

微纳光纤环与侧边抛磨光纤耦合的上下载滤波器

金绍深¹ 陈哲^{1,2} 卫青松¹ 何小莉¹ 余健辉^{1,2*} 臧志刚^{1,2} 卢惠辉^{1,2} 罗云瀚^{1,2}
唐洁媛^{1,2} 张军^{1,2}

(¹暨南大学光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510632; ²暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632)

摘要 提出并成功演示了一种微纳光纤环与侧边抛磨光纤直接耦合的上下载滤波器。实验结果表明这种滤波器不仅能实现两种光纤系统的互连耦合, 并且能实现两系统间的上下载滤波功能。下载输出端消光比最大可达 7.5 dB, 上载输出端消光比最大可达 4.8 dB。此外, 通过进一步实验及数值仿真研究了不同环直径对两种光纤系统耦合的影响。实验和数值模拟研究结果都表明在微纳光纤直径为 6 μm 的情况下, 当微纳光纤环直径为 580 μm 时, 微纳光纤环与侧边抛磨光纤的耦合达到最大, 同时此耦合对环 Q 值与精细度的影响也达到最小。这种上下载滤波器不需额外设计微纳光纤与标准光纤耦合的光学器件, 为微纳光纤系统与现有的光纤系统的互连提供了一种更简洁有效的解决方案。

关键词 光纤光学; 微纳光纤; 微纳光纤环; 侧边抛磨光纤; 光学上下载滤波器; 光学耦合

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0805008

Add-Drop Filter by Coupling between Micro-Nano Fiber Ring and Side Polished Fiber

Jin Shaoshen¹ Chen Zhe^{1,2} Wei Qingsong¹ He Xiaoli¹ Yu Jianhui^{1,2} Zang Zhigang^{1,2}
Lu Huihui^{1,2} Luo Yunhan^{1,2} Tang Jieyuan^{1,2} Zhang Jun^{1,2}

(¹Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China)
²Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract A novel add-drop filter based on direct coupling between micro-/nano-fiber (MNF) ring and side-polished fiber (SPF) is proposed and demonstrated. Experiment results show that this kind of filter not only can realize interconnected coupling between the MNF optical system with conventional optical system, but also can realize a function as add-drop filter between two optical systems. The maximum extinction ratio of drop port can achieve to be 7.5 dB as a drop filter, while maximum extinction of add port can be 4.8 dB as a add filter. Furthermore, the influence of different ring diameters on the coupling between the two optical systems is numerically and experimentally investigated. The conclusion of the investigation is that when the diameter of MNF is fixed at 6 μm and the diameter of MNF ring reaches to be 580 μm , coupling efficiency of the MNF ring and SPF is maximum and the influence of the coupling on the Q value and fineness of the ring reaches minimum simultaneously. This kind of add-drop filter, without assistant of extra optical device to couple light into MNF from standard optical fiber, provides a more elegant solution for interconnection of the MNF optical system and current standard optical fiber system.

Key words fiber optics; micro-/nano-fiber; micro-/nano-fiber ring; side polished fiber; optical add-drop filter; optical coupling

OCIS codes 060.4510; 230.2285

收稿日期: 2014-02-27; 收到修改稿日期: 2014-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(61177075, 61008057, 11004086)、中央高校基本科研业务费专项资金(21614313, 21613325, 21613405)、广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目(2012A032300016, 2012A080302004, 2011A081302002, 2012A080301002)、广东省学科建设专项资金(2013CXZDA005)、广东高校优秀青年创新人才培养计划(YM10024)、暨南大学优秀本科推免生科研创新培育计划、暨南大学本科生创新科技工程项目

作者简介: 金绍深(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: jss_fqh@163.com

导师简介: 陈哲(1957—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事新型光纤无源器件、光纤通信与光纤传感技术、光电检测技术、光学设计、光学及光电系统计算机仿真等方面的研究。E-mail: thzhechen@jnu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: kensomyu@gmail.com

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

1 引言

微纳光纤(MNF)已经成为构建新型微纳光学系统的基础^[1],各种基本的微纳光纤器件^[2-6]已被报道,如 Mach-Zender 干涉器^[2]、微环谐振腔^[3]、定向耦合器^[4]、起偏器^[5]、微环激光器^[6]等,这使基于微纳光纤的光纤系统成为可能。但在实际应用中,微纳光纤系统需与常规光纤(通信或传感)系统相连,因此微纳光纤系统与常规光纤系统间的有效耦合技术成为微纳光纤系统应用的关键技术之一。目前最常用的技术为锥形光纤^[2],即标准光纤经过熔融拉锥后所形成的直径逐渐变细的光纤。然而这种技术需将锥形光纤串联于这两种系统中实现两种系统的连接,这种将微纳光纤与常规光纤系统实现耦合的方法有可能影响两系统各自的性能。并且,为确保较高的耦合效率,这种实现耦合的锥形光纤长度需在几十毫米至几百毫米范围内,以满足绝热近似^[7],这限制了耦合器件的进一步微型化。另外,在需要将两光纤系统特定光信道进行选择性的耦合的应用场合,需要在它们耦合系统中增加一个光滤波器,这也增加了器件的体积。

由于侧边抛磨光纤(SPF)^[8]是将一段常规光纤的包层抛磨去掉一部分而成,故该光纤中传输模场的消逝场将部分地渗透在光纤外,以致光纤内的传输模场能与外部的物质相互作用。得益于这个特点,许多新型器件都被报道,如光控表面光纤光栅^[9]、光控偏振旋转器^[10]、光控可调的啁啾^[11]、各种灵敏光纤传感器^[12-15]等。这种特点也有望提供一种新的在线耦合方案。该方案无需额外耦合器件,便可实现微纳光纤光学系统与常规光纤系统的耦合,从而使系统更简洁紧凑。

另外,由于微纳光纤环型谐振腔具有结构紧凑、容易制作及 Q 值高等优点,它成为构建各种光学器件的基本部件。目前,微纳光纤环型谐振腔已被用于激光器^[6]、各种传感器^[16]及可调谐滤波器^[17]。虽然基于结型环的全微纳光纤上下载滤波器已被报道,并能实现良好的滤波特性^[18],但此上下载滤波器处于悬空的状态,这增加了器件的不稳定性,需要另外附加衬底作为支撑对其加以固定^[16]。然而衬底的引入不仅将降低微纳光纤环(MNFR)的性能,从而降低滤波器的性能,而且增加了整个新器件的体积。本文将提出一种基于侧边抛磨光纤与微纳光纤环耦合的新方案,实现了微纳光纤系统及常规光纤系统的直接连接,同时也实现了两种光学系统间

