

基于大空气孔保偏微结构光纤偏振回旋滤波器的光微流折射率传感器

祁鸿, 武创*, 李杰, 关柏鸥

暨南大学光子技术研究院, 广东省光纤传感与通信技术重点实验室, 广东 广州 510632

摘要 提出一种基于大空气孔保偏微结构光纤偏振回旋滤波器(PM-MOF-RF)的光微流折射率传感器。保偏微结构光纤(PM-MOF)沿轴向引入周期性往复扭转结构,可实现光纤中正交偏振模的谐振耦合,通过偏振检测,可得到类似于长周期光栅的透射光谱,从而获得偏振回旋滤波器(PRF)。基于耦合模理论,对该器件的透射光谱进行仿真。在该器件两端与单模光纤(SMF)连接处分别接入一小段 C 形光纤,可将待测液体导入和导出 MOF 的空气孔而不影响 SMF 与 MOF 的光信号耦合,从而得到一个全光纤的光微流折射率传感器。通过有限元分析方法模拟微流折射率在 1.333 附近变化时 PM-MOF 的相模式双折射色散曲线,进而可得不同微流折射率的透射光谱,通过追踪光谱波长漂移,得到 7196.4 nm/RIU(RIU 为折射率单元)的折射率灵敏度,同时可知当按比例缩小光纤尺寸时,可将其灵敏度提升至 16754.0 nm/RIU。

关键词 光纤光学; 折射率灵敏度; 偏振回旋滤波器; 微结构光纤

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170623

Optofluidic Refractive Index Sensor Based on Large Air-Hole Polarization-Maintaining Microstructured Optical Fiber Rocking Filter

Qi Hong, Wu Chuang*, Li Jie, Guan Baiou

Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications,
Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract An optofluidic refractive index sensor based on large air-hole polarization-maintaining microstructured optical fiber polarization rocking filter (PM-MOF-PRF) is proposed. Resonant coupling between orthogonal polarization modes occurs when a periodic back-and-forth twist is induced by PM-MOF along the axial. Via polarized detection, a transmission spectrum similar to a long-period fiber grating can be observed, and thus a polarization rocking filter (PRF) is obtained. The transmission spectrum of this device is simulated based on mode-coupling theory. When splicing a short piece of C-shaped fiber between the PM-MOF and single-mode fibers (SMF) at both end of the PRF, it allows fluids running into and out of the air hole channels without affecting light coupling between the MOF and SMF. Therefore, an all-fiber optofluidic refractive index sensor can be constructed. Then the phase modal birefringence dispersion curves of the PM-MOF for microfluidics with refractive index around 1.333 is simulated by finite element method, and the transmission spectra of the PRF for different microfluidic refractive index values are obtained. By tracking the wavelength shift of the spectra, a refractive index sensitivity of 7196.4 nm/RIU is achieved, and the value can be improved to 16754.0 nm/RIU when the MOF is tapered to half of the initial diameter.

Key words fiber optics; refractive index sensitivity; polarization rocking filters; microstructured optical fiber

OCIS codes 060.2370; 060.4005; 060.2420

收稿日期: 2019-04-26; 修回日期: 2019-05-06; 录用日期: 2019-05-15

基金项目: 广东省自然科学基金(2014A030306040, 2018A030313440)、广东省特支计划科技创新青年拔尖人才(2016TQ03X124)、广州市珠江科技新星专项(201806010197)

* E-mail: wuchuang.ipt@gmail.com

1 引言

近年来,生命科学与生物技术取得了迅猛发展。对于生物物质成分含量等信息的有效获取,是进行生命科学等领域研究的必要前提,这依赖于高效精确的生化分析技术和工具。光学生化传感器具有测量精度高、响应速度快等优点,各种结构的光学传感器,可满足生物化学传感领域的不同需要,受到研究者的青睐^[1-2]。相比于传统分析技术,微流控技术是生化分析领域的前沿技术,具有样品用量少、响应速度快等突出优点^[3]。21世纪初,微流控技术与光子学交叉融合诞生了光微流技术这一新兴的研究领域^[4-5]。光微流传感器的设计思想是在设计光学传感结构时考虑如何架构微流通道,将光学结构与微流通道集成以构成光信号与微流相互作用的平台,并实现对微流生化成分变化的测量^[6]。

微结构光纤(MOF)是近年光纤光子学领域的一项重大创新^[7],它具有许多传统光纤所没有的优异特性。特别地,其横截面沿轴向不变的空气孔可直接作为微流通道^[8],因而光波与微流能够在光纤内直接相互作用,这为发展新型光微流传感器提供了新的机遇与可能^[9]。与传统光微流传感器相比,基于MOF的光微流传感器具有光波与微流作用距离长、结构紧凑、便于光信号耦合等突出优点^[10]。

例如,微流对MOF中传输的光波会造成吸收损耗,在其透射光谱会形成特定的吸收峰,基于此可实现对乙炔、氰化氢、氧气、维生素C等组分的识别^[11-13],这种传感方式中组分含量的识别依赖于光强检测,因此测量精度较低。在MOF上刻写布拉格光纤光栅^[14-15]或长周期光纤光栅^[16],通过检测光栅谐振波长的漂移,可实现微流折射率传感,但是灵敏度较低,只有几十至几百nm/RIU(RIU为折射率单元)。基于选择性填充操作,可实现MOF纤芯模式与微流通道模式的谐振耦合,得到10000.0 nm/RIU的折射率灵敏度^[17],但这种传感方式仅适用于待测物折射率高于1.444的情况,难以用于生化传感。利用MOF中基模与高阶模^[18-19]或正交偏振模^[20-21]之间的模式干涉,折射率在1.333附近可得到数千nm/RIU的折射率灵敏度,但是干涉光谱具有周期性条纹,传感器的折射率测量范围受限于干涉光谱的自由波长范围(FSR)。

