DOI:10.19789/j.1004-9398.2022.01.006
文献引用:赵庆玲,冯胜飞.多芯光纤端面上对称耦合双环微腔气体传感特性研究[J].首都师范大学学报(自然科学版),2022,43(1):28-33.
ZHAO Q L,FENG S F. Optical characteristics and vapor sensing applications of symmetrically coupled double-ring microcavities on the tip of multi-core optical fiber[J]. Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition),2022,43(1):28-33.

多芯光纤端面上对称耦合双环微腔气体传感特性研究

赵庆玲,冯胜飞*

(首都师范大学物理系,北京 100048)

摘要:光纤传感具有耐高温、抗腐蚀、无需供电、灵敏度高和可集成等优点,在光纤端面上设计制备微纳传感结构是实现探针式光纤传感器的重要途径.本文以七芯光纤端面作为平台,在其上设计了微纳波导对称耦合的双环微腔光学系统.环形微腔与微纳波导间隔一定距离,实现倏逝波耦合,波导中的光耦合进入腔内激发其高品质因子回音壁共振.当外界气体刺激改变微腔光学参数后,共振波长发生改变,从而实现对气体的传感.采用3D双光子光刻技术在多芯光纤端面上实现系统的制备.实验上观测到共振模式的品质因子最高可达2.66×10^{4},其对酒精蒸气的传感灵敏度为2.08×10^{-6} pm.

关键词:光纤传感;3D双光子光刻技术;微腔光学;微腔传感
中图分类号:O433

Optical characteristics and vapor sensing applications of symmetrically coupled double-ring microcavities on the tip of multi-core optical fiber

ZHAO Qingling, FENG Shengfei*

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048)

Abstract: Optical fiber sensing has the advantages of high temperature resistance, corrosion resistance, power free, high sensitivity and integration. The design and fabrication of micro-nano sensing structure on the tip of optical fiber is an important way to realize the probe type optical fiber sensor. In this paper, a double ring microcavity optical system with symmetrical coupling of micro-nano waveguide is designed on the tip of seven-core optical fiber. The ring microcavity is separated from the micro-nano waveguide by a certain distance to realize the evanescent wave coupling, and the optical coupling in the waveguide enters the cavity to excite the whispering gallery modes with high quality factor. The resonance wavelength is changed when the external vapor stimulation changes the optical parameters of the microcavity, which realizes the sensing mechanism of the sensor. The system was fabricated by 3D two-photon lithography on the tip of the multi-core fiber. A resonant mode with a quality factor of 2.66×10^{4} and a sensitivity of 2.08×10^{-6} pm for alcohol vapor were obtained experimentally.

Keywords: optical fiber sensing; 3D two-photon lithography; microcavity optics; microcavity sensing
CLC: O433

收稿日期:2021-04-14

*通信作者:fengshengfei@cnu. edu. cn

0　引　言

超低损耗光纤的发明促进了通信、激光和成像等众多领域的快速发展.由于光纤具有良好的柔韧性、抗电磁干扰性能和远距离传输性能,使得其在传感方面具有很大的优势,形成了光纤传感研究领域.研究人员尝试将不同的材料和结构集成到光纤,根据传感元件与光纤的结合方式,可将光纤传感分为3类:内部结合、侧面结合和端面结合.其中端面结合是将光纤端面作为光耦合平台,将物理、化学或生物功能性材料整合到光纤端面上进行集成,从而实现性能优异的光纤传感器件[1-5].这种结合方式制成的器件具有体积小、携带方便和功能多样化等特点.目前,研究人员已将金属同心纳米环[6]、银纳米薄膜[7]、杂化金属介电结构[8]和法-珀腔[9]等集成到光纤端面上.

在众多光学传感结构中,回音壁微腔因其具有高品质因子、模式体积小、高传感灵敏度[10]、制备方便和易于集成等优点,在高灵敏度传感器[11-13]、高效滤波器[14]、非线性光学[15-16]和量子光机械效应[17]等方面有巨大的应用潜力,引起了众多研究人员的重视.但是,传统的回音壁模式微腔的激发方式和检测装置较为复杂,在实际应用中不是很灵活.将回音壁微腔直接集成到光纤中或光纤端面上,可以有效解决这一问题.