的上下载滤波功能。在这种耦合方案中,侧边抛磨光纤既为上下载滤波器的一部分,也为微纳光纤环的支撑衬底,无需另外附加的支撑衬底。这为微纳光纤器件与常规光纤系统的集成提供了新的技术方案,不仅实现了两个不同系统高效的信道选通耦合,而且没有耦合光纤之外的体积增加,因此将大大加快微纳光纤器件与系统的实用化进程。

2 器件原理与实验装置

作为微纳光纤传输系统与常规光纤传输系统互连的新型上下载滤波器结构如图 1(a)所示,上方为微纳光纤环部分,其两个尾纤端口分别标记为输入端(input port)、直通端(through port),下方为侧边抛磨光纤部分,其两个尾纤端口分别标记为下载端(drop port)、上载端(add port)。由基于环腔的上下载滤波器的原理^[7]可知,当信号光从滤波器的输入端输入时,只有满足环腔谐振条件^[17]的信号光才能通过微纳光纤环腔被耦合至侧边抛磨光纤,进而被下载至常规光纤光学系统,实现下载及滤波功能;当信号光从滤波器的上载端输入时,谐振的光波被耦合至微纳光纤光学系统,实现下载功能。这里的环腔谐振条件由以下方程^[17]所决定:

$$(m + 1/4)\lambda = \pi n_{\text{eff}} D, \quad (1)$$

式中的 m 为正整数, n_{eff} 为微纳光纤的有效折射率, λ 和 D 分别为谐振波长和微纳光纤环半径。

微纳光纤环与侧边抛磨光纤耦合实验测试装置如图 1(b)所示。实验所用可调谐激光光源(TLS)型号为 ANDO-AQ4321DTSLS,波长范围为 1520~1620 nm,光谱分析仪(OSA)型号为 YOKOGAWA-QA6317COSA,最小分辨率为 0.01 nm。实验先后测试了器件下载功能和上载功能。当实验测试下载功能时,可调谐激光光源与器件的输入端连接,光谱分析仪分别测量在直通端、下载端和上载端输出的谱线;而当实验测试上载功能时,可调谐激光光源与器件的上载端连接,光谱分析仪分别测量在输入端、直通端和下载端的光谱。实验中,微纳光纤环的输入端和直通端光纤被固定于精密三维平移台(图中未画出)上。通过此三维移动台调整微纳光纤环直径至期望值,以研究不同环直径对器件的影响。而侧边抛磨光纤以抛磨面朝上的姿态被固定在下方的四维平移台(X、Y、Z、 θ , 四维度)上。通过此平移台调整侧边抛磨光纤的姿态,以使微纳光纤环与侧边抛磨光纤达到最佳的耦合状态。

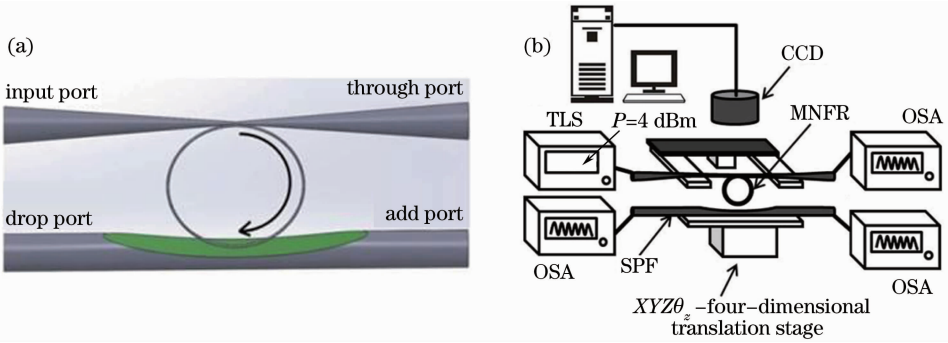


图 1 (a) 微纳光纤环与侧边抛磨光纤耦合的上下载滤波器结构示意图；(b) 上下载滤波器的下载功能实验测试装置
 Fig. 1 (a) Schematic diagram of add-drop filter based on the coupling between micro-/nano-fiber ring and side polished fiber; (b) experiment setup for examination of drop function of the add-drop filter

3 器件制作

微纳光纤环的基本结构主要分为 knot 型、loop 型和 coil 型三种方式^[3,19-20]，其制作方法各不相同。其中 knot 型微纳光纤环的结构更牢固，性能更稳定，环直径易于调节。因此本器件采用 knot 型微纳光纤环与侧边抛磨光纤进行耦合。目前常见的制作微纳光纤环的方法是将微纳光纤一端拉断以后，再利用光纤尖锥吸附微纳光纤末端进行打结成环，最后再与另外一根微纳光纤耦合^[4]，其微纳光纤环输出端靠范德瓦耳斯力与另一根微纳光纤耦合来实现光的传输。这种方法难于操作和使用，因此提出了一种新的制环方法。1) 将普通的单模光纤在酒精灯火焰上水平拉制出直径约为 10 μm、长度约为 3 cm 的微纳光纤；2) 利用弯曲的光纤和锥形过渡区的恢复力对微纳光纤进行进一步拉伸得到直径更小的微纳光纤；3) 将微纳光纤尾纤打结成环；4) 成环后的光纤被转移放置于三维调节架上固定，缓慢调节微调节架以形成合适大小的环。由于制环过程无需破坏微纳光纤环的输出端，因此，相对于文献^[3]，此方法不仅减少了制环过程中造成的光损耗，而且使环结

构更稳定。利用这种方法制备的微纳光纤环输出端光谱图如图 2 所示。由图 2 可见，在共振波长 1572.4 nm 的位置，共振峰的半峰全宽为 0.04 nm，光谱自由程为 0.64 nm。由这组数据计算可知此环的 Q 值可达 39310，精细度可达 16。

为了方便在实验中寻找最优的侧边抛磨光纤剩余包层厚度(即抛磨面与纤芯包层界面的距离)，利用轮式抛磨法^[15]制备成功了剩余厚度沿着光纤纵向逐渐增加的抛磨光纤，其平均抛磨剩余厚度约为 6.1 μm。侧边抛磨光纤的剩余厚度在 20 mm 的抛磨区内近似从 2.4~9.8 μm 线性缓慢增加，其变化曲线如图 3(a)所示，显微照片如图 3(b)所示，由于抛磨区剩余包层厚度沿光纤的变化率很小，约 0.7 μm/mm，在实际的耦合长度约为 0.3 mm 范围内，剩余厚度变化仅为 0.2 μm，因此在耦合长度范围内，此抛磨面几乎是一个平面。

