

保偏微纳光纤倏逝场传感器

李杰 李蒙蒙 孙立朋 范鹏程 冉洋 金龙 关柏鸥

Polarization-maintaining microfiber-based evanescent-wave sensors

Li Jie Li Meng-Meng Sun Li-Peng Fan Peng-Cheng Ran Yang Jin Long Guan Bai-Ou

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 074209 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.074209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

锥柱型光纤探针在表面增强拉曼散射方面的应用

[Application of cone-cylinder combined fiber probe to surface enhanced Raman scattering](#)

物理学报.2017, 66(4): 044208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.044208>

环绕空气孔结构的双模大模场面积多芯光纤的特性分析

[Dual-mode large-mode-area multi-core fiber with circularly arranged airhole cores](#)

物理学报.2017, 66(2): 024210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.024210>

基于色散效应的光纤光栅高速高精度解调方法研究

[High speed and high precision demodulation method of fiber grating based on dispersion effect](#)

物理学报.2017, 66(1): 014206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.014206>

基于偏振延时干涉技术的光子波形产生技术研究

[Photonic microwave waveform generation based on polarization delay interference](#)

物理学报.2016, 65(22): 224203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.224203>

少模光纤的弯曲损耗研究

[Study on bending losses of few-mode optical fibers](#)

物理学报.2016, 65(6): 064208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064208>

专题: 光纤传感

保偏微纳光纤倏逝场传感器*

李杰 李蒙蒙 孙立朋 范鹏程 冉洋 金龙 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, 广州 510632)

(2017年1月16日收到; 2017年3月16日收到修改稿)

近年来, 保偏微纳光纤以其高双折射特性和强倏逝场效应引起了研究者的关注. 本文从保偏微纳光纤的结构类型、制备方法和模式双折射特性等出发, 介绍了目前不同类型保偏微纳光纤倏逝场传感器的构造特征与实现方法, 利用保偏微纳光纤在两个垂直偏振方向的倏逝场对外界的不同响应, 可制成偏振相关的干涉型或光栅型等传感器件. 本文探究了包括超高折射率灵敏度特性和温度不敏感特性等的内在产生机理, 并考察了保偏微纳光纤倏逝场传感器在折射率、湿度、磁场和特异性DNA分子探测等方面的应用, 其结果对微纳光纤及其传感器的研究和应用具有重要的意义.

关键词: 微纳光纤, 高双折射, 强倏逝场效应, 折射率传感

PACS: 42.81.-i, 42.81.Gs, 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.66.074209

1 引言

微纳光纤是尺寸为微米或纳米量级光纤的统称, 不同于传统光纤, 微纳光纤拥有很高的倏逝场效应, 可与外界直接形成强相互作用^[1-3]. 此外微纳光纤还具有良好的导光性、可弯曲特性、特殊色散效应以及高非线性等一系列优点, 引起了研究者的兴趣, 至今已开发出包括微环/螺旋微纳光纤谐振腔^[4-6]、布拉格^[7]或长周期^[8,9]微纳光纤光栅、干涉仪^[10,11]和耦合器等^[12]各种微型的光子器件, 在高灵敏度生化传感^[4-12]、荧光探测^[13]、原子俘获与引导^[14]、高非线性^[15]以及激光发射^[16,17]等领域表现出非常重要的应用价值.

保偏微纳光纤是一种特殊的微纳光纤, 是在传统保偏光纤和微纳光纤的研究基础上发展出来的, 不同于以往的传统保偏光纤^[18,19]和光子晶体光纤^[20,21], 具有独特的双折射(色散)效应和大倏逝场效应等, 它的出现为新型光纤器件的研发和传感器的应用提供了新的方法和实现手段. 例如, 利

用保偏微纳光纤在不同偏振态的倏逝场效应和它们对周围介质折射率的不同响应, 可制成高灵敏度的倏逝场传感器^[22,23], 在生化传感和医药研发等领域发挥重要作用.

近年来, 研究者在保偏微纳光纤及倏逝场传感器方面做出了许多研究成果, 本文围绕该种传感器的研究现状和发展趋势, 分别介绍了保偏微纳光纤器件的结构类型、制作方法和模式双折射等, 阐述了其倏逝场传感器的构造特征和实现原理等, 并探讨了其在折射率、湿度、磁场和特异性DNA分子探测等方面的应用.

2 保偏微纳光纤的结构类型、制备方法 与模式双折射等特征

图1(a)–(d)所示为几种典型的保偏微纳光纤的结构. 图1(a)是将传统熊猫保偏光纤通过熔融拉锥的方法制作的保偏微纳光纤^[24-26], 熔融拉锥法是制作微纳光纤的常用方法, 即采用氢氧焰、激光或电弧放电等加热方式将光纤加热至熔融状态

* 国家杰出青年科学基金(批准号: 61225023)、国家自然科学基金(批准号: 61575083, 61235005)和广东省自然科学基金(批准号: 2014A030313364)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tguanbo@jnu.edu.cn

同时将其拉伸, 通过控制加热温度和拉伸速度等参数可获得所需要的光纤形状和尺寸. 实验证明^[24], 保偏光纤在熔融拉锥过程中光纤内结构形状和内应力产生的快慢轴方向基本保持不变, 若当光纤尺寸拉细至 $1\ \mu\text{m}$ 时, 其两个主轴方向的偏振光发生串扰的消光比可达 16 dB, 其传输损耗仅为 0.2 dB, 该方法可进一步推广到其他类型的内应力偏振光纤. 图 1(b) 是包层为矩形的光纤经熔融拉锥方法制成的横截面呈二维对称结构的保偏微纳光纤^[22]. 如图所示, 光纤初始的矩形边长分别为 $113\ \mu\text{m}$ 和 $70\ \mu\text{m}$, 纤芯为圆形且尺寸为 $6\ \mu\text{m}$, 通过优化熔融拉锥的工艺参数, 可使光纤的横截面形状基本不变, 随着光纤尺寸的变细, 传导模式由最初在纤芯中传输逐渐过渡到在包层中传输, 并产生了较强的双折射效应. 实验中, 将光纤长边的尺寸拉细至 $a \sim 3\ \mu\text{m}$, 利用拉细的保偏微纳光纤制作 Sagnac 环偏振干涉仪, 干涉消光比可达 20 dB^[22]. 在另外一个实验中, Jung 等^[27] 通过将熔融拉锥扁平型的光纤至约 $1\ \mu\text{m}$ 附近, 在波长为 1550 nm 处获得的双折射大小为 5.3×10^{-3} .