本研究是3D双光子光刻技术在光纤端面上的应用拓展.在实验过程中,通过双光子三维激光直写技术,将光刻胶材料固化在光纤端面上,制成微棱柱、微棱镜、微椎体、微纳波导和微环结构,通过观测微环腔中的回音壁模式对不同浓度可挥发有机物蒸气的响应,实现浓度的精确测量.

1　器件设计与传感机制

对称双环微腔结构如图1所示.以七芯光纤上关于中心纤芯对称的2个纤芯作为微纳波导的耦合光输入与输出端口.整个结构由一对微棱柱、一对微棱镜、一对微锥体、一根微纳波导以及对称分布在微纳波导两侧的一对微环形结构组成,其中微环由薄壁圆台支撑,圆台底部开孔,方便后续制备中圆台内部的光刻胶流出.所用七芯光纤的纤芯直径为6.0 μm,微棱柱底面边长设计为8.0 μm的正方形,可以有效减少光从光纤端面进入微棱柱时的光损耗,且可以对微棱镜、微锥体及波导整体起到支撑作用.微棱镜底角为45.0°,光刻胶材料折射率约为1.52,满足全反射条件,可将大部分光反射到垂直入射方向上.为减少光从微棱镜进入微纳波导时的光损耗并满足绝热条件[18],微锥体的锥角大小设计为66.8°.微环腔设计为中心高度处半径较大,向上下边缘逐渐收缩的形式,这样有利于激发回音壁模式.光在微腔结构中传播及回音壁模式激发方式如图1红色部分所示.2个纤芯之间通过微棱柱、微棱镜、微锥体及微纳波导连通.当光经过环形微腔所在位置时,微纳波导表面的倏逝波会进入环形微腔中.

根据相位匹配条件,可得环形微腔的谐振条件为 $2\pi R\cdot n_{\mathrm{eff}}=m\lambda$,式中:$R$ 为微腔半径,n_{eff} 为微腔有效折射率,m 为角向模式数,λ 表示谐振波长.微腔由有机高分子材料IPL-780制成,在不同的气体环境中,材料吸附有机分子后发生溶胀,其有效折射率和

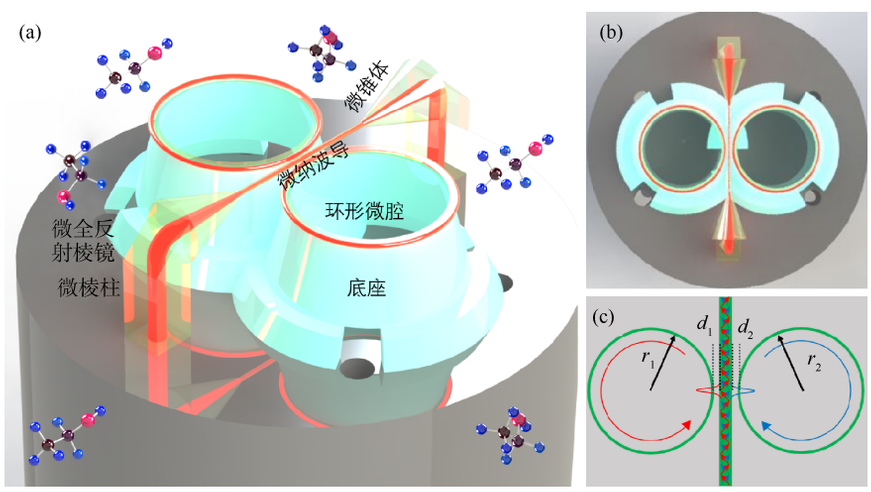


图1　对称双环微腔设计

(a)结构示意;(b)结构俯视;(c)光在微腔结构中的传播

半径都会发生变化,共振波长随之改变.通过对共振模式强度和位置变化的观察,可以判断气体环境的变化,这就是环形光刻胶微腔对气体传感的物理机制.