在耦合操作中，在微纳光纤环输入端输入可见红光，以便于观察与调整。同时，在微纳光纤环结附近放置一根金属微丝辅助固定微纳光纤环，避免气流等外界因素引起环的飘动。在显微镜下，通过四维平移台，精细地移动和调节侧边抛磨光纤的耦合位置及姿态，使侧边抛磨光纤几乎与微纳光纤环平面平行，最后使侧边抛磨光纤的纤芯部分与微纳光纤环的一部分对准并接触。移动和调节的同时，在输出端观测耦合共振效果，当出现实验所需要的耦合效应时，利用范德瓦耳斯力将微纳光纤环固定在侧边抛磨光纤的抛磨平面上。微纳光纤环被侧边抛磨光纤固定后，缓慢移走辅助固定用的金属微丝，完成微纳纤环与侧边抛磨光纤的耦合制作。微纳光纤环与侧边抛磨光纤耦合后的显微照片如图 3(c)所示，它们的耦合区放大的显微照片如图 3(d)所示。

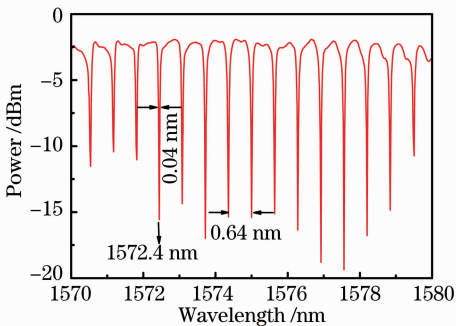


图 2 制备成功的微纳光纤环输出端谱线
 Fig. 2 Measured output spectrum of prepared micro-/nano-fiber ring

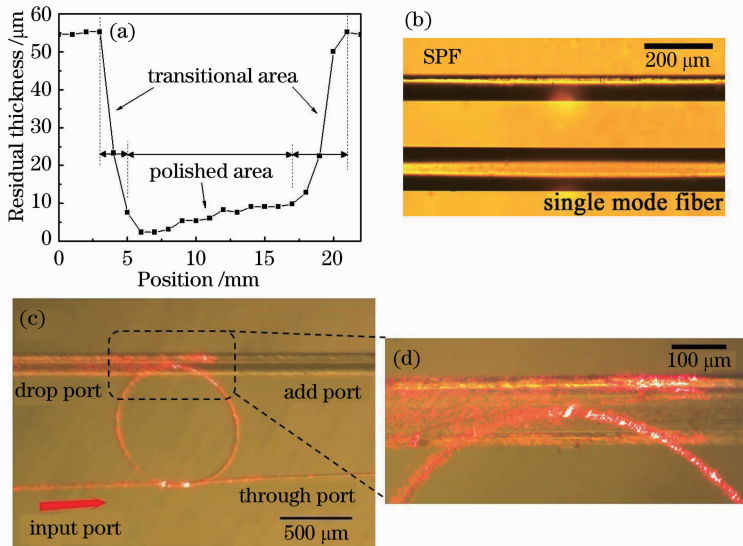


图 3 (a)侧边抛磨光纤剩余厚度沿光纤纵向的变化曲线;(b)侧边抛磨光纤与单模光纤的显微照片;(c)微纳光纤环与侧边抛磨光纤耦合的俯视显微照片;(d)微纳光纤环与侧边抛磨光纤的耦合区显微照片
 Fig. 3 (a) Variation of the residual thickness of side polished fiber along the fiber; (b) micrographs of side polished fiber and single mode fiber; (c) topview micrograph of micro-/nano-fiber ring coupling with the side polished fiber; (d) enlarged photograph of the coupling area between micro-/nano-fiber ring and side polished fiber

4 结果与分析

4.1 上下载滤波功能的测试

为了验证器件的下载滤波功能,将输出光功率为 4 dBm 的可调谐激光输入滤波器的输入端[如图 3(c)所示],光谱分析仪分别测得器件其他三端口(直通端、下载端、上载端)的光谱,测得光谱如图 4(a)所示。被测试的器件如图 3(c)和(d)所示,其中微纳光纤直径约为 6 μm ,环直径约为 800 μm ,整个微纳光纤环及微纳光纤长约为 3500 μm 。从图 4(a)的光谱可见,光从微纳光纤输入,谐振波长的光被耦合并存储于微纳光纤环,而其他未发生谐振的光则直接通过,不能被耦合于微纳光纤环,因此在直通端形成周期凹陷的光谱曲线,实现了微纳光纤系统的滤波功能,滤波半峰全宽为 0.28 nm,消光比(ER)为 6.2 dB。从图 4(a)直通端的光谱可知,在无共振波长位置的平均透过功率为 -5 dBm,由此可知器件总体插入损耗约为 9 dB。如果剔除光纤适配器耦合引起的 4 dB 损耗,器件自身的插入损耗估计约为 5 dB。考虑到整个器件的微纳光纤长度约为 3500 μm ,因此单位长度上的损耗约为 1.43 dB/mm,这与文献[21]报道的微纳光纤传输损耗几乎相同。另一方面,存储于微纳光纤环中的光能被耦合至侧边抛磨光纤,从下载端输出端输出,因此,从图 4 中可以看到,下载端光谱中谐振峰与直

通端光谱中的谐振凹谷呈现很好的对应关系,这也表明实现了器件的下载功能。从下载端光谱得到的消光比为 4.7 dB,半峰全宽为 0.38 nm。从图 4(a)可见,在上载端也能测量得共振峰,这是由发生在环的结区及微纳光纤环与侧边抛磨光纤的耦合处的背向散射所导致的。