如图 1(c) 所示为利用氢氟酸化学腐蚀的办法制作保偏微纳光纤的例子. 氢氟酸溶液能够与石英光纤材料发生化学反应, 生成易溶于水的物质, 从而可有效降低光纤的尺寸. 在图 1(c) 中, 光纤被放置于氢氟酸液滴中, 液滴容积约为 $100\ \mu\text{L}$, 通过改变光纤与氢氟酸液滴的接触状态, 利用液体的表面张力, 形成对光纤的不对称腐蚀, 最终得到横截面为“水滴”形的微纳光纤^[28]. 实验过程中通过调节光纤的浸泡深度和氢氟酸溶液的浓度来控制光纤

的横截面形状, 而光纤锥区长度的控制通过改变液滴的尺寸等来实现. 如图所示, 采用该方法制备的尺寸为 $2\ \mu\text{m}$ 的“水滴”形微纳光纤, 其双折射大小可为 0.017, 而传输损耗低于 0.7 dB^[28].

图 1(d) 为椭圆形保偏微纳光纤, 采用 CO_2 脉冲激光扫描加工的方式, 将标准单模光纤加工成横截面为椭圆形结构, 再经熔融拉锥的方式获得微纳尺寸的光纤结构, 通过控制加工工艺条件可优化微纳光纤横截面椭圆形状和尺寸等. 实验结果显示, 当椭圆微纳光纤的长轴尺寸为 $3.09\ \mu\text{m}$ 和椭圆度为 2.27 时, 获得的双折射达 0.021^[23]. 这种方法需要预先对标准光纤进行预加工并与熔融拉锥相结合, 具有很强的结构设计灵活性, 无需选取特殊结构的光纤, 因此也具有更大的适用性. 除了 CO_2 激光加工, Xuan 等^[29] 提出将单模光纤用飞秒激光“切削”的方式, 去除包层对称的两边, 经熔融拉锥获得横截面为类椭圆形的保偏微纳光纤, 测得的双折射达到 10^{-2} 量级; Beltrán-Mejía 等^[30] 通过将单模光纤侧边抛磨等方式, 获得一种 D 型保偏微纳光纤.

此外, Kou 等^[31] 和 Zhang 等^[32,33] 还分别提出通过构建沟槽光纤和低折射率椭圆芯的微纳光纤, 利用光场在光纤低折射率区的增强或削弱获得高双折射效应, 然而由于制作条件的局限, 目前此类器件仍仅处于理论研究的阶段.

分析表明, 大多数保偏微纳光纤是通过改变光纤截面结构来产生较高的模式双折射效应, 而相较于传统保偏光纤, 微纳光纤具有较大的双折射效应及特殊色散特性. 以椭圆微纳光纤为例, 当微纳光纤随着尺寸减小时, 其传输光场逐渐从纤

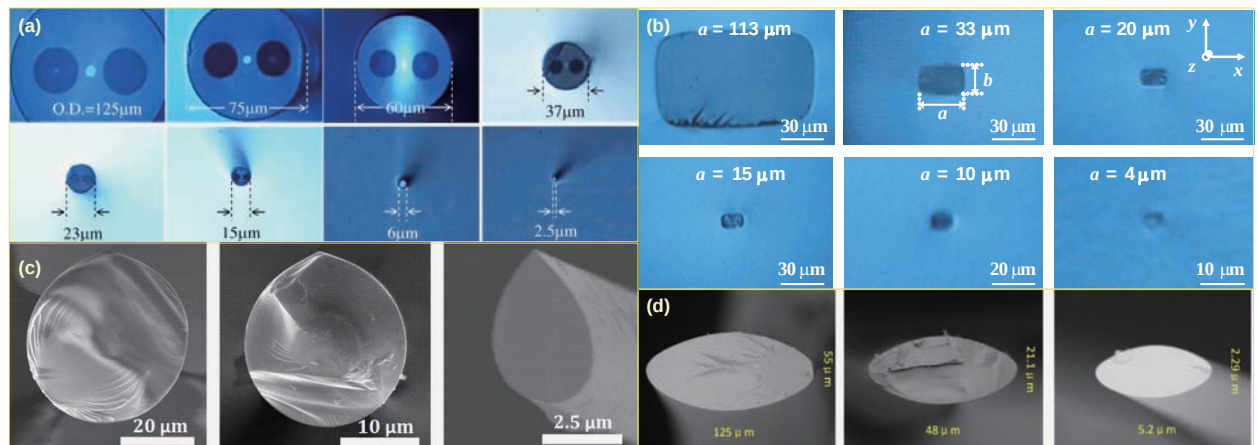


图 1 (a) 熊猫型保偏微纳光纤^[24]; (b) 矩形微纳光纤^[22]; (c) “水滴”形微纳光纤^[28]; (d) 椭圆形微纳光纤
Fig. 1. (a) Panda-polarization maintaining optical microfiber^[24]; (b) rectangular microfiber^[22]; (c) droplet-shape microfiber^[28]; (d) elliptical microfiber.

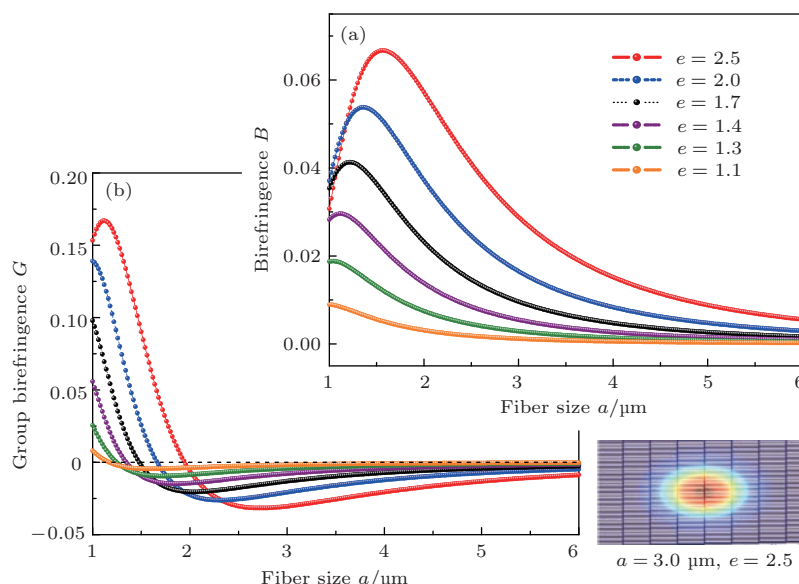


图2 理论计算的椭圆形微纳光纤 (a) 双折射 B 和 (b) 群双折射 G 分别与光纤尺寸 a 及横截面椭圆度 e 的变化关系, 内插图为基础模的模场分布图

Fig. 2. (a) Birefringence B and (b) group birefringence G as functions of fiber size a at different ellipticities e for elliptical microfibers in air. Inset is the field profile of the fundamental mode.