因此本文提出一种基于大空气孔保偏微结构光纤偏振回旋滤波器(PM-MOF-RF)的光微流折射率传感器,它兼有光栅型和干涉型传感器的优点,可实

现较大范围的高灵敏度折射率传感。基于耦合模理论对传感器的透射光谱进行仿真,基于有限元分析方法模拟在不同微流折射率下光纤的模式双折射色散曲线以及相应的输出光谱。理论模拟结果表明,折射率在1.333附近,可得7196.4 nm/RIU的高灵敏度,同时可知当按比例缩小光纤尺寸时,可将其灵敏度提升至16754.0 nm/RIU。

2 传感器结构和工作原理

2.1 PM-MOF 几何参数

偏振回旋滤波器(PRF)需要使用高双折射光纤,大空气孔尺寸有利于待测液体流入和流出光纤,因此选择一种柚子形大空气孔PM-MOF^[22],它的纤芯和包层都是纯石英材料,基于全内反射导光。其横截面扫描电镜(SEM)照片如图1所示,光纤包层直径为125.0 μm ,光纤横截面有6个扇形大空气孔,它们的径向直径约为24.0 μm ,空气孔之间石英壁厚度约为1.3 μm ,其中垂直方向2个空气孔尺寸略小于另外4个,形成了一个类椭圆形的纤芯,其长轴和短轴直径分别为11.8 μm 和5.4 μm ,因此光纤具有几何双折射效应。基于有限元分析方法,利用COMSOL软件对光纤的几何参数建模,可以得到MOF空气孔填充液体前后正交偏振基模的模场分布和对应的有效折射率 n_x 和 n_y ,如图2所示,当空气孔通道为空气和填充液体,孔内折射率 n_{hole} 分别为1.000和1.333,它在波长1550 nm处的相模式双折射 B 分别为 2.3×10^{-4} 和 0.9×10^{-4} 。

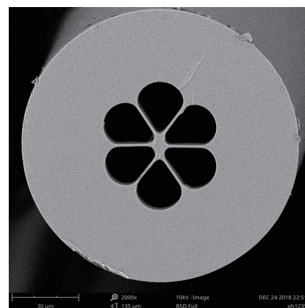


图1 PM-MOF横截面的扫描电镜照片

Fig. 1 SEM image of the cross section of PM-MOF

2.2 PM-MOF-RF 的工作原理及光微流传感器的构建

保偏光纤偏振回旋滤波器是由空间光学器件演变而来。1965年,Šolc^[23]提出一种双折射链式滤波器,后人将之命名为Šolc Filter,它的工作原理是将一系列的半波片链式排列在一起,每两个半波片为一组,相邻半波片的主轴相对于上一个半波片的主

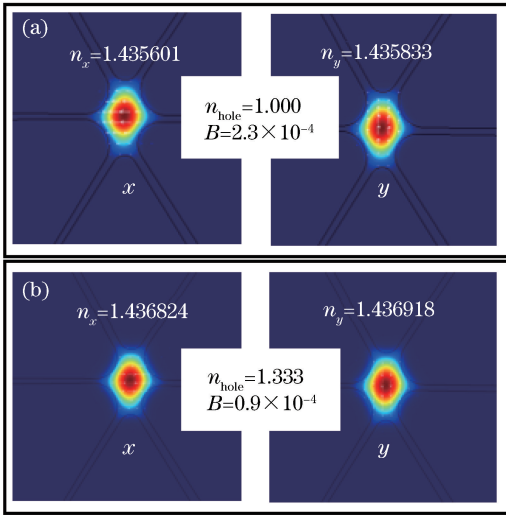


图2 MOF空气孔填充液体前后的正交偏振基模的模场分布和有效折射率。(a)填充液体前;(b)填充液体后

Fig. 2 Mode field distribution and effective refractive of fundamental modes before and after liquid filling in MOF air-hole. (a) Before liquid filling; (b) after liquid filling

轴往复扭转,即所有奇数编号的半波片主轴方向一致,所有偶数编号的半波片主轴方向一致。而两个系列半波片的主轴之间存在一个扭转角度,线偏振光沿着半波片的主轴入射时,在满足相位匹配条件时,两波片厚度刚好等于一个周期长度,故会出现一个谐振波长,能够将部分或全部光耦合至与之正交的偏振态,而耦合效率取决于扭转角度和半波片系列长度。如果输出端检测到与输入端相同的偏振态,透射光谱会出现一个耦合谐振峰,形成一个带阻滤波器。因为相邻半波片往复扭转,并且光在两个正交偏振态之间谐振耦合,所以这种器件也称为PRF。

