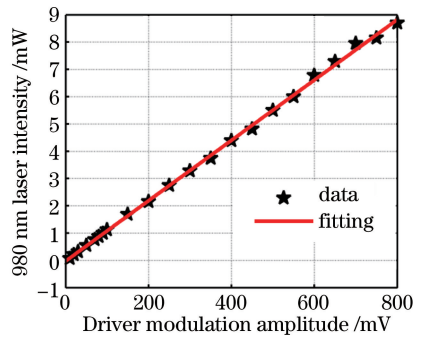


图 5 不同驱动源调制幅度下 980 nm 激光器输出的光功率测试结果

Fig. 5 Output power of 980 nm laser with different modulation amplitudes

比波动周期与 980 nm 抽运光调控周期严格一致, 且在 980 nm 抽运光一个调制周期内的 OMC 耦合比会波动若干个周期。在较小 980 nm 抽运调制光作用下, OMC 耦合比随光功率增大而呈线性变化, 而在较大 980 nm 抽运调制光作用下, OMC 耦合比随光功率增大呈近似正弦波动趋势, 且在毫瓦量级抽运调制光作用下, OMC 耦合比即可实现整周期变化, 这与前述理论分析一致。

为寻找 OMC 调制器的最小和最佳调控功率, 在降低抽运调制光功率的情况下, 对 OMC 调制响应情况进行测试。图 7 为 980 nm 抽运光驱动调控

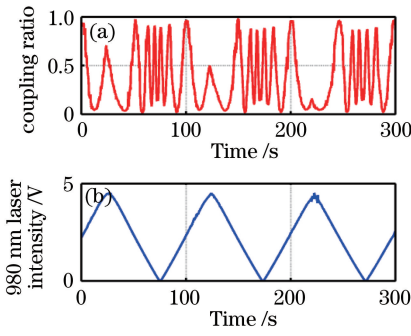


图 6 980 nm 抽运调制光作用下 OMC 耦合比变化情况。
(a) OMC 耦合比测试数据;(b) 980 nm 抽运光光强测试数据

Fig. 6 Change of the coupling ratio of OMC while the intensity modulated 980 nm pump light is injected into the OMC. (a) Test data of OMC coupling ratio; (b) test data of 980 nm pump light intensity

频率 $f=0.001$ Hz, 调制光功率为 $P_{980\text{ nm}}=10\ \mu\text{W}\sim 14\ \text{mW}$ 情况下, OMC 的 port3 端口测试结果(此时, 监测 980 nm 抽运光的探测器功率放大 10 倍)。由测试结果可知, 当 980 nm 抽运光约达到 $30\ \mu\text{W}$ 时, OMC 样品输出光强即可产生近似线性的调控效应。

以上的准静态光调制实验初步验证了 OMC 的光热调控功能, 即在不同功率的 980 nm 抽运光作用下, OMC 的耦合比会产生相应的变化。在百微瓦量级的调控光功率作用下, OMC 的耦合输出特性对光致热效应的响应敏感, 即可产生光热全光强度调控响应, 并可实现整周期、大调制深度的强度调制。基于 OMC 展现的以上光热效应调控特性, 经过合理的光学系统设计, OMC 预期可以实现工作

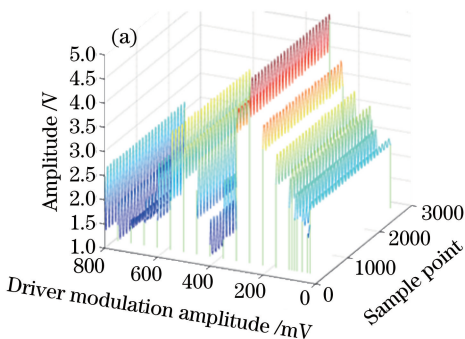


图 8 逐渐增大 980 nm 抽运光的调制幅度时, OMC 输出的调制信号监测结果。

(a) 时域监测信号; (b) 调制过程 OMC 输出“直流”变化情况

Fig. 8 OMC output monitoring results with the modulation amplitude of the 980 nm pump light gradually increasing.