为了验证器件的上载功能,可调谐光源从器件的上载端输入,光谱仪分别测量下载端、直通端和输入端的光谱。测量得到的光谱如图 4(b)所示。在微纳光纤直通端的光谱存在凸起的共振峰与测试下载功能时下载端得到的共振峰一致。由此可知微纳光纤环发生了谐振,器件可在共振波长附近实现上载功能,实现传统光纤系统向微纳光纤系统的光信号滤波耦合。由光谱可知,器件上载功能的消光比为 4.8 dB,半峰全宽为 0.38 nm,与下载功能相近。值得注意的是,侧边抛磨光纤的下载端在图示标度下几乎看不到滤波效应。这是由于侧边抛磨光纤的纤芯直径比耦合微纳光纤的直径大,它们间引起了较大的传播常数差异,从而降低了侧边抛磨光纤耦合至微纳光纤的耦合效率,导致从侧边抛磨光纤耦合至微纳光纤环的光功率很微弱,最终导致经过微纳光纤环传播一周耦合回到侧边抛磨光纤的光功率远远小于侧边抛磨光纤输入的光功率。从图 4(b)可知此二者功率相差 19 dB。因此,即使微纳光纤环形成谐振,但这部分

耦合回到抛磨光纤的光只能与抛磨光纤中的很小一部分光形成干涉,也只能在下载端光谱中形成很小的起伏,而这种起伏超过了光谱分析仪的分辨能力,所

以在下载端难以观察到与图 4(a)中直通端光谱相同的滤波效应。图 4(b)中输入端测得的输出光谱也是由微纳光纤环中的背向散射引起。

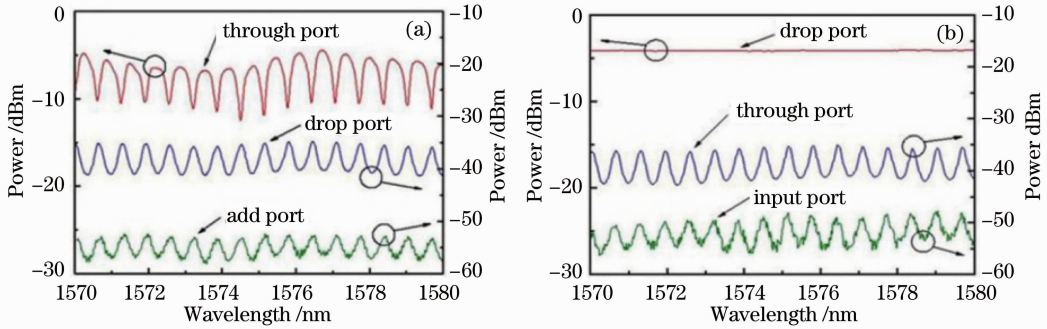


图 4 (a)在输入端输入可调谐激光光源时,直通端、下载端及上载端的输出光谱;(b)在上载端输入可调谐激光光源时,下载端、直通端和输入端的输出光谱

Fig. 4 (a) Output spectra of the through port, drop port and add port when tunable laser is launched into the input port; (b) output spectra of the through port, drop port and input port when tunable laser is launched into the add port

由于微纳光纤直径很小,因此能产生很强范德瓦耳斯力。这种力能使微纳光纤环的几何结构在空气和微小振动中保持不变,同时使微纳光纤环与侧边抛磨光纤的耦合不易受气流和微小振动的影响。实验发现当成功制备的上下载滤波器件放置 10 h 后,仍可测得上下载滤波的光谱,且光谱与图 4 的光谱相似。不同的是器件的插入损耗增大, Q 值降低,消光比降低,半峰全宽增大。这是因为空气中的水

蒸气会吸附在微纳光纤表面,形成微小水珠,造成微纳光纤的散射损耗。实验发现加热微纳光纤环至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,并维持 15 min 左右,器件的上下载滤波光谱能基本恢复至初始的测得光谱。这表明这种器件需要干燥的封装以长时间保持其性能的稳定性的。

4.2 环直径对器件上下载滤波性能的影响

微纳光纤环为上下载滤波器件的关键器件,决定了器件的性能,因此在给定微纳光纤直径为 $6\text{ }\mu\text{m}$

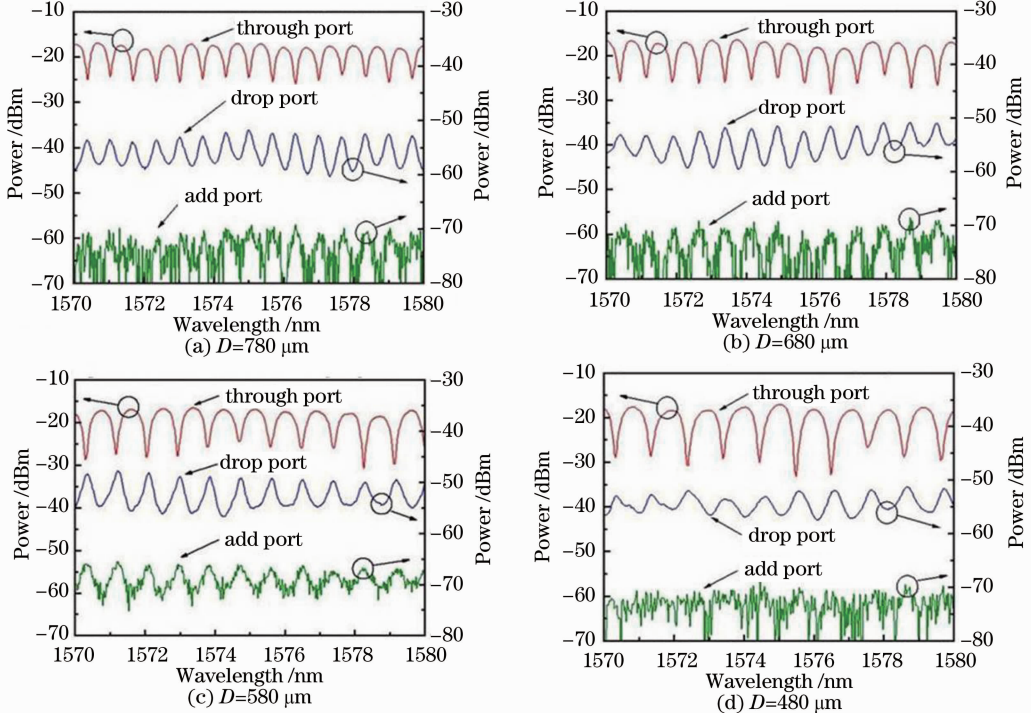


图 5 环直径分别为(a) $780\text{ }\mu\text{m}$, (b) $680\text{ }\mu\text{m}$, (c) $580\text{ }\mu\text{m}$, (d) $480\text{ }\mu\text{m}$ 的上下载滤波器输出光谱