2 耦合微腔回音壁共振模式数值分析

采用Lumerical FDTD Solutions软件对微腔结构的光学特性进行二维仿真模拟.为了突出双环耦合微腔与单个环的不同,将不同耦合间距下双环微腔的回音壁共振特性与单环情况进行对比,波长在1 520.00~1 570.00 nm的透射光谱的模拟结果如图2所示.d_0表示单环情况下微环与微纳波导的间距,d_1和d_2表示双环情况下左右两侧微环与微纳波导的间距.模拟中环与微纳波导之间的距离取值为0.1~0.8 μm,从下向上每次增加0.1 μm.由图2(b)可知,当环与波导之间的距离增大时,共振模式的品质因子(Q)逐渐增大,但调制深度在0.5 μm处达到最大.环与波导间距在0.1~0.5 μm逐渐增大时,共振波长逐渐红移,这是由于环与波导间距增大,有效光程变大,共振波长变大.继续增大环与波导间距时,该间距变化与整个光程相比较小,共振模式的位置几乎不再发生变化.根据模拟结果分析可知,环与波导的间距影响回音壁模式共振的品质因子,而当环与波导间距达到最佳耦合时,共振模式的调制深度达到最大.

环与波导间距为0.3~0.6 μm时,对称双环与相同距离的单环微腔的透射谱比较如图3所示.双环的调制深度要比单环大,这是因为波导中的对称光模式分别耦合到环,强度形成叠加造成的.

3 器件的制备

实验中所用多芯光纤为英国Fibercore公司的七芯光纤跳线,其包层直径为124.5 μm,7个纤芯直径均为6.0 μm,其中6个纤芯构成边长为35.0 μm的正六边形,另1个纤芯处于正六边形的中心位置处.选取光纤端面同一直径上的2个纤芯作为结构耦合输入和输出端口.各部分的几何参数分别为:微棱柱为底面边长8.0 μm、高度16.0 μm的正四棱柱;微全反射棱镜高8.0 μm,全反射面与水平方向夹角为45.0°;微椎体底面直径为12.0 μm、高20.0 μm;微纳波导为底面直径1.0 μm、长22.0 μm的圆柱体;微环内外半径分别为13.35和15.35 μm,微环谐振腔的宽度为2.0 μm.实验采用Nanoscribe GmbH公司生产的3D双光子激光直写系统及与之配套的IPL-780光刻胶来制备器件.

多芯光纤端面上的微纳波导传感器件的扫描电子显微镜示意如图4所示.整个器件的结构和尺寸与设计值一致.微环腔的大小、形状和位置等符合预期,而微纳波导向其中一个环弯曲,这是因为光刻胶材料硬度比较小,在显影过程中,波导容易在显影液的表面张力作用下发生形变.由于微腔结构其他部分设计比较牢固,而悬空的微纳波导不可避免地会向2个环弯曲或裂开.

4 器件传感测试表征

4.1 测试系统

实验过程中的测试系统如图5所示,由可调谐激光器(TLB-6728-P,Newport Ltd.,USA)、扇出、七芯光纤、光电探测器(DETO8CFC/M,160 Thorlabs Ltd.,USA)及示波器组成[19].可调谐激光器可发出波长为1 520.00~1 570.00 nm的红外光,光从扇出系统的1个纤芯进入七芯光纤的1个纤芯,传输经过结构后从另1个纤芯输出,再次耦合进入扇出中最终到达光电探测器,转化为电信号,在示波器上显示.