芯扩散到包层, 类似于一般微纳光纤, 当光纤尺寸满足一定的缓变条件时, 光从纤芯模式逐渐耦合到微纳光纤的基模, 耦合效率几乎可达到100%^[1-3]. 此时, 原有的光纤包层构成了新的“纤芯”, 而外界空气则构成了新的“包层”, “纤芯”与“包层”折射率差高达0.45, 微纳光纤由于结构非对称性造成的双折射效应得到大幅提高. 保偏微纳光纤的模式双折射 B 和群双折射 G 分别表示为

$$B = |n_{\text{eff}}^x - n_{\text{eff}}^y|, \quad G = B - \lambda \cdot \partial B / \partial \lambda, \quad (1)$$

其中, n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别为两个主轴方向的有效折射率, λ 为光波长. 群双折射 G 的大小主要与光纤偏振色散有关. 可采用矢量有限元法分别计算不同微纳光纤尺寸和椭圆度下的模式双折射和群双折射大小等. 建立物理模型如下: 定义光纤的原有的纤芯和包层的折射率梯度为0.004, 尺寸比例为8.5/125, 光波长为 $\lambda = 1550$ nm, 保偏微纳光纤的椭圆率 e ($e = a/b$, 其中, a 和 b 分别为椭圆的长轴和短轴尺寸) 和尺寸 a 的变化范围分别为 $[1.1, 2.5]$ 和 $[1 \mu\text{m}, 6 \mu\text{m}]$, 计算结果如图2所示, 其中, 内插图为椭圆微纳光纤基模的模场分布图, 模场沿光纤的横截面形状分布. 由图2(a)可知, 随着光纤尺寸的逐渐减小, 其双折射 B 首先增大, 这是因为随着光纤尺寸变小, 双折射效应逐渐变得明显; 而其双折射大小在某个尺寸下达到最大值, 其后逐渐减小, 这是因为当微纳光纤尺寸太小时, 大部分模场能量分布于光纤外侧, 其结构不对称造成的双折射

效应下降. 由图可知, 双折射最大值和它对应的光纤尺寸均随着光纤椭圆度的增大而增大. 例如当 $e = 2.5$ 时, 双折射最大值为 $B_{\text{max}} = 0.067$, 对应的光纤尺寸为 $a = 0.56 \mu\text{m}$. 由图2(b)可知, 光纤群双折射 G 在光纤尺寸较大时为负值, 随着尺寸的减小逐渐过渡为正值, 群双折射的零值点出现的位置与微纳光纤的椭圆度有关, 较大的椭圆度对应的零值点 a 较大. 上述结果虽然是计算椭圆微纳光纤时得到的, 却同时反映了保偏微纳光纤的普遍共性. 人们利用保偏微纳光纤的大双折射效应和强倏逝场作用, 开发出了多种光纤传感器件, 用于生物量以及磁场等参量的传感测量之中.

3 保偏微纳光纤倏逝场传感器类型、原理及应用

3.1 超高灵敏度的偏振干涉型倏逝场传感器^[22,23]

如果将保偏微纳光纤直接熔接到由3 dB 光纤耦合器和其他单模光纤构成的光纤 Sagnac 环形镜中, 即构成偏振干涉的倏逝场传感器. 如图3(a)所示, 我们报道了采用矩形微纳光纤构成的该类传感器^[22], 宽带光源出射的光经耦合器进入 Sagnac 环中, 偏振控制器起到调节偏振态的作用, 经偏振控制器后光的快慢轴发生转换, 当两个不同偏振方向的光在耦合器处重新交汇后, 形成偏振相位

差, 通过输出端的光谱分析仪 (OSA) 测得干涉光谱. 与之类似的结构是采用将两个起偏器和保偏微纳光纤熔接构成的偏振干涉结构, 但传输损耗较大. 图 3 (b) 为 Sagnac 环偏振干涉仪产生的透射光谱, 通过调节偏振控制器可使干涉仪消光比达 20

dB 以上, 干涉条纹的间距由保偏微纳光纤的双折射大小和干涉长度等共同决定. 经比较发现, 若将保偏微纳光纤由空气中移至水中, 干涉条纹间距将会变大, 在 1450 nm 附近的损耗主要是由水的吸收引起的 [22].