Fig. 5 Measured output spectra of the add-drop filter with different ring diameters of (a) $780\text{ }\mu\text{m}$, (b) $680\text{ }\mu\text{m}$, (c) $580\text{ }\mu\text{m}$ and (d) $480\text{ }\mu\text{m}$, respectively

情况下,实验研究了不同微纳光纤环直径对器件上下载滤波性能的影响。实验中通过调节平台缓慢拉伸环两边的微纳光纤,以调整环直径。

采用与前面相同的测量器件下载功能的实验方法,测得四种环直径器件的下载端、直通端和上载端的光谱,并据此分析器件的耦合效率和响应曲线的消光比。定义微纳光纤与侧边抛磨光纤制作的耦合器件的耦合效率为耦合输出端的光功率 P_{out}^{SPF} 与输入端光纤的光功率 P_{in}^{MNF} 的比值:

$$\eta = 10\lg(P_{out}^{SPF}/P_{in}^{MNF}). \quad (2)$$

图 5(a)~(d)分别给出了环直径为 780、680、580、480 μm 时的下载性能测试谱线。在传输光波长为 1572 nm 处,这四种环直径的微纳光纤与侧边抛磨光纤耦合的耦合效率以及相应的下载输出端的消光比如图 6 所示。

由图 6 可见,当微纳光纤环直径为 580 μm 时,侧边抛磨光纤与微纳光纤环耦合的耦合效率最高,滤波器下载输出端(即下载端)的消光比最大。

另外,四种环直径构成器件的上载功能也分别被测试。测试过程中,可调谐激光器从器件上载端输入,光谱仪分别测量下载端、直通端和输入端输出的光谱,测得的光谱如图 7 所示。由图 7 可以看出,上载输出端(直通端)和输入端出现了谐振峰。而下载端没有出现明显的谐振峰,与下载端光谱不同,从直通端和输入端都观察到上载光谱的凸峰,这表明从侧

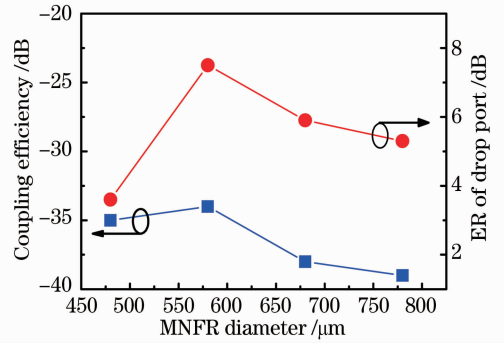
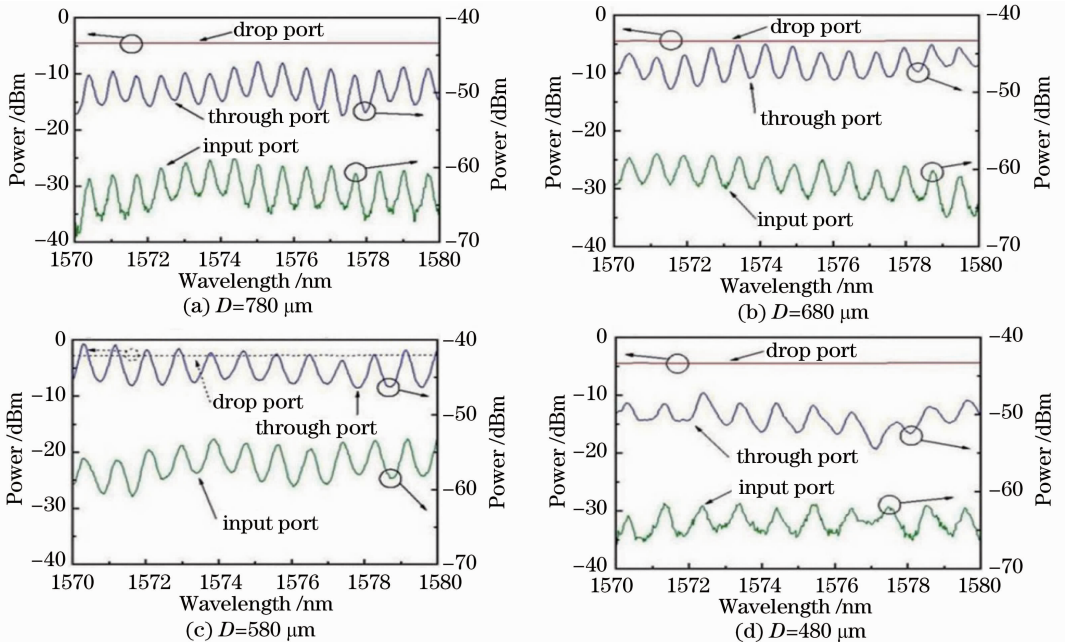


图 6 不同微纳光纤环直径下的耦合效率及下载端消光比

Fig. 6 Measured coupling efficiencies and extinction ratios of drop port with different diameters of MNFR
边抛磨光下输入的光被耦合至微纳光纤环,并在环腔内形成谐振。这时器件以直通端作为上载滤波功能的输出端实现上载功能。从图 5 和图 7 可知,滤波器的上载输出光谱中谐振峰的数量与对应参数下的下载输出光谱中谐振峰的数量相同,表明此滤波器的结构具有良好的稳定性。由于环直径的大小直接决定上下载输出光谱的自由光谱范围,因此,随着环直径的减小,上下载输出光谱中凸峰的数量在减小。

在传输光波长为 1572 nm 处,这四种环直径的微纳光纤与侧边抛磨光纤耦合的耦合效率以及相应的下载输出端的消光比如图 8 所示。从图 8 可知,当微纳光纤环的直径分别为 780、680、580、480 μm 时,直通端的消光比分别为 4.1 dB、4.1 dB、4.8 dB、

图 7 环直径分别为(a) 780 μm , (b) 680 μm , (c) 580 μm , (d) 480 μm 的下载端和直通端测得的光谱
Fig. 7 Measured spectra from drop port and through port with different ring diameters of (a) 780 μm , (b) 680 μm , (c) 580 μm and (d) 480 μm

3.7 dB。当微纳光纤环的直径为 $580 \mu\text{m}$ 时,上载输出端(直通端)消光比最大。

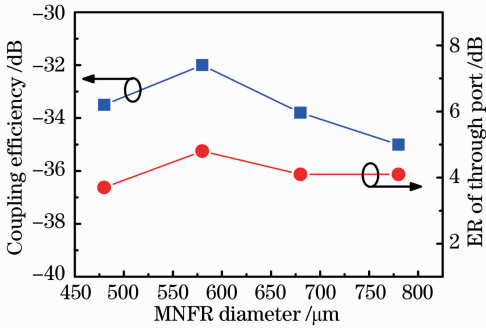


图8 不同微纳光纤环直径下,实验测得的耦合效率及直通端消光比

Fig. 8 Measured coupling efficiencies and measured extinction ratios of through port with the different diameters of MNFR