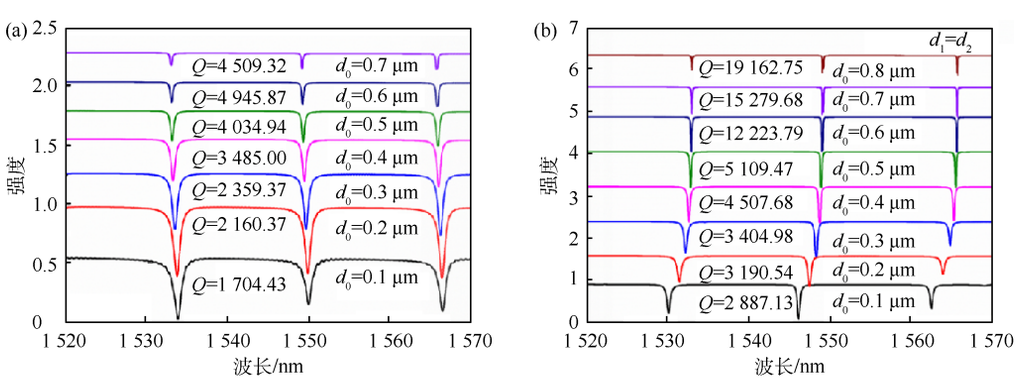
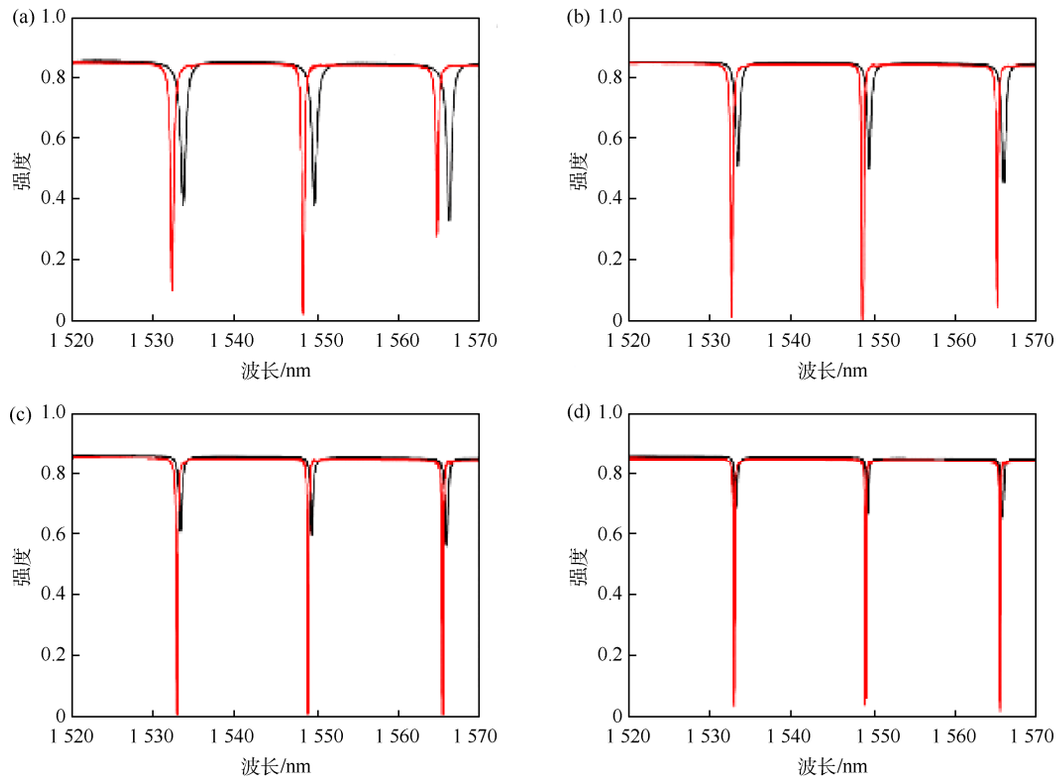


图2 微腔回音壁共振模式透射光谱模拟

(a)单环微腔;(b)对称双环微腔



注:红色曲线为对称双环微腔透射光谱,黑色曲线为单环微腔透射光谱.