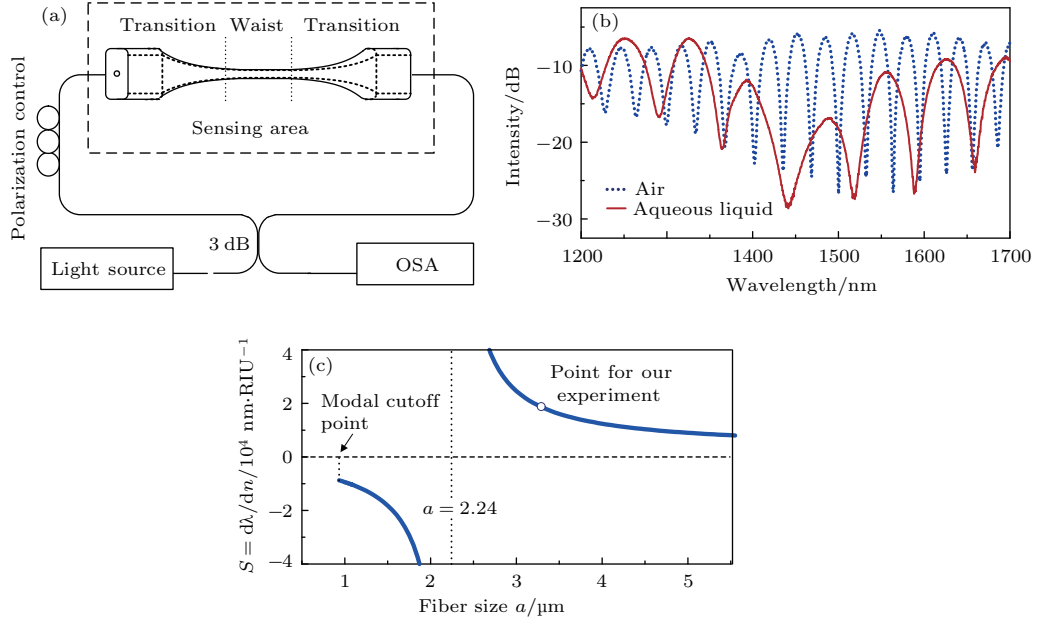


图 3 (a) 基于矩形微纳光纤的偏振干涉型传感器示意图; (b) 矩形微纳光纤分别在空气中和水中的干涉光谱图; (c) 理论计算所得的折射率灵敏度随微纳光纤尺寸 a 的变化关系, 波长为 1550 nm, 其中圆点为实验测得的结果 [22]

Fig. 3. (a) Schematic of the refractive index sensor based on our rectangular microfiber; (b) typical transmission spectra for the microfiber placed in air and aqueous liquid, respectively; (c) modeled sensitivity as a function of the fiber size a at 1550 nm. The measured point for our experiment is marked [22].

在上述偏振干涉中, 干涉条纹的相位差表达式为

$$\Phi = (2\pi/\lambda) BL, \quad (2)$$

其中, L 为光的干涉长度, 光谱透过率为 $T = \sin^2(\Phi/2)$. 需要说明的是, 由于光纤锥形过渡区的双折射较小, 相位差主要由微纳尺度的光纤所提供. 此时, 当外界折射率发生改变时, 基于不同偏振方向的倏逝场效应, 模式有效折射率发生不同程度的变化, 从而改变了双折射的大小并进而使干涉光谱发生漂移. 将方程 (2) 进行数学上的微分, 并假定相位差 Φ 保持不变, 即可得到灵敏度公式:

$$S = \frac{d\lambda}{dn} = \frac{\lambda \cdot \partial B / \partial n}{B - \lambda \cdot \partial B / \partial \lambda} = \frac{\lambda}{G} \frac{\partial B}{\partial n}, \quad (3)$$

其中, n 为外界折射率. 由 (3) 式可知, 保偏微纳光纤传感器的折射率灵敏度主要由工作波长 λ 、外界折射率诱导的双折射变化 $\partial B / \partial n$ 和群双折射 G 共同决定. 在 (3) 式中, 一般情况下, 双折射大小随外界折射率的升高而降低, 即 $\partial B / \partial n < 0$, 因此折射

率灵敏度 S 的符号由群双折射 G 决定, 当 $G > 0$ 时, S 为正数, 光谱随折射率增大而红移, 反之 S 为负数, 光谱蓝移. 研究表明, 群双折射主要与微纳光纤的形状与尺寸 (如图 2 所示) 以及光波长等密切相关, 通过调节保偏微纳光纤的结构参数, 可实现对传感器灵敏度的优化. 特别地, 当 $G \rightarrow 0$ 时, 其折射率灵敏度将得到极大提升.

在实验中, 采用矩形微纳光纤的尺寸为 $3.29 \mu\text{m}$, 长宽比为 1.50, 测得的折射率灵敏度高达 18987 nm/RIU (RIU: 单位折射率大小) [22]. 图 3 (c) 记录了在波长为 1550 nm 和折射率为 1.33 附近时, 折射率灵敏度与光纤尺寸的对应关系, 折射率最大值出现于 $a \sim 2.24 \mu\text{m}$, 实验与理论结果相一致 [22].

进一步, 我们实验室通过 CO_2 激光加工与熔融拉锥相结合的方法制作了椭圆形保偏微纳光纤, 大大克服了光纤结构的局限, 提高了光纤设计的自由度和灵活性, 从而从改善光纤结构方面实现了对传感器的优化 [23]. 如图 4 (a) 所示为我们实验室所

测得的椭圆光纤度随 CO_2 激光出射功率的变化关系, 采用的二氧化碳激光器型号为 SYNRAD 48-5, 输出功率最大为 50 W, 激光扫描速度为 300 mm/s, 重复频率为 5 kHz. 由图可知, 随激光功率改变, 光纤椭圆度实现了从 1.0 至 2.5 的连续调节. 我们随后利用椭圆形微纳光纤制作了 Sagnac 环偏振干涉型倏逝场传感器, 并测量了透射光谱随外界折射率的变化关系, 如图 4(b) 和图 4(c) 所示, 实验选用的光纤参数分别为: Microfiber A: $a = 4.49 \mu\text{m}$, $e = 2.27$, $L = 8 \text{ mm}$; Microfiber B: $a = 3.84 \mu\text{m}$, $e = 2.5$, $L = 9.4 \text{ mm}$. 分析测试结果可知, 通过

优化保偏微纳光纤的横截面椭圆度和尺寸等参数, 可使其传感器灵敏度性能得到极大提升, 实验获得的灵敏度接近 $2.0 \times 10^5 \text{ nm/RIU}$, 为目前所测得的最大值 [23]. 另外, 还通过调节光纤参数, 观察到了光谱随折射率增大而发生蓝移的情况, 实验与理论结果相一致, 发生蓝移光谱的灵敏度达 -91244 nm/RIU [23]. 另外, Jin 等 [34] 利用飞秒激光“切削”和熔融拉锥结合的方式制作的保偏微纳光纤, 构成 Sagnac 环偏振干涉型传感器, 测得的灵敏度约为 20788 nm/RIU , 结构设计具有较大的灵活性.