4.3 微纳光纤环与侧边抛磨光纤耦合对环性能的影响

由于微纳光纤环性能决定了器件上下载滤波的

性能,因此研究了微纳光纤环与侧边抛磨光纤耦合对微纳光纤环性能 Q 值和精细度的影响。 Q 值决定了上下载滤波的带宽,而精细度决定了器件能处理的信号通道密度。对于前面所提到的四种微纳光纤环直径 780 、 680 、 580 、 $480 \mu\text{m}$,实验分别测得的耦合前后的微纳光纤环 Q 值和精细度,分别由图 9(a) 和(b)所示。耦合过程对微纳光纤环的 Q 值和精细度的影响可由 Q 值和精细度的相对变化率来描述。这里的相对变化率定义为耦合后 Q 值和精细度的变化与耦合前 Q 值和精细度的比值。耦合引起的 Q 值和精细度相对变化率分别由图 9(c) 和(d) 给出。

由图 9 可知,当微纳光纤环直径为 $580 \mu\text{m}$ 时,微纳光纤环的 Q 值和精细度的相对变化率最小,都为 16% ,这意味着此时微纳光纤环与侧边抛磨光纤耦合效应对滤波器消光比的影响最小。因此,在微纳光纤直径为 $6 \mu\text{m}$ 时,制作此上下载滤波器的最佳的微纳光纤环直径约为 $580 \mu\text{m}$ 。

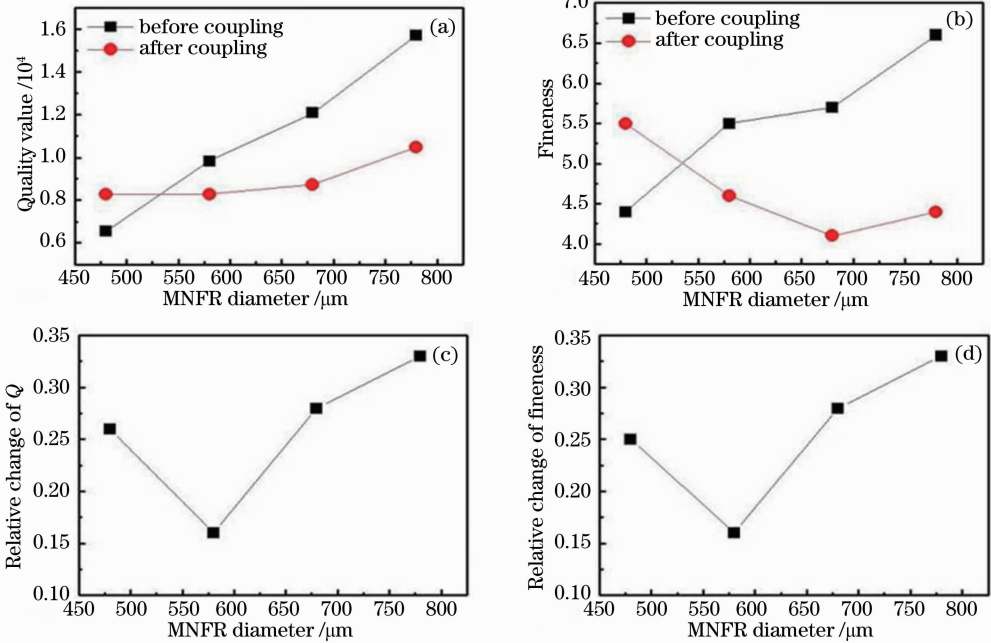


图9 (a) 耦合前后的环 Q 值;(b)耦合前后的环精细度;(c) 耦合引起的 Q 值相对变化率;(d) 耦合引起的精细度变化率与微纳光纤环直径的关系

Fig. 9 (a) Q value; (b) fineness; (c) relative change rate of Q value; (d) relative change rate of fineness as a function of the diameter of MNFR

4.4 数值仿真结果与分析

为了确定以上最佳的微纳光纤环直径 $580 \mu\text{m}$ 并不是实验偶然现象,仿真分析了不同微纳光纤环曲率半径对此两传输系统耦合效率的影响。由于微纳光纤环与侧边抛磨光纤的耦合效率为实现微纳光

纤系统和标准光纤系统耦合的关键参数,因此,通过简化仿真模型,将与侧边抛磨光纤耦合的微纳光纤环等效为具有特定曲率半径的一段弯曲微纳光纤,只分析此弯曲微纳光纤与侧边抛磨光纤直接耦合的情况。其简化后的模型如图 10 所示。这里仿真采

用三维光束传输方法软件包(3D BPM),软件由Rsoft公司提供。

图 11 给出了具有不同曲率半径的弯曲微纳光纤与抛磨区剩余厚度为 6 mm 的侧边抛磨光纤耦合后,微纳光纤光场(图中绿色线)与侧边抛磨光纤纤芯光场(图中蓝色线)沿光传播方向传输。图 11 中 Z 轴方向为光在侧边抛磨光纤纤芯的传播方向, X 方向为在弯曲微纳光纤与侧边抛磨光纤波导耦合平

面内与纤芯垂直的方向。光波从微纳光纤输入,输入光功率为 0.92 mW。光波经过耦合区(见 $Z = 10$ mm附近区域,圆形光场所示)从微纳光纤耦合至侧边抛磨光纤。从图 11 可见,虽然光能量被耦合至侧边抛磨光纤中,但大部分光能量以辐射模形式被损耗,仅有小部分能量以基模形式在侧边抛磨光纤继续传播,从侧边抛磨光纤一端输出,成为能被实验测量的耦合功率。

