

涂覆纳米膜的腐蚀双包层光纤折射率传感特性研究

程佳静^{1**}, 庞拂飞¹, 朱姗², 张小贝¹, 王廷云^{1*}

¹上海大学通信与信息工程学院, 特种光纤与光接入网重点实验室, 特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200444;

²上海师范大学天华学院工学院, 上海 201815

摘要 提出一种基于纳米膜涂覆的外包层腐蚀双包层光纤(DCF)复合结构传感器。该结构可以通过调控腐蚀时间和纳米膜涂覆厚度来改变传感器的耦合模式、谐振波长、最佳折射率传感区间等传感器参数。理论分析了 DCF 外包层厚度减小时, DCF 模式耦合特性以及折射率传感灵敏度的变化情况。实验中通过在外包层直径为 59 μm 的 DCF 上涂覆 2000 层的 Al_2O_3 纳米膜, 实现了在 1.336~1.356 折射率范围内 1200 nm/RIU 的灵敏度(RIU 为单位折射率), 这是未经腐蚀和涂覆 DCF 的 24 倍。该传感器具有灵敏度高、一致性好、耦合模式可控、传感器参数可定制化等优点, 有望在生物医学和化学检测等领域有极大的应用价值。

关键词 光纤光学; 折射率传感; 双包层光纤; 腐蚀; 纳米膜

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0810003

Refractive Index Sensing Characteristics of Etched Double-Cladding Fiber Coated with Nanofilm

Cheng Jiajing^{1**}, Pang Fufei¹, Zhu Shan², Zhang Xiaobei¹, Wang Tingyun^{1*}

¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²School of Engineering, Shanghai Normal University Tianhua College, Shanghai 201815, China

Abstract We propose a sensor based on etched double-cladding fiber (DCF) coated with nanofilm. The coupling mode, resonant wavelength and the best sensing interval can be adjusted by control of the etching time and coating thickness. The evolution of mode behaviors and refractive index (RI) sensitivity as DCF cladding thickness decreasing is theoretically analyzed. In the experiment, 2000 layers of Al_2O_3 nanofilms are coated on a DCF with an outer diameter of 59 μm to achieve a sensitivity of 1200 nm/RIU in the RI range from 1.336 to 1.356, in which RIU is RI unit. The RI sensitivity of proposed fiber is 24 times than that of bare DCF. The sensor has the advantages of high sensitivity, good consistency, controllable coupling mode, and customizable sensor parameters. It is expected to have great application value in biomedicine, chemical detection and so on.

Key words fiber optics; refractive index sensing; double-cladding fiber; etch; nanofilm

OCIS codes 060.2370; 060.2280; 310.1860

1 引言

近年来, 光纤折射率(RI)传感器由于具有体积小、响应快、灵敏度高、抗电磁干扰等优点, 在生物医学^[1-3]、化学检测^[4-6]等领域受到了广泛关注。一直以来, 包层模激发型光纤传感器都是光纤折射率传

感器的研究热点, 其基本原理是利用不同的光纤结构或技术实现包层模式的激发, 通过监测谐振峰的波长漂移量实现待测物理量高灵敏度的检测。如: 基于长周期光纤光栅(LPFG)^[7-13]、倾斜光栅(TBFG)^[14-15]、布拉格光纤光栅(FBG)^[16]、双包层光纤(DCF)^[17-21]、拉锥光纤^[22]、光子晶体光纤

收稿日期: 2018-03-06; 修回日期: 2018-03-28; 录用日期: 2018-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(61735009, 61422507)、国家重点研发计划(2016YFF0100600)