1984年,Bell实验室的Stolen等^[24]首次利用保偏光纤实现PRF,他们将保偏光纤沿轴向周期性往复扭转,每两个扭转点之间的一段保偏光纤相当于一个半波片,因此可得到一个全光纤的PRF。2003年英国巴斯大学的Kakarantzas等^[25]首次利用CO₂激光加热的方式在PM-MOF上成功制备PRF,得到了100%的正交偏振模耦合效率,他们利用宽带光源、起偏器、检偏器、光谱仪实时监测器件的透射光谱,对可旋转光纤夹具进行PM-MOF预加扭转,然后利用CO₂激光在PM-MOF上加热形成永久性扭转,再对光纤预加相反方向同样角度的扭转,在半个周期之后用CO₂激光再在PM-MOF加热形成一个永久性反向扭转,重复以上步骤,逐点沿着PM-MOF轴向形成一个周期性的往复扭转结

构。因受限于实验条件,暂时无法制备PM-MOF-PRF,本文主要仿真该器件对折射率变化的光谱响应特性,从理论上研究这种新型光微流折射率传感器的光谱特性和灵敏度特性。

为将待测液体引入和导出MOF的空气孔,可在单模光纤(SMF)和MOF的连接处熔接一小段C形光纤(其长度通常为10~20 μm),其主要作用是给PM-MOF-RF提供一个进出液体的出入口,由于C形光纤很短,基本不会影响SMF与MOF的光信号耦合^[20-21]。C形光纤是由一个内径为4 mm、外径为12 mm且侧面开槽(横截面为C形状)的纯石英管预制棒拉制而成,得到的C形光纤内外径分别为48 μm和145 μm。其空芯区域正好覆盖于MOF的空气孔包层部分,先将SMF与C形光纤熔接,然后在显微镜下将C形光纤切割至10~20 μm得到SMF-C结构,再将其与MOF熔接,得到一个SMF-C-MOF结构。在不影响SMF与MOF光信号耦合的前提下,为微流的引入和导出提供入口和出口,实现光信号和微流体的全光纤集成。宽带光源经由一个手动起偏器得到宽带线偏振光,沿MOF的快轴或慢轴耦合进入MOF,调节输出端的检偏器透振方向,使其与起偏器透振方向相同,即可检测同一偏振态。待测液体由C形光纤侧面的缺口进入到MOF空气孔的微通道内,当微流折射率变化时,MOF模式双折射随之变化,导致PRF的相位匹配条件发生改变,使谐振波长产生波长漂移,从而实现光微流折射率传感。图3为光微流传感系统及PRF结构的示意图。

根据耦合模理论,入射偏振态与之正交偏振态的耦合效率为^[25]

$$P = \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + (\delta/2)^2} \sin^2[\sqrt{\kappa^2 + (\delta/2)^2} N \cdot \Lambda], \quad (1)$$

$$\kappa = \theta_{\text{eff}} \cdot \frac{|n_x^2(\lambda) - n_y^2(\lambda)|}{\lambda \sqrt{n_x(\lambda)n_y(\lambda)}} \approx \theta_{\text{eff}} \cdot 2B(\lambda)/\lambda, \quad (2)$$

$$B(\lambda) = |n_x(\lambda) - n_y(\lambda)|, \quad (3)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} B(\lambda) - \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (4)$$

式中, P 为耦合效率, Λ 为扭转周期, N 为扭转周期数量, NA 为器件总长度, θ_{eff} 为有效扭转角度, λ 为自由空间波长, $n_x(\lambda)$ 和 $n_y(\lambda)$ 分别为光纤 x 偏振和 y 偏振基模的有效折射率, $B(\lambda)$ 是光纤的相模式双折射, κ 是耦合系数, δ 是相位失谐量。

由(4)式可知,当 $\lambda = B(\lambda)\Lambda$ 时, $\delta = 0$,满足相

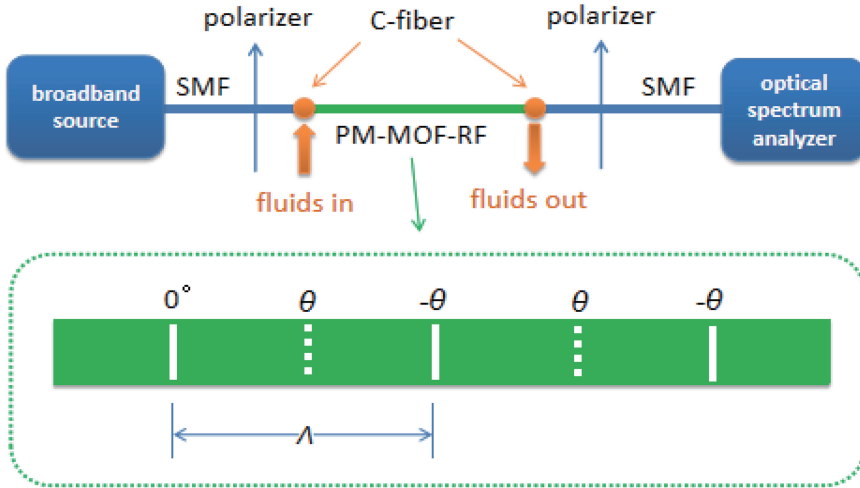


图 3 全光纤光微流传感系统和偏振回旋滤波器结构示意图

Fig. 3 Schematic of all-fiber optofluidic sensing system and the PRF structure

位匹配条件,此时发生谐振。在该条件下,当 $\kappa N\Delta = \pi/2$, 即 $4N\theta_{\text{eff}} = \pi$ 时, P 取得最大值 1, 此时耦合效率为 100%。根据以上理论,只要获知 PM-MOF 的相模式双折射色散曲线 $B(\lambda)$ 及 PRF 的各项结构参数,就能仿真 PM-MOF-RF 的透射光谱。