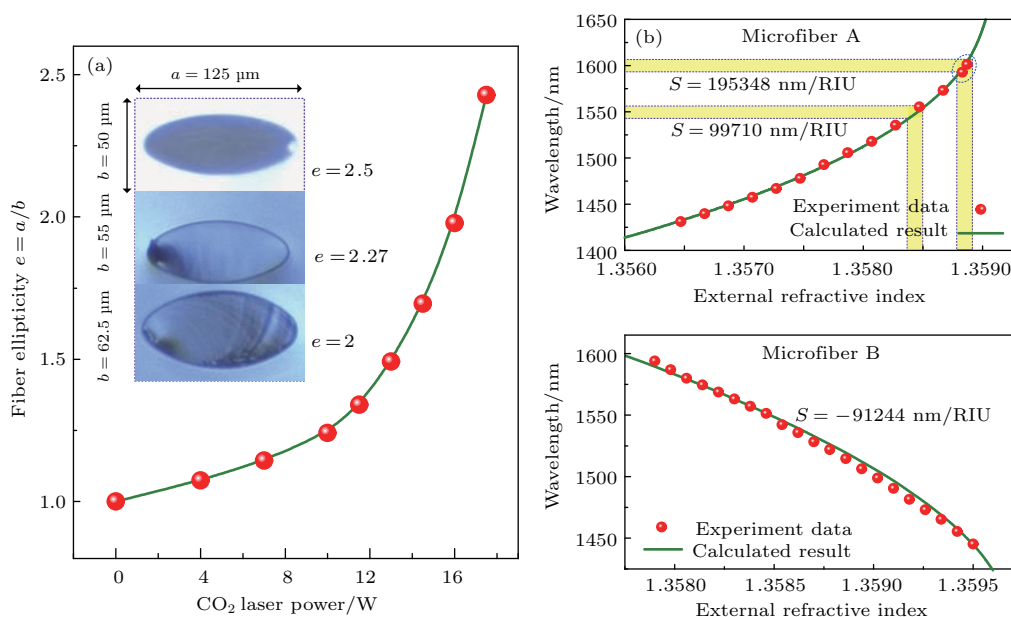


图 4 (a) 光纤椭圆度随 CO_2 激光加工功率的变化关系; (b) 两种不同椭圆微纳光纤传感器的透射光谱随外界折射率的变化关系 [23]

Fig. 4. (a) Ellipticity of the fiber as a function of the CO_2 -laser power; (b) interferometric wavelengths as functions of external refractive index for microfibers A and B, respectively [23].

3.2 灵敏度增强的保偏微纳光纤倏逝场传感器 [35]

为了产生较高的传感器灵敏度, 往往需要使用具有较小尺寸的光纤, 然而太小的光纤尺寸又容易造成较大的损耗, 且由于光纤易断, 给操作带来了诸多不便, 为此, 我们提出通过在干涉臂中插入一段保偏光纤作为参考光纤, 以实现传感器的增敏 [35].

在实验中, 如图 5 所示, 我们在保偏微纳光纤传感器的基础上插入了一段领结型保偏光纤, 而传感信号的采集仍由保偏微纳光纤完成, 其中偏振控制器 PC_1 用来调节干涉条纹可见度, 偏振控制器 PC_2 用来调节两根保偏光纤快慢轴的相对角度, 使

其“平行”或“垂直”, 它和领结保偏光纤一起起到调节灵敏度的作用. 假设 B' 和 L' 分别为传统保偏光纤的双折射大小和光纤长度, 产生干涉光谱的相位差则为 $\Phi = (2\pi/\lambda)(BL \pm B'L')$, 其中, “+”和“-”分别对应两根保偏光纤的快慢轴相互平行或垂直的情况. 通过对上式进行微分且假定相位差 Φ 保持不变, 可获得折射率灵敏度的表达式为 [35]

$$S = \frac{d\lambda}{dn} = \frac{\lambda}{G \pm G'(L'/L)} \frac{\partial B}{\partial n}, \quad (4)$$

其中, G' 表示参考保偏光纤的群双折射. 由 (4) 式可知, 通过选取微纳光纤和参考光纤的相对群双折射大小, 或通过调节两条保偏光纤的相对长度大小, 可使 $G \pm G'(L'/L)$ 趋近于零, 从而使感测灵敏度 S 大幅增强. 在实验中, 我们通过调节领结型

光纤的长度和快慢轴旋转角度,使保偏微纳光纤传感器灵敏度在原来的基础上提高了五倍,达到 $34772 \text{ nm}/\text{RIU}$ [35].

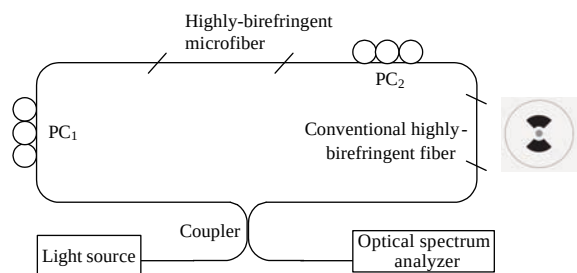


图5 灵敏度增强的保偏微纳光纤倏逝场传感器

Fig. 5. Sensitivity-enhanced refractive index sensor utilizing polarization-maintaining microfiber. The conventional bow-tie fiber is used as a reference.

3.3 基于自耦合的保偏微纳光纤Sagnac环传感器 [36]

保偏微纳光纤同时拥有大双折射特性和良好的机械可弯曲性能,特别适用于制作微小型光子器件,如图6(a)所示,我们利用保偏微纳光纤构成了高度集成的Sagnac环偏振干涉仪型传感器.我们选用尺寸仅为几个微米的矩形微纳光纤,通过扭转的方式使其自相缠绕形成耦合区,光模式通过近场相互作用发生耦合,而未缠绕部分则构成了微纳光纤环.当入射光进入光纤环之后,不同偏振态的光在环内传输时累积足够的相位差,再次经过耦合区发生光纤之间和偏振态之间的相互耦合,从而在输出端可测得偏振干涉光谱.通过改变扭转角度可以调节光纤耦合区的长度,如图6(a)中的内插图为实际制作的干涉仪实物图,图6(b)为实验测得的干涉光谱随着扭转角度的变化关系图,通过调整扭转角度可使干涉光谱的消光比达 20 dB 以上 [36].