图 3　对称双环与相同距离的单环微腔透射谱比较

(a)r=0.3 μm;(b)r=0.4 μm;(c)r=0.5 μm;(d)r=0.6 μm

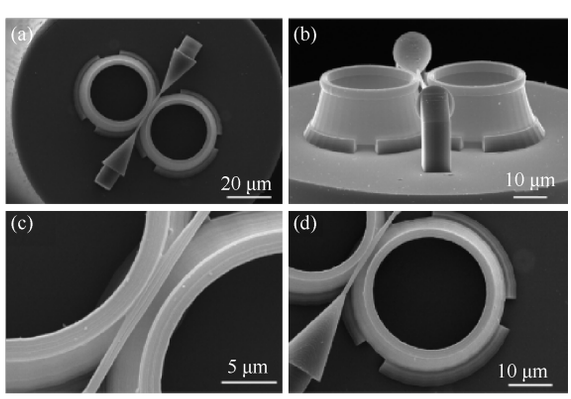


图 4　多芯光纤端面上的微纳波导传感器件的扫描电子显微镜图像

(a)俯视;(b)侧视;(c)微纳波导放大;(d)环形谐振腔放大

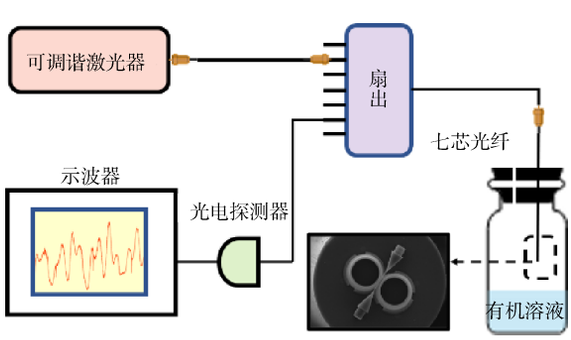


图 5　实验测试系统

4.2　可挥发有机物蒸气的体积分数响应特性表征

体积分数响应是判断传感器件性能的重要指标,主要表现为器件对最低气体体积分数和气体体积分数变化的感知.实验中所用低体积分数蒸气为低体积分数可挥发有机物溶液所产生的饱和蒸气,通过精确配制溶液的体积分数,可以精确控制饱和蒸气的体积分数.选用可挥发有机物异丙醇和酒精作为被检测对象,来表征器件的蒸气体积分数响应特性.溶液配制及测试过程如下:将 50 mL 纯水放入容积为 125 mL 的气室瓶内,并将光纤传感器件伸入液体上方的蒸气中,用注射器逐渐向瓶内注入有机溶剂,配成体积分数相差 0.2%、体积分数为 0.2% ~ 2.0% 的有机溶液 10 份.不同体积分数溶液中的有机物挥发程度不同,从而导致回音壁微腔的共振波长发生变化,通过观测示波器上的透射光谱,可以测得共振波长随蒸气体积分数的变化量值.

器件中气体传感响应特性实验表征如图 6 所示.共振模式的 Q 最高可以达到 2.66×10^4,异丙醇溶液体积分数从 0 ~ 2.0% 变化过程中,共振模式波长增加了 2.28 nm,酒精溶液体积分数从 0 ~ 2% 变化过程中,共振模式波长增加 2.93 nm.当溶液体积分