3 结果与讨论

3.1 PM-MOF-RF 的输出光谱

由 2.2 节的理论可知,PM-MOF-RF 的谐振波

长取决于 $\Delta = \lambda/B(\lambda)$, 如果令谐振波长在 1550 nm 波段,则需获知 $B(\lambda)$ 的色散曲线,从而确定合适的 Δ 。利于 COMSOL 进行波长扫描,计算 MOF 在填充空气和折射率为 1.333 的液体后其双折射随波长的变化,并对 $B(\lambda)$ 三阶多项式进行拟合从而得到 λ , 如图 4(a)所示。同时,也能得到 PRF 扭转周期 Δ 随谐振波长 λ 的变化曲线,如图 4(b)所示。

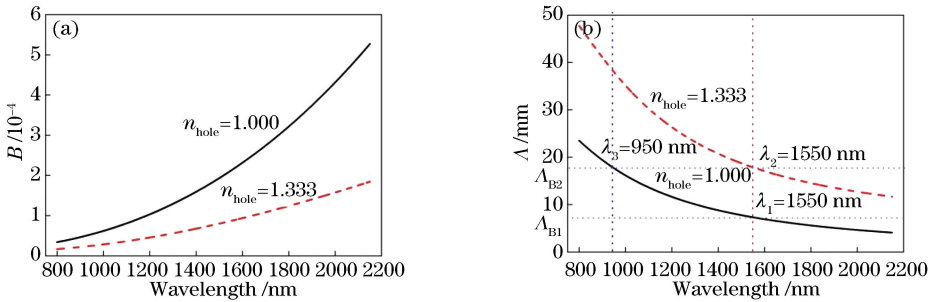


图 4 MOF 在填充液体前后的相模式双折射随波长变化曲线及对应的 PRF 扭转周期随谐振波长的变化曲线。

(a) MOF 相模式双折射随波长变化曲线; (b) PRF 扭转周期随谐振波长变化曲线

Fig. 4 Curves of phase modal birefringence with wavelength of MOF before and after liquid filling and PRF twist period as a function of the resonant wavelength. (a) Phase modal birefringence of the MOF as a function of wavelength;

(b) twist period of the PRF as a function of the resonant wavelength

由图 4(b)可知,当 MOF 没有填充液体时,如果 PRF 的谐振波长是 1550 nm,那么对应的扭转周期 Δ_{B1} 为 7.3 mm,这种情况下填充液体后,将观察不到谐振峰;当 MOF 填充折射率为 1.333 的液体后,如果 PRF 的谐振波长为 1550 nm,那么对应的扭转周期 Δ_{B2} 为 17.8 mm,这种情况下,没有填充液体时 PRF 的谐振峰将出现在 950 nm。这意

味着,如果希望光微流传感谐振峰位于 1550 nm 波段,那么在制作器件时(空气孔中无液体),应该在 950 nm 波段监测器件的制备过程,这一点对于光微流传感器的设计与制作具有至关重要的指导意义。

在后续研究中,设置扭转周期为 17.8 mm。除了扭转周期,PRF 另外两个重要参数是有效扭转角

度 θ_{eff} 和扭转周期数 N , 由 2.2 节的理论可知, 当 $4N\theta = \pi$ 时耦合效率为 100%, 谐振峰最强。为控制 PRF 总长度在 20 cm 左右, 选择 $N = 12$, 由此可得最佳有效扭转角度 $\theta_{\text{eff}} = 3.75^\circ$, 于是利用 (1) 式可得, 当 $\Lambda = 17.8$ mm, $N = 12, \theta_{\text{eff}} = 3.75^\circ$ 时, 填充液体前后 PRF 的输出光谱, 如图 5 所示。

3.2 PM-MOF-RF 结构参数对其光谱特性的影响

PM-MOF-RF 的结构参数主要包括扭转周期 Λ 、有效扭转角度 θ_{eff} 、扭转周期数量 N , 研究这三个参数的变化对器件输出光谱的影响。保持有效扭转角度 $\theta_{\text{eff}} = 3.75^\circ$ 和扭转周期数 $N = 12$ 不变, 改变扭转周期 Λ , 对输出光谱进行仿真。图 6(a) 为 MOF 填充了折射率为 1.333 的微流体后, 扭转周期 Λ 分别为 21.9, 19.7, 17.8, 16.3, 15.1 mm 时器件的输出光谱, 图 6(b) 为器件谐振波长随扭转周期的变化曲线, 表明器件的谐振波长随着扭转周期的增大而减小,

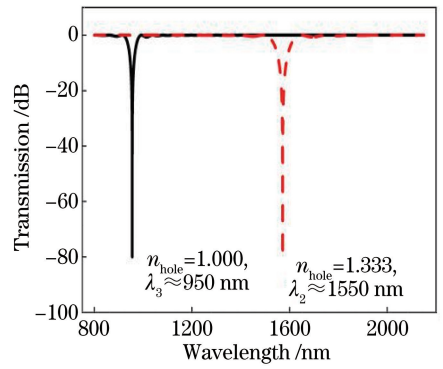


图 5 PRF 在 $\Lambda = 17.8$ mm, $N = 12, \theta_{\text{eff}} = 3.75^\circ$ 条件下填充液体前后的透射光谱

Fig. 5 Transmission spectra of the PRF with $\Lambda = 17.8$ mm, $N = 12, \theta_{\text{eff}} = 3.75^\circ$ before and after liquid filling. This is caused by the dispersion effect of the PM-MOF mode double refraction. It can be seen from the figure that when the twist period Λ is 17.8 mm, the resonant wavelength is located at 1550 nm.