* E-mail: tywang@mail.shu.edu.cn; ** E-mail: chengjiajingansure@126.com

(PCF)^[5,23]、细芯光纤(TCF)^[24]、多模光纤(MMF)^[25]等结构的传感器均为光纤折射率传感器。为了提高这类传感器包层模式对环境折射率变化的灵敏度,必须提高其包层模的倏逝场强度。目前研究者们主要通过以下三类方法提高此类传感器的灵敏度:1)通过设计一些特殊的光纤结构提高其折射率传感灵敏度^[7];2)使用化学腐蚀等方法减小光纤包层厚度,其基本原理是通过减小包层直径以提高单个模式的灵敏度或激发出对外界折射率变化更灵敏的模式^[8-10,13,18];3)在光纤表面涂覆不同材料的高折射率薄膜,实现对光纤模式的重新组合,重组的光纤模式在跃迁区内会发生有效折射率的快速变化,从而提高该模式对外界环境折射率变化的传感灵敏度^[11-13,20]。如墨西哥光学研究中心的Martinez-Rios^[9]等在2010年对电弧放电法制备的LPFG进行腐蚀,提高了其折射率传感灵敏度,当LPFG包层直径为39 μm时,在1~1.456折射率范围内波长漂移量为230 nm。2013年,Chiavaioli^[7]等设计了一种对称的倾斜角度渐增打栅结构的LPFG以调高其灵敏度,实现在1.444~1.456折射率区间内4000 nm/RIU的灵敏度。同年,本课题组^[20]提出基于原子层沉积技术(ALD)在DCF表面涂覆Al₂O₃纳米膜的折射率传感增敏方案,实验得到折射率在1.34附近灵敏度达到723 nm/RIU的传感器。2016年,上海理工大学的蒋秀丽等^[13]在双峰谐振LPFG镀自组装聚丙烯胺盐酸盐(PAH)/聚丙烯酸(PAA)薄膜,确定了使LPFG包层模位于模式转换区和相位匹配转折点附近的最佳镀膜厚度和包层直径,实现在1.333~1.372折射率范围内3985 nm/RIU的高灵敏度。

上述研究都验证了减小外包层直径和涂覆高折

射率纳米膜均可以有效地提高包层模对外界折射率变化的传感灵敏度。本课题组提出并设计了一种基于纳米膜涂覆的腐蚀DCF复合结构折射率传感器。利用化学腐蚀的方法减小DCF的外包层直径,使用ALD技术在腐蚀DCF上沉积Al₂O₃纳米膜即可制备DCF复合结构折射率传感器。通过理论计算,讨论了减小外包层直径对DCF的模式色散及谐振波长折射率传感灵敏度的影响,并进行实验验证,然后实验测试了DCF复合结构的折射率传感响应,深入分析了腐蚀和纳米膜涂覆对其高折射率区间和低折射率区间传感特性的影响。实验结果表明该传感器具有灵敏度高、一致性好、耦合模式可控、传感器参数可定制化等优点。

2 理论分析

DCF由纤芯、内包层和外包层组成,纤芯和外包层的折射率相等且比内包层折射率高0.002。该光纤由课题组使用改进化学气相沉积(MCVD)技术和拉丝塔制备,纤芯与外包层材料为纯二氧化硅,内包层为掺氟二氧化硅,使用折射率检测分析仪(S14, Photon Kinetics)测得其端面图及折射率分布,如图1(a)所示。DCF结构参数为:纤芯直径8 μm,折射率1.4685;内包层直径26 μm,折射率1.4665;外包层直径125 μm,折射率1.4685。DCF传感头结构如图1(b)所示,通过将一段特定长度的DCF无错位熔接至两段标准单模光纤(SMF)中间以实现DCF包层模的激发。由耦合模理论可知,在特定波长处纤芯波导基模与包层波导模式的传播常数相等,即满足相位匹配条件时,能实现光波谐振耦合效应,光能量将从纤芯耦合至DCF外包层中^[19]。实验中选取DCF长度为13 mm,其传输光谱如图1(c)所示。