我们测量了该传感器的折射率灵敏度特性,将制作的保偏微纳光纤Sagnac环置于待测溶液中,选取的微纳光纤尺寸为 $3.65 \mu\text{m}$, 光纤环直径为 4.3 mm , 测得干涉光谱随溶液折射率的变化迅速发生漂移,在折射率为 1.355 至 1.3586 范围内,测得的灵敏度为 $24373 \text{ nm}/\text{RIU}$ [36]. 同时,温度灵敏度仅约为 $5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,这是由于微纳光纤尺寸较小,不同偏振态模场的主要集中分布于光纤的石英材料区,具有较低的温度响应 [36]. 该器件具有较高的集成度,即采用自耦合的微纳光纤取代了传统光纤 3 dB 耦合器及偏振控制器等,大幅缩减了结构的尺

寸,适用于制作生化传感器和可调谐滤波器等微型光器件.

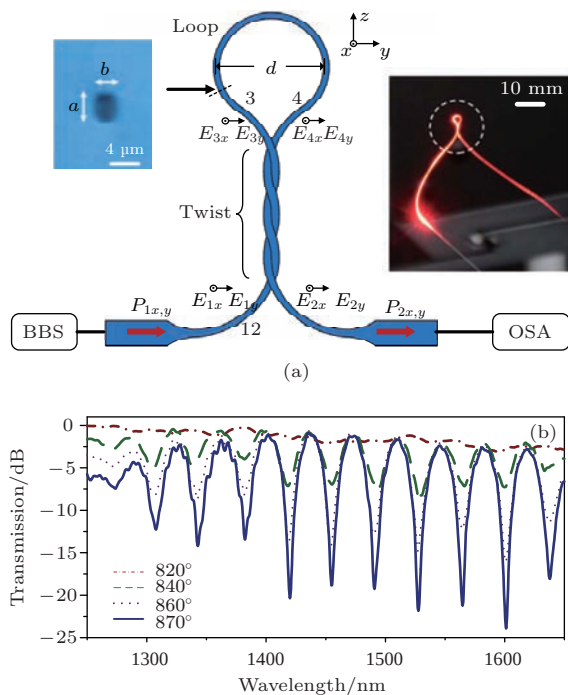


图6 (a) 基于自耦合的保偏微纳光纤Sagnac环干涉型传感器的示意图和实物照片; (b) 干涉光谱随光纤扭转角度的变化关系 [36]

Fig. 6. (a) Schematic of the miniature highly-birefringent microfiber loop interferometer-based sensor. The cross-sectional fiber view and the photograph of a fabricated structure are also provided as insets; (b) transmission spectra in respect of the turn angle [36].

3.4 基于保偏微纳光纤布拉格光栅的温度不敏感折射率传感器 [37]

温度是常见的环境参量,在实际应用中,当外界折射率或其他生物化学量等发生变化时常常伴随着温度的改变,因此传感器对温度的响应可能使其对其他参量的测量结果造成串扰,我们提出了利用保偏微纳光纤的不同偏振光对外界的不同响应特性来消除串扰的方法.如图7所示,我们采用波长为 193 nm 的ArF准分子激光器作为刻写光源,将紫外刻写法和相位模版法相结合,成功地在矩形微纳光纤上写入了布拉格光栅 [37]. 图中列举了几个不同光纤尺寸的布拉格反射谱,光栅周期约为 536.91 nm ,其中不同的反射峰,分别对应矩形微纳光纤的不同偏振态,反射峰的间距与双折射大小有关.如图所示,当矩形微纳光纤尺寸为 4.8 , 4.1 和 $3.5 \mu\text{m}$ 时,产生的反射峰间距分别为 1.84 , 2.58 和

4.38 nm, 这是因为随着光纤尺寸的减小, 光纤双折射增大的结果.

我们随后检测了矩形微纳光纤光栅在水溶液中的折射率响应特性, 发现随着折射率增大, 两个偏振态对应的光谱均发生红移, 但其反射峰间距逐渐变小, 选用的微纳光纤尺寸为 $4.8\ \mu\text{m}$, 可测得在折射率为 1.36 附近, 光纤快慢轴对应的波长灵敏度分别为 $45.1\ \text{nm}/\text{RIU}$ 和 $39.5\ \text{nm}/\text{RIU}$, 反射峰间距变化的灵敏度则为 $-5.6\ \text{nm}/\text{RIU}$; 同时, 当温度改变时, 两个偏振态对应光谱的响应度基本相同, 均约为 $12.01\ \text{pm}/^\circ\text{C}$, 这是由于不同偏振态的模式场均主要分布于微纳光纤石英材料区, 分布特性大体相同. 因此, 通过检测反射峰间距的变化, 温度变化引起的串扰得到了抑制 [37].

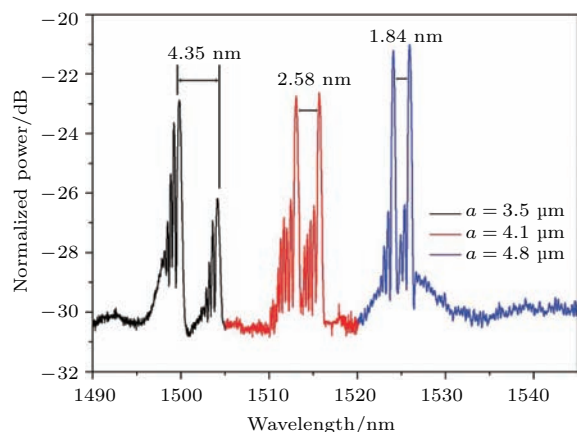


图7 几种不同矩形微纳光纤尺寸对应的布拉格光栅反射光谱 [37]

Fig. 7. Reflection spectra of the mFBGs in rectangular microfibers with different fiber sizes [37].

3.5 保偏微纳光纤湿度传感器 [38]

相对湿度检测在环境监测、化学工程、食品安全以及半导体工业等领域都有着重要意义. 传统的光纤湿度传感器往往受到自身条件局限, 需要修饰化学功能膜以提高其传感灵敏度, 而基于保偏微纳光纤的传感器则不受限于这一点, 即不需要进行器件表面修饰仍可获得较高的湿度灵敏度, 因而也具有较高的响应速度. 我们实验室利用椭圆微纳光纤偏振干涉仪构成了湿度传感器 [38], 湿度的改变伴随了光纤材料与水分子作用的过程, 我们在 30%RH 到 90%RH 湿度变化范围内, 测得的相对湿度灵敏度可达 $201.25\ \text{pm}/\% \text{RH}$; 并通过在光纤环中串联熊猫保偏光纤的办法实现了器件的增敏, 使湿度感测敏感性可进一步提高至 $422.2\ \text{pm}/\% \text{RH}$.