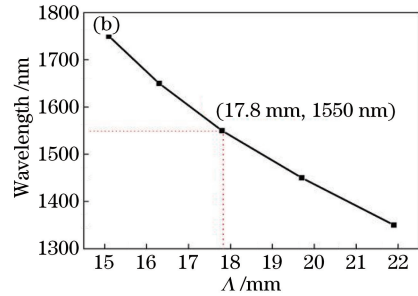
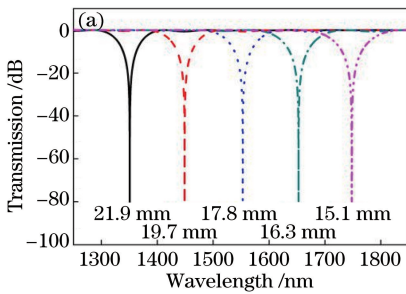


图 6 $N = 12, \theta_{\text{eff}} = 3.75^\circ$ 时, PRF 在不同扭转周期长度下的输出光谱特性。(a) 输出光谱; (b) PRF 谐振波长与扭转周期长度的关系

Fig. 6 Output spectrum characteristics of PRF at different twist period lengths when $N = 12, \theta_{\text{eff}} = 3.75^\circ$.

(a) Output spectra; (b) resonant wavelength of PRF as a function of the twist period lengths

保持有效扭转角度 $\theta_{\text{eff}} = 3.75^\circ$ 和扭转周期 $\Lambda = 17.8$ mm 不变, 逐步增大扭转周期个数 N , 对器件的输出光谱仿真, 如图 7(a) 所示。图 7(b) 表明当扭

转周期个数 N 为 6 时, 正交偏振态的耦合效率 P 为 50%; 当扭转周期个数 N 为 12 时, 正交偏振态的耦合效率 P 接近 100%。

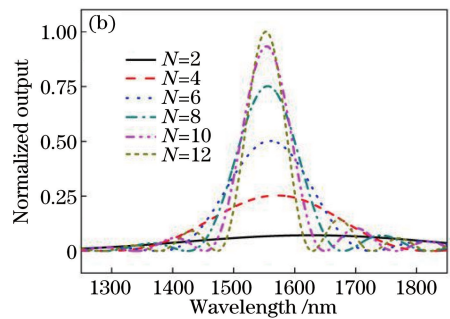
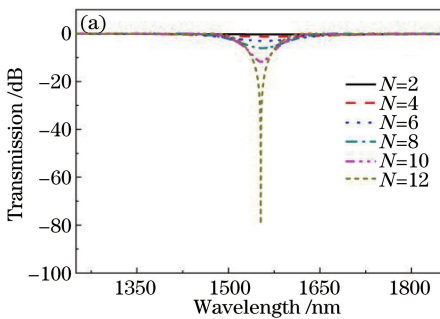


图 7 $\theta_{\text{eff}} = 3.75^\circ, \Lambda = 17.8$ mm 时, PRF 在不同扭转周期个数下的输出光谱特性。(a) 输出光谱; (b) 耦合效率

Fig. 7 Output spectral characteristics of PRF at different numbers of twist period when $\theta_{\text{eff}} = 3.75^\circ$ and $\Lambda = 17.8$ mm. (a) Output spectra; (b) coupling efficiency

保持扭转周期 $\Lambda = 17.8$ mm 和 $4N\theta_{\text{eff}} = \pi$ 不变, 改变 θ_{eff} 和 N , 对器件的输出光谱进行仿真。取扭转

周期个数 N 为 12, 22, 32, 42; 对应有有效扭转角度 θ_{eff} 为 $3.75^\circ, 2.05^\circ, 1.41^\circ, 1.07^\circ$ 。图 8(a) 为不同有效扭转

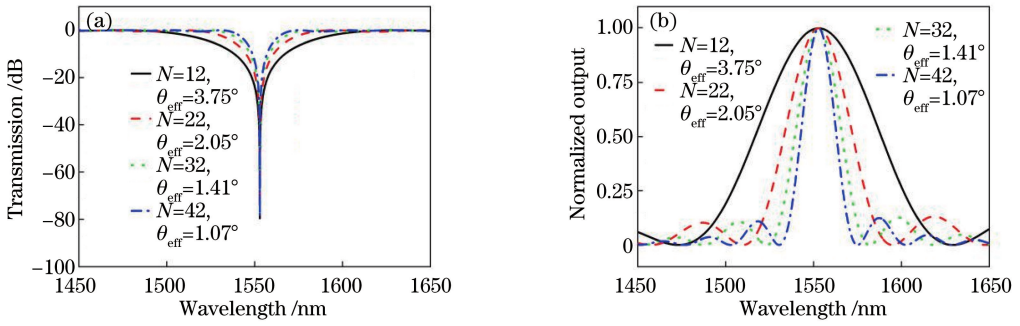


图 8 $\Lambda=17.8$ mm, $4N\theta_{\text{eff}}=\pi$ 时, PRF 在改变扭转周期个数和有效扭转角度下的输出光谱特性。(a) 输出光谱; (b) 耦合效率