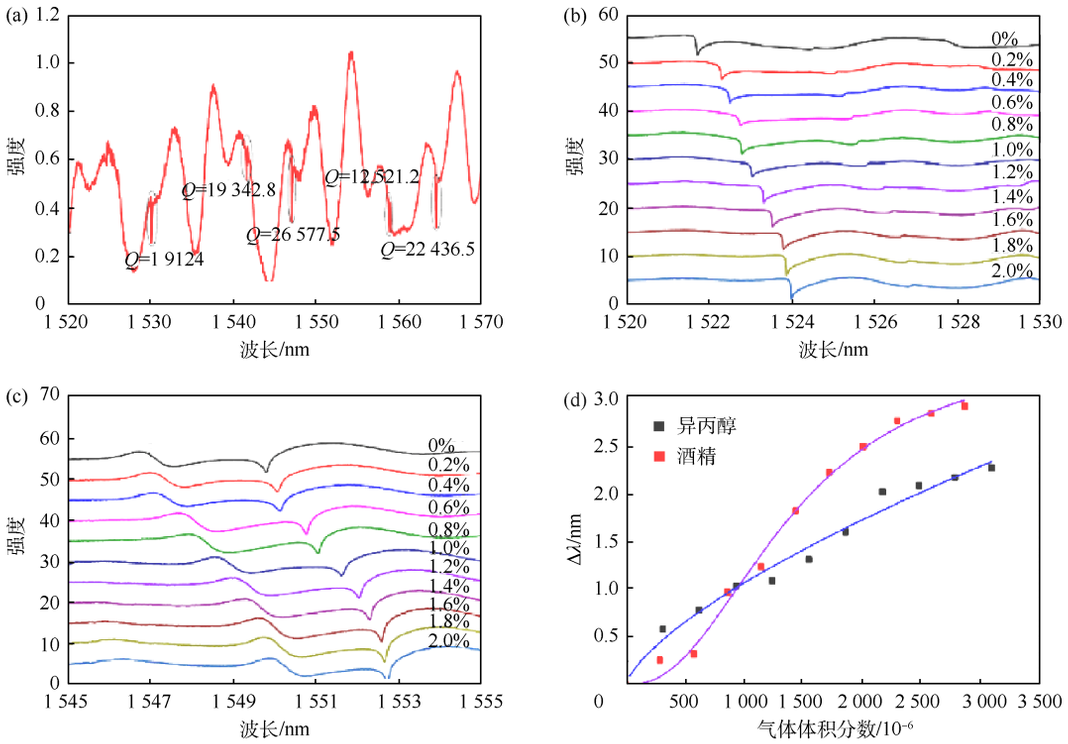


图6　器件对不同样品传感特性实验表征

(a)空气中的透射光谱;(b)异丙醇溶液蒸气中的共振模式漂移;(c)酒精溶液蒸气中的共振模式漂移;(d)异丙醇和酒精溶液蒸气中共振波长红移量随蒸气体积分数的变化关系

数低于2.0%时,蒸气室内的有机蒸气体积分数可以根据拉乌-亨利定律计算获得[20],即

$$\omega = \frac{C_a \rho}{P_0 H^{CP}}, \tag{1}$$

式中:ω表示溶液上方的饱和蒸气体积分数,C_a表示稀释后液体的摩尔浓度,ρ表示混合水溶液的密度,H^{CP}表示亨利常数,P_0表示标准大气压.实验过程中气室内的压强可看作标准大气压,实验室温度为22 ℃,异丙醇和酒精的H^{CP}分别为1.68和2.36 mol/(m^3·pa).根据Langmuir等温线模型[21]拟合曲线计算可得,器件对酒精和异丙醇的平均传感灵敏度分别为2.08×10^{-6}和1.46×10^{-6} pm.

实验中观测到的回音壁共振模式为6个,而模拟结果中只有3个共振模式.这是由于在实际制备中,环的宽度比模拟值大,从而支持高阶回音壁模式造成的.将模拟程序中的环宽度改为与实验对应的2 μm后,结果显示同样会有6个共振模式出现.将归一化实验结果与模拟结果进行比较,如图7所示,二者吻合较好.分别取波长为1 557.15和1 563.11 nm处的共振模式,分析环中的场强分布如图7插图所示,当环宽度为2.0 μm时,除基模外,还会激发二阶高阶模式.另外,实验光谱中大的周期性震荡是由于系统不同纤芯之间存在耦合干涉造成的.

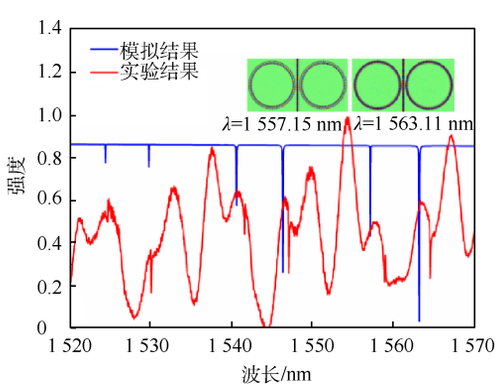


图7　模拟结果与实验结果的对比

5　结　论

本文提出一种多芯光纤端面上对称耦合双环微腔气体传感器件方案,实现了器件的设计、制备以及传感性能表征.在设计中通过FDTD模拟证明了成对环形微腔与微纳波导的对称耦合比单个环表现出增强的回音壁模式共振强度,这是因为波导中的对称光模式分别耦合到环形腔中,从而造成透射光谱中由回音壁模式共振形成的透射谱叠加.实

验中观测到的微环谐振器Q可以达到2.66×10^{4},且对酒精蒸气的传感显示出了良好的灵敏度,可达2.08×10^{-6} pm.