实验测得传感器响应速度优于 60 ms, 优于以往报道的结果 [38].

3.6 保偏微纳光纤磁场传感器 [39]

光纤磁场传感器在科研、生产和生活当中有着广泛的应用前景, 可被用于探测磁场变化或传递与磁场有关的其他信息, 由于光纤器件具有体积小、传输距离远和复用性好等优点, 将光纤与磁液相结合是构成磁场传感器的有效手段之一. 其中磁液是一种新型的纳米功能材料, 主要由四氧化三铁纳米颗粒和溶剂等构成, 当外界磁场发生变化时, 纳米颗粒可能发生团簇等形态变化, 从而引起溶液折射率发生相关改变, 通过检测这种改变可实现对外界磁场的测量. 结合保偏微纳光纤倏逝场传感器的特点, 我们将矩形保偏微纳光纤与磁液通过玻璃毛细管进行封装, 封装后的示意图如图 8 所示, 我们随后将经封装的装置插入到 Sagnac 环偏振干涉仪中进行磁场测量. 采用的微纳光纤尺寸为 $10.5\ \mu\text{m}$, 长度约为 2.1 mm, 实验测得当磁场强度从 0 到 85 Oe 变化时, 干涉光谱随磁场变化的灵敏度约为 $-98\ \text{pm}/\text{Oe}$; 当磁场强度继续增大到一定程度时, 磁液将逐渐趋于饱和, 磁场感测灵敏度下降 [39].

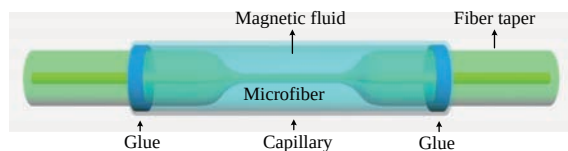


图8 将微纳光纤和磁液用毛细玻璃管进行密封的示意图

Fig. 8. Configuration of a microfiber and magnetic fluid packaged inside a capillary tube to prepare the fabrication of magnetic field sensors.

3.7 保偏微纳光纤 DNA 传感器

光纤倏逝场传感器可被用于提取生命体中重要的物质组成信息, 在疾病诊断、药物研发和健康监控等许多领域有着重要意义. 在这一领域中, 可通过在光纤结构上构造具有特异性识别功能的受体, 当受体与液体中特异性物质如免疫性抗体或抗原等结合, 引起结构表面的折射率改变, 从而实现实时快速检测, 具有良好的适用性. 在实验中, 我们采用多聚赖氨酸 (poly-L-lysine) 对椭圆保偏微纳光纤进行功能化修饰, 然后在其表面链接探针分子, 从而实现对目标 DNA 分子的特异性检测 [40].

当待测单链DNA分子浓度发生变化时,基于椭圆微纳光纤的偏振干涉光谱发生漂移,通过检测光谱漂移量可推知DNA分子浓度的变化值.实验发现在DNA分子浓度为100 pM到1 μ M之间时,干涉光谱随浓度改变呈现良好的线性关系,测得的检测极限为75 pM;我们同时对非检测目标的其他两种单链DNA分子进行了对比实验,结果显示,该传感器对其他分子的响应只有待测分子响应度的6.2%和6%,说明该传感器表现出了良好的分子检测特异性.

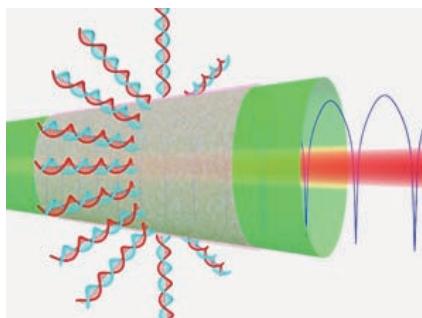


图9 基于保偏微纳光纤DNA传感器的工作原理图

Fig. 9. Schematic for label-free DNA quantification with polarization-interferometric microfiber sensors.

此外,保偏微纳光纤还被用来制作了可调谐梳状滤波器^[34]、摇摆滤波器^[41]和偏振转换器^[42]等其他光学器件.通过对比发现,相较于其他类型的传感器,例如基于等离子体共振^[43]或回音壁模式^[44]等的传感器,保偏微纳光纤传感器具有结构设计相对简单、传感灵敏度高且制作成本低等优点.由于传感器的性能一般由光纤的横截面结构所决定的,通过结构优化可实现对器件性能的提升,该传感器具有较高的可靠性和稳定性.在实际应用中,可采用光纤封装技术进一步提高其实用性,以满足不同场合的应用需求.随着科研的发展,微纳光纤传感技术将会越来越成熟,相信会有更多的器件被开发出来,而保偏微纳光纤也将发挥越来越重要的作用.

4 结 论

近年来,研究者在保偏微纳光纤传感器方面做了大量的研究工作,本文从分析保偏微纳光纤传感器的研究现状和发展趋势出发,回顾了保偏微纳光纤的结构类型、制备方法和模式双折射等特点.阐述了几种不同保偏微纳光纤倏逝场传感器的构成类型和实现方法,深入探究了包括高折射率灵敏度

等产生的内在机理,且讨论了该类传感器在折射率、湿度、磁场和特异性DNA分子探测等方面的应用,其研究结果对保偏微纳光纤及其传感器的发展具有重要意义.