Fig. 8 Output spectral characteristics of PRF at different numbers of twist period and twist angle when $\Lambda=17.8$ mm,

$4N\theta_{\text{eff}}=\pi$. (a) Output spectra; (b) coupling efficiency

角度时器件的透射光谱, 图 8(b) 为不同有效扭转角度的正交偏振态的耦合效率。结果表明, 随着扭转角度的减小和扭转周期数的增加, 谐振耦合峰的带宽变小, 更加有利于波长漂移的追踪。由前面的分析可知, 当周期数为 12 时, 耦合效率已接近 100%, 此时有效扭转角度为 3.75° , 为了实验可行性及器件的集成性, 在后续研究中, 设置周期数 N 为 12, 有效扭转角度 θ_{eff} 为 3.75° , 器件的总长度约为 21 cm。

3.3 PM-MOF-RF 的折射率响应仿真结果

为研究 PM-MOF-RF 的微流折射率传感灵敏度, 在 $1.330 \sim 1.336$ 范围内以 0.001 的间隔改变 MOF 空气孔中液体的折射率, 在每一个折射率下进行波长扫描, 得到 7 组 $B(\lambda)$ 色散曲线, 如图 9(a)

和 (b) 所示。采用 3.1 节的方法, 可得微流折射率在 $1.330 \sim 1.336$ 之间变化时 PRF 的透射光谱, 如图 9(c) 所示。追踪图 9(b) 中光谱谐振峰的波长漂移, 得到 PRF 谐振波长随微流折射率的变化曲线, 如图 9(d) 所示, 并对其进行线性拟合, 得到微流折射率灵敏度为 7196.4 nm/RIU, 线性拟合度 R^2 为 0.9995。随着空气孔中微流折射率的增大, MOF 的相模式双折射色散减小, 改变了偏振回旋滤波器的相位匹配条件, 从而使满足相位匹配条件的波长发生变化。通过模拟不同微流折射率填充空气孔时的器件透射光谱, 进一步验证器件的谐振波长会随微流折射率增大而红移, 随微流折射率减小而蓝移。

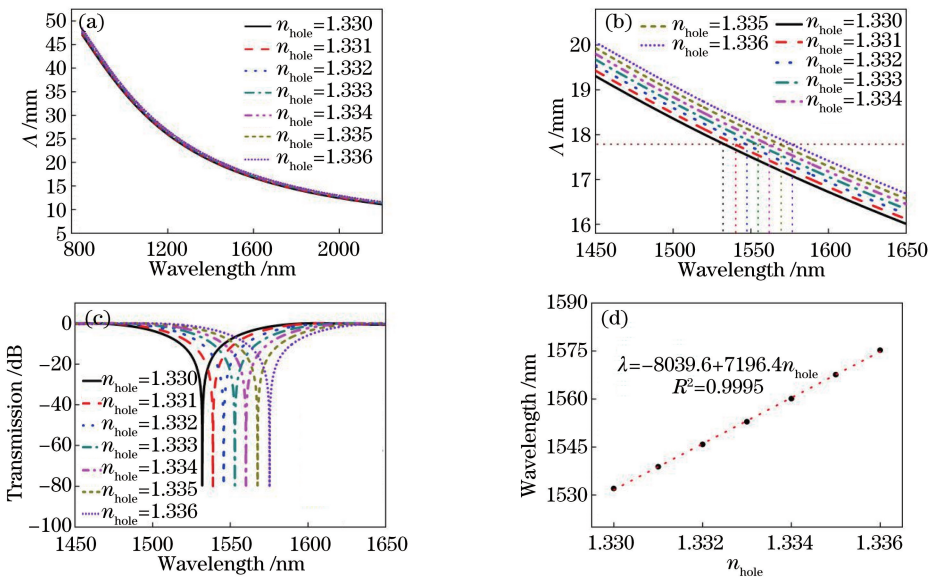


图 9 不同微流折射率下的 PRF 的透射光谱特性。(a)(b) MOF 的模式双折射色散曲线; (c) PRF 的透射光谱;

(d) PRF 谐振波长随微流折射率变化的响应曲线

Fig. 9 Transmission spectra characteristics of PRF for different microfluidic refractive index values. (a) (b) Modal birefringence dispersion of the MOF as a function of wavelength; (c) transmission spectra of PRF; (d) resonant wavelength of the PRF as a function of the microfluidic refractive index value

3.4 微流折射率灵敏度对 MOF 纤芯尺寸的依赖

当 PM-MOF 横截面几何结构发生变化时,其模式双折射特性及模式双折射对微流折射率的变化率都会发生变化,其微流折射率传感灵敏度也会相应地变化。熔融拉锥是改变光纤横截面结构最常见的方式,对于大空气孔 MOF,通过适当地控制拉锥温度,可保持纤芯和空气孔的形状不变而使它们的尺寸按比例缩小,再进行 PM-MOF-RF 器件的刻写,如图 10 所示,其中 α 为光纤尺寸按比例缩小的系数,分别取 0.5~1.0。采用和 3.3 节相同的方法,模拟光纤填充液体后模式双折射变化特性及 PM-MOF-RF 的微流折射率灵敏度。