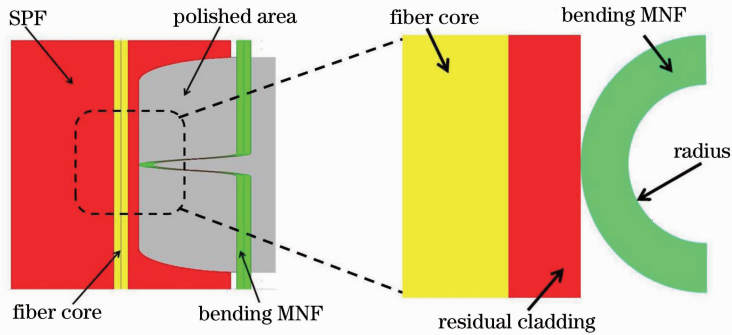


图 10 (a)弯曲微纳光纤段波导与侧边抛磨光纤波导耦合的计算模型;(b)耦合区示意图

Fig. 10 Schematic diagram of (a) model for simulation of the coupling between a bending MNF and SPF; (b) enlarged coupling region

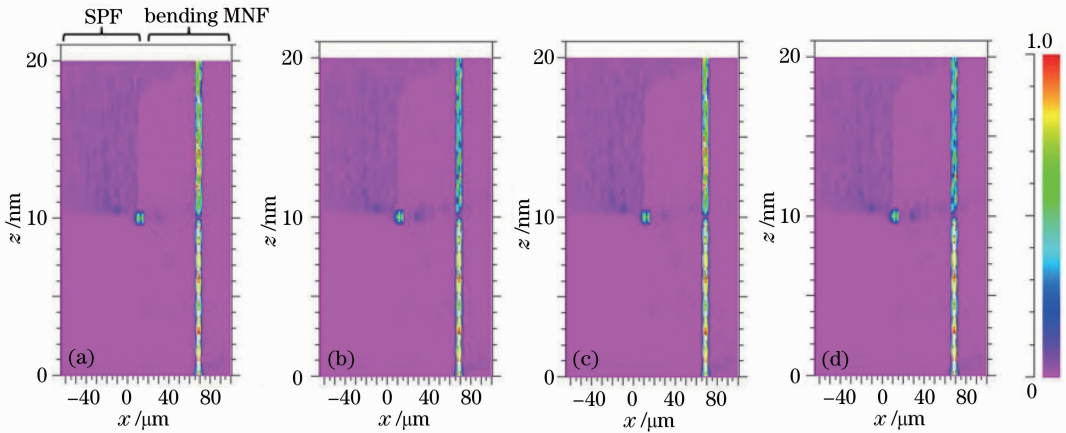


图 11 曲率半径分别为(a) 390 μm , (b) 340 μm , (c) 290 μm , (d) 240 μm 时波导耦合的光场传输图

Fig. 11 Optical field evolution along the two coupled fibers during optical coupling under different curvature radii of (a) 390 μm , (b) 340 μm , (c) 290 μm and (d) 240 μm , respectively

图 12 给出了沿光传播方向,不同曲率半径的弯曲微纳光纤与侧边抛磨光纤耦合时的两光纤光功率变化。图中实线表示弯曲微纳光纤中传输光功率的变化,其标度单位表示在图的左边,虚线表示侧边抛磨光纤中传输光功率的变化,标度单位表示在图的右边。仿真中,光场从弯曲微纳光纤段输入,为高斯型光源。取与实验相同的器件参数进行仿真。取侧边抛磨光纤波导抛磨区剩余厚度为 6 μm ,用于制作环的微纳光纤直径为 6 μm 。可得,在不同曲率半径下,光能量在传输距离约为 10 mm 处都产生了耦

合,表现为弯曲微纳光纤段波导输出端的光功率下降,而与此同时侧边抛磨光纤波导输出端的光功率上升。但在四种曲率半径 390、340、290、240 μm 下(此四个简化模型中的曲率半径可分别对应环直径 780、680、580、480 μm),可由其传输光功率估算得弯曲微纳光纤与侧边抛磨光纤波导耦合的耦合效率分别为 -42.8 dB、-27.7 dB、-26.2 dB、-42.7 dB。由此可知,曲率半径为 290 μm (对应环直径为 580 μm)的弯曲微纳光纤与剩余厚度为 6 μm 的侧边抛磨光纤的耦合效率最高,这与前面实验得到的

结论一致,最佳的微纳光纤环直径不是实验偶然的,而与微纳光纤环与侧边抛磨光纤的耦合效率相关,提高此耦合效率有望提升器件的性能。由耦合模理论^[7]可知,这里制约耦合效率的原因是微纳光纤与侧边抛磨光纤之间的模场失配。虽然目前实现的器

件性能与商用的波分复用器性能还有存在一定的差距,但通过增大微纳光纤直径、环直径或改变侧边抛磨光纤的包层剩余厚度等,有望解决耦合效率的瓶颈问题,及进一步提升器件的消光比等性能指标。

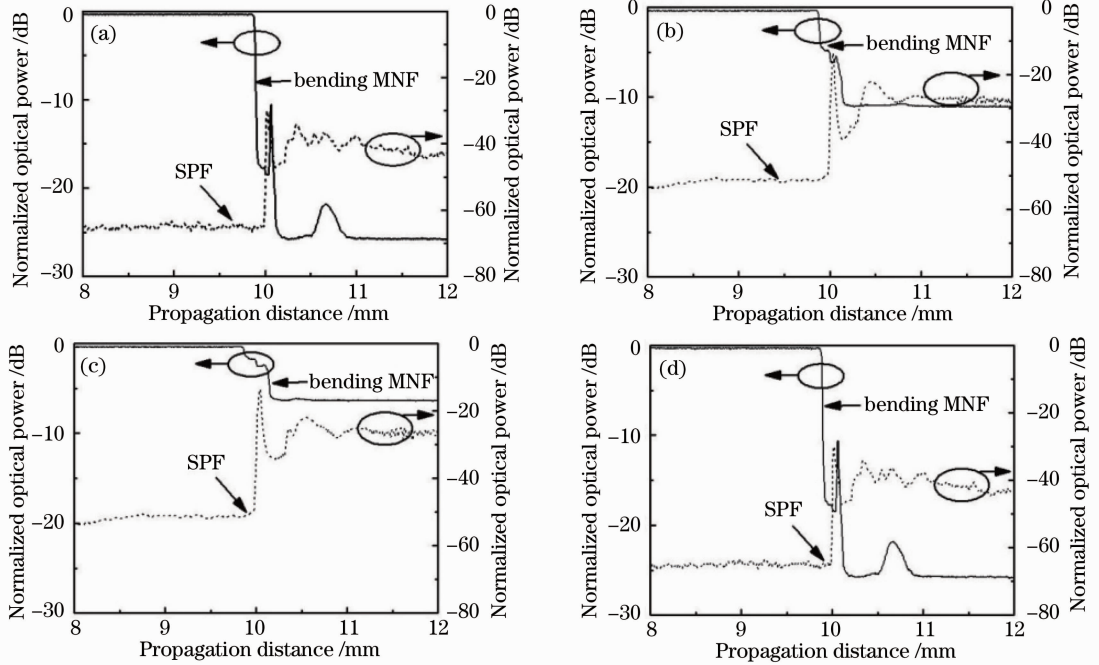


图 12 曲率半径分别为(a) 390 μm , (b) 340 μm , (c) 290 μm , (d) 240 μm 时归一化光功率沿光传播方向随距离的变化