参考文献

- [1] Tong L M, Gattass R R, Ashcom J B, He S, Lou J, Shen M, Maxwell I, Mazur E 2003 *Nature* **426** 816
- [2] Tong L M, Pan X Y 2007 *Physics* **36** 626 (in Chinese) [童利民,潘欣云 2007 物理 **36** 626]
- [3] Brambilla G 2010 *J. Opt.* **12** 043001
- [4] Jiang X S, Tong L M, Vienne G, Guo X, Tsao A, Yang Q, Yang D R 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 223501
- [5] Xu F, Horak P, Brambilla G 2007 *Opt. Express* **15** 7888
- [6] Sumetsky M 2005 *Opt. Express* **13** 4331
- [7] Guan B O, Li J, Jin L, Ran Y 2013 *Opt. Fib. Technol.* **19** 793
- [8] Fan P C, Sun L P, Yu Z P, Li J, Wu C, Guan B O 2016 *Opt. Express* **24** 25380
- [9] Xuan H, Jin W, Zhang M 2009 *Opt. Express* **17** 21882
- [10] Li Y H, Tong L M 2008 *Opt. Lett.* **33** 303
- [11] Sun L P, Li J, Tan Y Z, Gao S, Jin L, Guan B O 2013 *Opt. Express* **21** 26714
- [12] Zhu H, Wang Y Q, Li B J 2009 *ACS Nano* **3** 3110
- [13] Nayak K P, Melentiev P N, Morinaga M, Kien F L, Balykin V I, Hakuta K 2007 *Opt. Express* **15** 5431
- [14] Kien F L, Balykin V I, Hakuta K 2004 *Phys. Rev. A* **70** 063403
- [15] Leon-Saval S G, Birks T A, Wadsworth W J, Russell P St J, Mason M W 2004 *Opt. Express* **12** 2864
- [16] Jiang X S, Song Q, Xu L, Fu J, Tong L M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 3501
- [17] Jiang X S, Yang Q, Vienne G, Li Y H, Tong L M, Zhang J J, Hu L L 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 143513
- [18] Tajima K, Sasaki Y 1989 *J. Lightwave Technol.* **7** 674
- [19] Varnham M P, Payne D N, Birch R D, Tarbox E J 1983 *Electron. Lett.* **19** 246
- [20] Hansen T P, Broeng J, Libori S E, Knudsen E, Bjarklev A, Jensen J R, Simonsen H 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 588
- [21] Suzuki K, Kubota H, Kawanishi S, Tanaka M, Fujita M 2001 *Opt. Express* **9** 676
- [22] Li J, Sun L P, Gao S, Quan Z, Chang Y L, Ran Y, Jin L, Guan B O 2011 *Opt. Lett.* **36** 3593
- [23] Sun L P, Li J, Gao S, Jin L, Ran Y, Guan B O 2014 *Opt. Lett.* **39** 3531
- [24] Jung Y, Brambilla G, Richardson D J 2010 *Opt. Lett.* **35** 2034
- [25] Zhao P, Zhang J, Yu Y, Dong J, Shi L, Liu Y, Zhang X 2013 *Opt. Express* **21** 8231
- [26] Lu P, Song J, Niedermayer G, Harris J, Chen L, Bao X 2014 *Proceedings of SPIE 9157, 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors* Santander, Spain, June 2–6, 2014 p915708
- [27] Jung Y, Brambilla G, Oh K, Richardson D J 2010 *Opt. Lett.* **35** 378

- [28] Mikkelsen J C, Poon J K 2012 *Opt. Lett.* **37** 2601
- [29] Xuan H, Ju J, Jin W 2010 *Opt. Express* **18** 3828
- [30] Beltrán-Mejía F, Osório J H, Biazoli C R, Cordeiro C M 2013 *J. Lightwave Technol.* **31** 3056
- [31] Kou J, Xu F, Lu Y 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 1034
- [32] Zhang W, Mu J W, Huang W P, Zhao W 2012 *IEEE Photon. J.* **4** 1610
- [33] Liao J, Yang F, Xie Y, Wang X, Huang T, Xiong Z, Kuang F 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 1868
- [34] Jin W, Wang C, Xuan H, Jin W 2013 *Opt. Lett.* **38** 4277
- [35] Li J, Sun L P, Gao S, Ran Y, Guan B O 2012 *Proceedings of the Photonics Global Conference (PGC)* Singapore, December 13–16, 2012
- [36] Sun L, Li J, Tan Y, Shen X, Xie X, Gao S, Guan B O 2012 *Opt. Express* **20** 10180
- [37] Ran Y, Jin L, Sun L P, Li J, Guan B O 2012 *Opt. Lett.* **37** 2649
- [38] Sun L P, Li J, Jin L, Ran Y, Guan B O 2016 *Sens. Actuators B* **231** 696
- [39] Tian Z, Sun L P, Li J, Huang Y, Guan B O 2014 *Proceedings of the Asia Communications and Photonics Conference* Shanghai, China, November 11–14, 2014 AF3F-1
- [40] Sun D, Guo T, Ran Y, Huang Y, Guan B O 2014 *Biosens. Bioelectron.* **61** 541
- [41] Jin W, Xuan H, Jin W 2014 *Opt. Lett.* **39** 3363
- [42] Xuan H, Ma J, Jin W, Jin W 2014 *Opt. Express* **22** 3648
- [43] Sharma A K, Rajan J, Gupta B D 2007 *IEEE Sens. J.* **7** 1118
- [44] Knight J C, Cheung G, Jacques F, Birks T A 1997 *Opt. Lett.* **22** 1129

SPECIAL TOPIC — Optical Fiber Sensor

Polarization-maintaining microfiber-based evanescent-wave sensors^{*}

Li Jie Li Meng-Meng Sun Li-Peng Fan Peng-Cheng Ran Yang Jin Long Guan Bai-Ou[†]

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

(Received 16 January 2017; revised manuscript received 16 March 2017)

Abstract

In recent years, polarization-maintaining (PM) microfibers have attracted much research attention mostly due to their ultra-high birefringence and large evanescent field effect. This article starts from introduction of the structures, fabrication methods, and mode characteristics of PM microfibers. Different previously-implemented PM microfiber sensors have been presented. The two polarization modes may have different responses on changes of external parameters for PM microfiber, which allows fabrication of polarization-related devices, such as interferometers or gratings. Some sensing characteristics, such as extremely-high refractive index sensitivity and/or temperature-independent response, have been demonstrated. The sensing applications including detection of refractive index, humidity, magnetic field and specific DNA molecular have been described in detail. This article should be helpful for future development of PM micro/nano fibers and the related sensors.

Keywords: microfiber, high birefringence, large evanescent field effect, refractive index sensors

PACS: 42.81.-i, 42.81.Gs, 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.66.074209

^{*} Project supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 61225023), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61575083, 61235005), the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 2014A030313364).

[†] Corresponding author. E-mail: tguanbo@jnu.edu.cn