由图 11 可知,当 MOF 横截面尺寸变小时,纤芯尺寸按比例缩小,MOF 的相模式双折射和群模式双折射都随之增大,MOF 的相模式双折射对微流折射率的变化率也随之增大,最终 PRF 的微流折射率灵敏度也随之增大。当 MOF 横截面缩小一

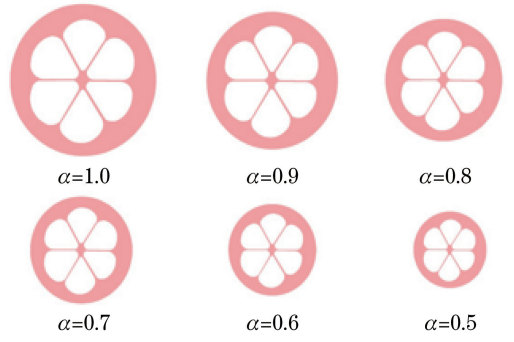


图 10 PM-MOF 横截面尺寸变化示意图

Fig. 10 Resizing of the cross section of PM-MOF

半,即 $\alpha = 0.5$ 时,获得的微流折射率灵敏度高达 16754.0 nm/RIU,此时 MOF 空气孔的径向直径由 24 μm 缩小至 12 μm 。从微流折射率灵敏度随光纤尺寸的变化趋势来看,若 MOF 横截面尺寸进一步缩小,其灵敏度有望进一步提升,未来可根据微流传感的实际应用需求选择合适的 MOF 横截面尺寸。

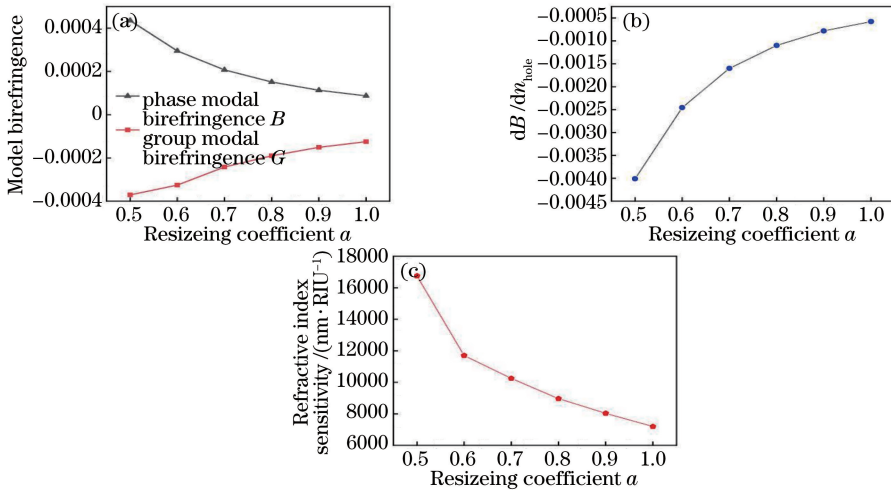


图 11 微流折射率灵敏度随 MOF 纤芯尺寸变化的特性。(a)填充折射率为 1.333 的液体后 PM-MOF 相模式双折射随尺寸变化系数 α 的变化曲线;(b)波长 1550 nm 处 PM-MOF 的相模式双折射对微流折射率的变化随 α 的变化曲线;(c) PRF 微流折射率灵敏度随 α 的变化曲线

Fig. 11 Characteristics of microfluidic refractive index sensitivity as a function of MOF core size. (a) Phase modal birefringence of PM-MOF when liquid refractive index is 1.333 as a function of resizing coefficient α ; (b) variation of phase modal birefringence of MOF with respect to microfluidic refractive index at the wavelength of 1550 nm as a function of α ; (c) optofluidic refractive index sensitivity of the PRF as a function of α

由(4)式可得,该器件的谐振波长需满足相位匹配条件,即 $\lambda/B(\lambda, n_{\text{hole}}) = \Lambda$,对于折射率传感而言,当该器件的扭转周期 Λ 确定后就不会随微流折射率而变,可视为常数,即 $\lambda/B(\lambda, n_{\text{hole}})$ 为常数,该等式两边对 n_{hole} 取导数可得

$$d\left[\frac{\lambda}{B(\lambda, n_{\text{hole}})}\right]/dn_{\text{hole}} = 0, \quad (5)$$

化简得到的微流折射率灵敏度为

$$\frac{d\lambda}{dn_{\text{hole}}} = \frac{\lambda}{B(\lambda, n_{\text{hole}}) - \lambda \cdot \partial B(\lambda, n_{\text{hole}})/\partial \lambda} \cdot \frac{\partial B(\lambda, n_{\text{hole}})}{\partial n_{\text{hole}}}, \quad (6)$$

式中, $B(\lambda, n_{\text{hole}}) - \lambda \cdot \partial B(\lambda, n_{\text{hole}})/\partial \lambda$ 是 MOF 的群模式双折射 G ,由此可知随着纤芯尺寸的变小,其折射率灵敏度变得越来越高。由图 11(a) 和图 11(b) 可知,当纤芯尺寸缩小一半后,即 $\alpha = 0.5$

时,MOF 的群模式双折射 G 由 -1.25×10^{-4} 变至 -3.71×10^{-4} (2.97 倍),MOF 的相模式双折射对微流折射率的变化率 $\partial B(\lambda, n_{\text{hole}})/\partial n_{\text{hole}}$ 由 -5.78×10^{-4} 变至 -40.1×10^{-4} (6.94 倍),对于相同的工作波长 1550 nm,传感器的微流折射率灵敏度由 7196.4 nm/RIU 增大至 16754.0 nm/RIU。