Fig. 12 Evolution of the normalized optical power along light propagation distance with different curvature radii of

(a) 390 μm , (b) 340 μm , (c) 290 μm and (d) 240 μm , respectively

5 结 论

提出了一种用于微纳光纤系统与常规光纤系统互连耦合的新型上下载滤波器,并实验验证了微纳光纤环与侧边抛磨光纤的耦合可实现两种光纤系统的耦合与上下载滤波功能。当侧边抛磨光纤的剩余厚度为 6 μm 时,实验研究了不同环直径的微纳光纤环与侧边抛磨光纤耦合对微纳光纤环的耦合效率、Q 值以及上下载两输出端口的消光比变化。在简化模型下,数值仿真了耦合效率。结果表明,当微纳光纤的直径为 6 μm ,环直径为 580 μm 时,微纳光纤环与侧边抛磨光纤的耦合效果最佳,滤波器的下载输出端消光比为 7.5 dB,上载输出端消光比为 4.8 dB。该器件中侧边抛磨光纤既与微纳光纤环耦合,又成为固定微纳光纤环的衬底,减小了整个上下载滤波器的尺寸,具有结构紧凑、方便与光纤系统连接等优点。虽然目前实现的器件性能与商用器件相比还有一定差距,但通过优化微纳光纤直径、环直

径、包层剩余厚度和传播模场等,有望进一步提升器件的性能。

参 考 文 献

- 1 Tong Limin, R R Gattass, J B Ashcom, *et al.*. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding [J]. *Nature*, 2003, 426(6989): 816–819.
- 2 Li Yuhang, Tong Limin. Mach-Zehnder interferometers assembled with optical microfibers or nanofibers [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(4): 303–305.
- 3 Jiang Xiaoshun, Tong Limin, G Vienne, *et al.*. Demonstration of optical microfiber knot resonators [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(22): 223501.
- 4 Xing Xiaobo, Zhu Heng, Wang Yuqing, *et al.*. Ultracompact photonic coupling splitters twisted by PTT nanowires [J]. *Nano Lett*, 2008, 8(9): 2839–2843.
- 5 Du Yao, Chen Zhe, Yu Jianhui, *et al.*. All micro-fiber polarization filter based on evanescent field coupling [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0610002.
杜 垚, 陈 哲, 余健辉, 等. 耦合型微纳光纤偏振滤波器研究 [J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0610002.
- 6 Jiang Xiaoshun, Yang Qing, G Vienne, *et al.*. Demonstration of microfiber knot laser [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(14): 143513.
- 7 A W Snyder, J D Love. *Theory of Optical Waveguide* [M].

- London; Chapman and Hall, 1983. 542—544.
- 8 Chen Zhe, Qin Jiarong, Pan Hao, *et al.*. All-fiber integrated optical power monitor-controller[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 1047—1052.
陈 哲, 覃家荣, 潘 昊, 等. 全光纤集成化光功率监控器[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 1047—1052.
- 9 Yu Jianhui, Han Yuqi, Huang Hankai, *et al.*. All-optically reconfigurable and tunable fiber surface grating for in-fiber devices: a wideband tunable filter[J]. Opt Express, 2014, 22(5): 5950—5961.
- 10 V K S Hsiao, W H Fu, C Y Huang, *et al.*. Optically switchable all-fiber optic polarization rotator[J]. Opt Commun, 2012, 285(6): 1155—1158.
- 11 Li Zhen, Chen Zhe, V K S Hsiao, *et al.*. Optically tunable chirped fiber Bragg grating[J]. Opt Express, 2012, 20(9): 10827—10832.
- 12 Yu Jianhui, Li Haozhi, V K S Hsiao, *et al.*. A fiber-optic violet sensor by using the surface grating formed by a photosensitive hybrid liquid crystal film on side-polished fiber[J]. Meas Sci Technol, 2013, 24(9): 094019.
- 13 Han Yuqi, Chen Zhe, Yu Jianhui, *et al.*. Side-polished fiber sensing for measurement of nematic liquid crystal orientation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0206006.
韩玉琪, 陈 哲, 余健辉, 等. 用于向列相液晶取向测量的侧边抛磨光纤传感特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0206006.
- 14 Liao Guozhen, Zhang Jun, Cai Xiang, *et al.*. All-fiber temperature sensor based on graphene[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706004.
廖国珍, 张 军, 蔡 祥, 等. 基于石墨烯的全光纤温度传感器的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706004.
- 15 Tang Jieyuan, Chen Zhe, Fan Ruoyan, *et al.*. Thermo-optic effect of liquid materials based on side polished fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 1434—1438.
唐洁媛, 陈 哲, 范若岩, 等. 基于侧边抛磨光纤光栅传感器的液体材料热光特性[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 1434—1438.
- 16 Guo Xin, Tong Limin. Supported microfiber loops for optical sensing[J]. Opt Express, 2008, 16(19): 14429—14434.
- 17 Chen Zhe, V S K Hsiao, Li Xiaoqing, *et al.*. Optically tunable microfiber-knot resonator[J]. Opt Express, 2011, 19(15): 14217—14222.
- 18 Jiang Xiaoshun, Chen Yuan, G Vienne, *et al.*. All-fiber add-drop filters based on microfiber knot resonators[J]. Opt Lett, 2007, 32(12): 1710—1712.
- 19 M Sumetsky, Y Dulashko, J M Fini, *et al.*. Optical microfiber loop resonator[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(16): 161108.
- 20 M Sumetsky. Optical fiber microcoil resonator[J]. Opt Express, 2004, 12(10): 2303—2316.
- 21 S G Leon-Saval, T A Birks, W J Wadsoworth, *et al.*. Supercontinuum generation in submicron fibre waveguide[J]. Opt Express, 2004, 12(13): 2864—2869.

栏目编辑: 王晓球