参 考 文 献

[1] WILLIAMS H E, FREPPON D J, KUEBLER S M, et al. Fabrication of three-dimensional micro-photonic structures on the tip of optical fibers using SU-8[J]. Optics Express, 2011, 19(23): 22910-22922.

[2] GISSIBL T, THIELE S, HERKOMMER A, et al. Two-photon direct laser writing of ultracompact multi-lens objectives[J]. Nature Photonics, 2016, 10(8): 554-560.

[3] XIONG Y F, XU F. Multifunctional integration on optical fiber tips: challenges and opportunities [J]. Advanced Photonics, 2020, 2(6): 064001.

[4] CONG X, LIAO C R, LI Z Y, et al. Optical fiber integrated functional micro-/nanostructure induced by two-photon polymerization [J]. Frontiers in Materials, 2020, 7: 586496.

[5] VAIANO P, CAROTENUTO B, PISCO M, et al. Lab on fiber technology for biological sensing applications [J]. Laser and Photonics Reviews, 2016, 10(6): 922-961.

[6] FENG S F, DARMAWI S, HENNING T, et al. A miniaturized sensor consisting of concentric metallic nanorings on the end facet of an optical fiber[J]. Small, 2012, 8(12): 1937-1944.

[7] XU F, SHI J H, GONG K, et al. Fiber-optic acoustic pressure sensor based on large-area nanolayer silver diaghragm [J]. Optics Letters, 2014, 39 (10): 2838-2840.

[8] CONSALES M, RICCIARDI A, CRESCITELLI A, et al. Lab-on-fiber technology: toward multifunctional optical nanoprobes[J]. ACS Nano, 2012, 6(4): 3163-3170.

[9] GIAQUINTO M, ALIBERTI A, MICCO A, et al. Cavity enhanced lab-on-fiber technology: towards advanced biosensors and nano-opto-mechanical active devices[J]. ACS Photonics, 2019, 6(12): 3271-3280.

[10] 邹长铃,董春华,崔金明,等.回音壁模式光学微腔:基础与应用[J].中国科学(物理学·力学·天文学),2012,42(11):1155-1175.

[11] ARMANI A M, KULKARNI R P, FRASER S E, et al. Label-free, single-molecule detection with optical microcavities[J]. Science, 2007, 317(5839): 783-787.

[12] KIM E, BAASKE M D, SCHULDES I, et al. Label-free optical detection of single enzyme-reactant reactions and associated conformational changes[J]. Science Advances, 2017, 3(3): e1603044.

[13] LU T, LEE H, CHEN T, et al. High sensitivity nanoparticle detection using optical microcavities [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(15): 5976-5979.

[14] ROKHSARI H, VAHALA K J. Ultralow loss, high Q, four port resonant couplers for quantum optics and photonics [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(25): 253905.

[15] KIPPENBERG T J. Nonlinear optics in ultra-high-Q whispering-gallery optical microcavities[D]. California: California Institute of Technology, 2004.

[16] ILCHENKO V S, SAVCHENKOV A A, MATSKO A B, et al. Nonlinear optics and crystalline whispering gallery mode cavities [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(4): 043903.

[17] WIEDERHECKER G S, CHEN L, GONDARENKO A, et al. Controlling photonic structures using optical forces [J]. Nature, 2009, 462(7273): 633-636.

[18] ZHU S, PANG F F, HUANG S J, et al. High sensitivity refractive index sensor based on adiabatic tapered optical fiber deposited with nanofilm by ALD[J]. Optics Express, 2015, 23(11): 13880.

[19] ZHAN Y X, LIU Q Q, FENG S F, et al. Photonic molecules stacked on multicore optical fiber for vapor sensing [J]. Applied Physics Letters, 2020, 117(17): 171107.

[20] SANDER R. Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for wate as solvent [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(8): 4399-4981.

[21] YEBO N A, LOMMENS P, ZEGER H, et al. An integrated optic ethanol vapor sensor based on a silicon-on-insulator microring resonator coated with a porous ZnO film [J]. Optics Express, 2010, 18(11): 11859-11866.

(责任编辑:兰丽丽)