(a) Time domain monitoring signal; (b) "direct current" variation of the OMC output in the modulation process

如图 8(a) 所示, 抽运光调制信号幅度在 250 mV 以下时, 随着调制信号幅度的增大, 调制响

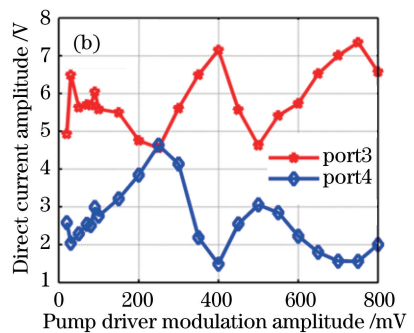


图 7 980 nm 抽运调制光作用下, OMC 的 port3 端口输出的 1550 nm 工作光测结果局部放大图。(a) OMC 的 port3 端口测试数据; (b) 980 nm 抽运光光强测试数据

Fig. 7 Local amplification of 1550 nm optical measurement results from the output of OMC port3 under the action of the 980 nm pump light. (a) Port3 test data of OMC;

(b) test data of 980 nm pump light intensity

点控制、光衰减、光开关及强度调制等功能。另外, OMC 在几十微瓦量级的调制光功率作用下会产生光热调控现象, 这也充分说明在微纳光子集成光路中, 对于基于耦合结构的各类微纳光子功能器件, 波导间的光耦合和器件的热稳定性控制是需要考虑和解决的技术问题^[17]。

调制 OMC 强度时, 还对幅度响应特性及工作点控制进行了实验测试研究。在固定抽运驱动调制信号频率为 500 Hz 情况下, 逐渐增大 980 nm 抽运光调制信号幅度(抽运驱动调制信号幅度为 30~800 mV), 并保持调制深度为 $M\approx 1$ (抽运光强度调制信号均被标定好再接入系统), OMC 调制响应测试结果如图 8 所示。

应信号幅度(即工作光信号交流幅度)基本呈线性增大趋势, 这与前述理论分析一致。如图 8(b) 所示,

在驱动调制信号幅度增大时, OMC 输出工作光信号的直流量(即信号平均光功率)呈周期共轭波动(即 OMC 耦合比发生变化)。这是由于在调制光信号幅度增大过程中, 其输出光信号的平均光功率也在增大, 进而改变了 OMC 工作光耦合比“直流”分量, 另外, 环境温度影响也会使调制器耦合比发生慢漂现象。因此, 在 OMC 调制器的实际调制应用中, 需进行合理的封装处理和热管控。

在固定 980 nm 抽运光调制幅度情况下, 改变抽运光直流偏置时, OMC 耦合比会同步发生“直流”变化, 并出现工作光调制信号过扫描现象(即调制深度降低)。这表明 OMC 输出的工作光平均光功率对应抽运光的“直流量”调控, 而工作光的波动量对应抽运光的“交流量”调制。因此, 为获得最佳的调制深度, 在 OMC 强度调制器应用中需合理选择抽运光调制信号直流偏置和调制幅度, 并对其直流耦合比进行监测和反馈控制, 以使 OMC 强度调制器件工作在最佳工作点。实际上, 将 OMC“直流”输出耦合比固定在 1:1 附近, 通过抽运调整调制信号“交流”幅度, 可以使 OMC 强度调制器达到 100% 的调制深度。

4 结 论

以往研究多关注 OMC 的传感应用, 本文重点对 OMC 光吸收致热引起的全光强度调控特性进行理论分析和实验研究。理论分析结果显示, OMC 全光强度调控器件的调制响应效率与 OMC 腰区长度、抽运光在 OMC 腰区的损耗系数及抽运调制光强成正比, 与 OMC 腰区耦合光纤的半径成反比; OMC 的光调制频响特性与微纳光纤相位调制器的频响特性相近, 调制响应效率与调制频率成反比。理论分析还得出 OMC 作为光调控器件时结构参数选取的一般规律, 即选取腰区较长较细的 OMC 样品才能获得较高调控效率的光控制器, 但腰区不可过细。实验研究显示, OMC 全光强度调控器件在百微瓦量级的调控光功率作用下, 可实现整周期、大调制深度光致热全光强度调控功能, 且调制响应信号幅度和调制信号幅度基本呈线性响应关系, 并且在几十微瓦量级的调制光功率作用下, OMC 会产生光热调控现象。本文还对 OMC 进行了全光强度调制功能测试实验, 结果显示, 将 OMC“直流”输出耦合比固定在 1:1 附近, 通过抽运调整调制信号“交流”幅度, 可以使 OMC 强度调制器达到 100% 的调制深度。研究结果一方面为开发基于 OMC 光致热