4 结 论

提出一种基于 PM-MOF-RF 的高灵敏度光微流折射率传感器。基于耦合模理论对该器件的透射光谱仿真,结果表明,如果希望微流传感谐振波长位于 1550 nm 波段,那么在制作传感器件(MOF 未填充液体)时,其谐振波长应出现在 950 nm 波段。基于有限元分析方法,模拟不同微流折射率下 MOF 的相双折射色散曲线,进而得到 PRF 随微流折射率变化的光谱响应,并拟合其折射率在 1.333 附近的灵敏度,灵敏度高达 7196.4 nm/RIU,且线性拟合度为 0.9995。此外,当缩小 MOF 横截面尺寸时,其微流折射率灵敏度可提高至 16754.0 nm/RIU。因此这一新型全光纤高灵敏度光微流折射率传感器在免标记生化传感领域将有良好的发展前景。

参 考 文 献

[1] Borisov S M, Wolfbeis O S. Optical biosensors[J]. Chemical Reviews, 2008, 108(2): 423-461.

[2] McDonagh C, Burke C S, MacCraith B D. Optical chemical sensors[J]. Chemical Reviews, 2008, 108(2): 400-422.

[3] Whitesides G M. The origins and the future of microfluidics[J]. Nature, 2006, 442(7101): 368-373.

[4] Psaltis D, Quake S R, Yang C. Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics [J]. Nature, 2006, 442(7101): 381-386.

[5] Monat C, Domachuk P, Eggleton B J. Integrated optofluidics: a new river of light [J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 106-114.

[6] Fan X D, White I M. Optofluidic microsystems for chemical and biological analysis [J]. Nature Photonics, 2011, 5(10): 591-597.

[7] Russell P. Photonic crystal fibers[J]. Science, 2003, 299(5605): 358-362.

[8] Fini J M. Microstructure fibres for optical sensing in gases and liquids [J]. Measurement Science and Technology, 2004, 15(6): 1120-1128.

[9] Eggleton B, Kerbage C, Westbrook P, *et al.* Microstructured optical fiber devices [J]. Optics Express, 2001, 9(13): 698-713.

[10] Calcerrada M, García-Ruiz C, González-Herráez M. Chemical and biochemical sensing applications of microstructured optical fiber-based systems [J]. Laser & Photonics Reviews, 2015, 9(6): 604-627.

[11] Ritari T, Tuominen J, Ludvigsen H, *et al.* Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers[J]. Optics Express, 2004, 12(17): 4080-4087.

[12] Yang X H, Zheng Y, Luo S Z, *et al.* Microfluidic in-fiber oxygen sensor derives from a capillary optical fiber with a ring-shaped waveguide [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 182: 571-575.

[13] Yang X H, Yuan T T, Teng P P, *et al.* An in-fiber integrated optofluidic device based on an optical fiber with an inner core[J]. Lab on a Chip, 2014, 14(12): 2090-2095.

[14] Phan Huy M C, Laffont G, Dewynter V, *et al.* Three-hole microstructured optical fiber for efficient fiber Bragg grating refractometer[J]. Optics Letters, 2007, 32(16): 2390-2392.

[15] Zhang A P, Yan G F, Gao S R, *et al.* Microfluidic refractive-index sensors based on small-hole microstructured optical fiber Bragg gratings [J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(22): 221109.

[16] Rindorf L, Bang O. Highly sensitive refractometer with a photonic-crystal-fiber long-period grating[J]. Optics Letters, 2008, 33(6): 563-565.

[17] Wu D K C, Kuhlmeier B T, Eggleton B J. Ultrasensitive photonic crystal fiber refractive index sensor[J]. Optics Letters, 2009, 34(3): 322-324.

[18] Villatoro J, Kreuzer M P, Jha R, *et al.* Photonic crystal fiber interferometer for chemical vapor detection with high sensitivity [J]. Optics Express, 2009, 17(3): 1447-1453.

[19] Zhang N, Humbert G, Wu Z F, *et al.* In-line optofluidic refractive index sensing in a side-channel photonic crystal fiber[J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27674-27682.

[20] Wu C, Tse M L V, Liu Z Y, *et al.* In-line microfluidic refractometer based on C-shaped fiber assisted photonic crystal fiber Sagnac interferometer [J]. Optics Letters, 2013, 38(17): 3283-3286.

[21] Wu C, Tse M L V, Liu Z Y, *et al.* In-line microfluidic integration of photonic crystal fibres as a highly sensitive refractometer [J]. The Analyst,

- 2014, 139(21): 5422-5429.
- [22] Liu Z Y, Wu C, Tse M L V, *et al.* Fabrication, characterization, and sensing applications of a high-birefringence suspended-core fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(11): 2113-2122.
- [23] Šolc I. Birefringent chain filters [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, 55(6): 621-625.
- [24] Stolen R H, Ashkin A, Pleibel W, *et al.* In-line fiber-polarization-rocking rotator and filter [J]. *Optics Letters*, 1984, 9(7): 300-302.
- [25] Kakarantzas G, Ortigosa-Blanch A, Birks T A, *et al.* Structural rocking filters in highly birefringent photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(3): 158-160.