效应的光衰减、光开关及强度调制等全光功能器件提供了研究基础, 另一方面为纳光子集成光路热稳定性管控及片基量子通信系统安全性研究提供可借鉴的研究方案。

参 考 文 献

- [1] Jung Y, Brambilla G, Richardson D J. Optical microfiber coupler for broadband single-mode operation[J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5273-5278.
- [2] Ahmad H, Jasim A A. Fabrication and characterization of 2×2 microfiber coupler for generating two output stable multiwavelength fiber lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(19): 4227-4233.
- [3] Hernandez-Arriaga M V, Bello-Jimenez M A, Rodriguez-Cobos A, *et al.* High sensitivity refractive index sensor based on highly overcoupled tapered fiber-optic couplers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(2): 333-339.
- [4] Sun L, Semenova Y, Wu Q, *et al.* High sensitivity ammonia gas sensor based on a silica-gel-coated microfiber coupler [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(14): 2864-2870.
- [5] Pu S L, Mao L M, Yao T J, *et al.* Microfiber coupling structures for magnetic field sensing with enhanced sensitivity [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(18): 5857-5861.
- [6] Yan S C, Liu Z Y, Li C, *et al.* "Hot-wire" microfluidic flowmeter based on a microfiber coupler [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5680-5683.
- [7] Wei F F, Mallik A K, Liu D J, *et al.* Magnetic field sensor based on a combination of a microfiber coupler covered with magnetic fluid and a Sagnac loop [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 4725.
- [8] Chen Y, Semenova Y, Farrell G, *et al.* A compact Sagnac loop based on a microfiber coupler for twist sensing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(24): 2579-2582.
- [9] Pu S L, Luo L F, Tang J L, *et al.* Ultrasensitive refractive-index sensors based on tapered fiber coupler with Sagnac loop [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(10): 1073-1076.
- [10] Wang S S, Yang H J, Liao Y P, *et al.* High-sensitivity salinity and temperature sensing in seawater based on a microfiber directional coupler [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(4): 6804209.
- [11] Sun L, Semenova Y, Wu Q, *et al.* Investigation of humidity and temperature response of a silica gel coated microfiber coupler [J]. *IEEE Photonics*

- Journal, 2016, 8(6): 6805407.
- [12] Ding M, Wang P F, Brambilla G. A microfiber coupler tip thermometer[J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 5402-5408.
- [13] Wang P F, Madugani R, Zhao H Y, *et al.* Packaged optical add-drop filter based on an optical microfiber coupler and a microsphere [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(20): 2277-2280.
- [14] Chen J H, Deng G Q, Yan S C, *et al.* Microfiber-coupler-assisted control of wavelength tuning for Q-switched fiber laser with few-layer molybdenum disulfide nanoplates [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3576-3579.
- [15] Tong L M, Lou J, Mazur E. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides[J]. *Optics Express*, 2004, 12(6): 1025-1035.
- [16] Song Z Q, Yu Y, Zhang X L, *et al.* Optical microfiber phase modulator directly driven with low-power light [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(9): 090606.
- [17] Ma C X, Sacher W D, Tang Z Y, *et al.* Silicon photonic transmitter for polarization-encoded quantum key distribution[J]. *Optica*, 2016, 3(11): 1274-1278.
- [18] Sibson P, Erven C, Godfrey M, *et al.* Chip-based quantum key distribution [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 13984.
- [19] Sibson P, Kennard J E, Stanisic S, *et al.* Integrated silicon photonics for high-speed quantum key distribution[J]. *Optica*, 2017, 4(2): 172-177.
- [20] Birks T A, Li Y W. The shape of fiber tapers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1992, 10(4): 432-438.
- [21] Payne F P, Hussey C D, Yataki M S. Polarisation analysis of strongly fused and weakly fused tapered couplers[J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(13): 561-563.
- [22] Ankiewicz A, Snyder A W, Zheng X H. Coupling between parallel optical fiber cores-critical examination[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, 4(9): 1317-1323.
- [23] Yu Y, Zhang X L, Xie J H, *et al.* Investigation on fabrication and characteristics of four ports optical microfiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0105002.
于洋, 张学亮, 谢杰辉, 等. 四端口微纳光纤制作及特性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0105002.
- [24] Davis M K, Digonnet M J F, Pantell R H. Thermal effects in doped fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(6): 1013-1023.
- [25] Digonnet M J F, Sadowski R W, Shaw H J, *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.
- [26] Yu Y, Qiang B, Zhang X L, *et al.* Investigation on an all-optical intensity modulator based on an optical microfiber coupler[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(4): 040605.
- [27] Yu Y, Zhang X L, Song Z Q, *et al.* Precise control of the optical microfiber tapering process based on monitoring of intermodal interference [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(35): 8222-8228.
- [28] Ravets S, Hoffman J E, Kordell P R, *et al.* Intermodal energy transfer in a tapered optical fiber: optimizing transmission [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2013, 30(11): 2361-2371.