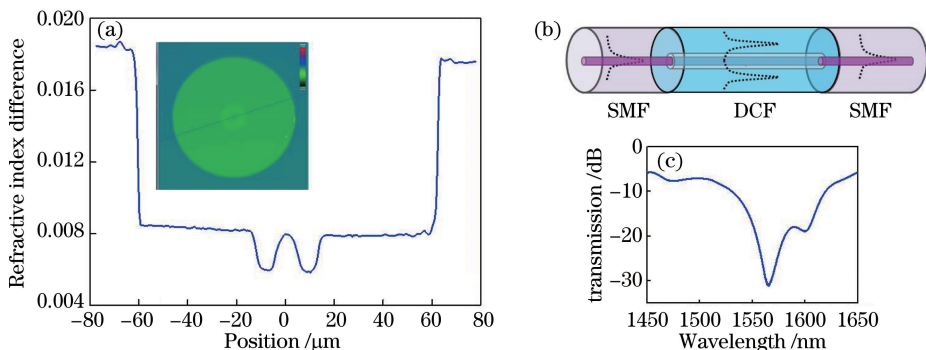


图1 (a) DCF 折射率分布;(b) SMF-DCF-SMF 传感头结构;(c) DCF 传感头传输光谱

Fig. 1 (a) RI distribution of DCF; (b) sensor head structure of SMS-DCF-SMF;

(c) transmission spectrum of the DCF sensor head

利用有限差分法,对 DCF 进行模式仿真,可以推导出不同模式的有效折射率,进而计算和分析外包层厚度减小时 DCF 模式耦合特性及传感特性的变化。图 2 为 DCF 当不同外包层直径时纤芯模式与包层模式色散曲线,以图 2(a)为例,纤芯模式 LP₀₁与包层模式 LP₀₅的色散曲线交于 1563.6 nm 处,在该交点处满足相位匹配条件,纤芯能量将耦合至包层,对应交点处的波长为谐振波长。通过调节 DCF 外包层直径,可以使包层 LP_{0m}模式与纤芯模

式 LP₀₁在相同的谐振波长(1570 nm)附近发生模式耦合,进而可对比不同包层 LP_{0m}模式的折射率传感灵敏度。由图 2 可知,当 DCF 外包层直径分别为 125.0,103.6,82.0,60.4 μm 时,包层模式的色散曲线向短波长方向移动,发生耦合效应的包层模式将从 LP₀₅模式转变为更低阶的 LP₀₄、LP₀₃、LP₀₂模式。相较于高阶模式,低阶模式的色散曲线具有更小的斜率。当外界折射率发生变化时,低阶模式会发生更大的波长漂移量,从而实现更高的灵敏度^[15]。

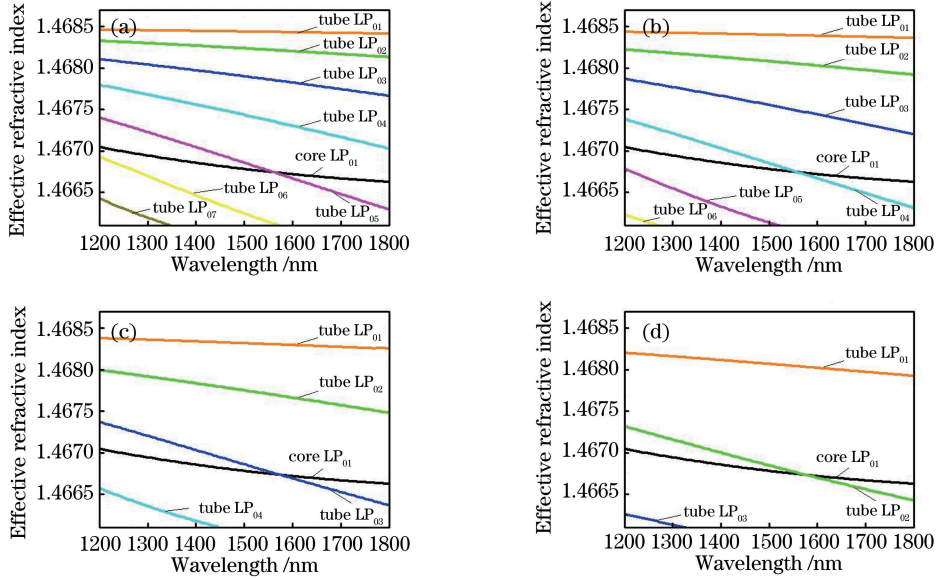


图 2 不同外包层直径 DCF 纤芯模式与包层模式色散曲线。(a)外包层直径为 125.0 μm; (b)外包层直径为 103.6 μm;(c)外包层直径为 82.0 μm;(d)外包层直径为 60.4 μm

Fig. 2 Dispersion curves of core mode and cladding modes for DCFs with different cladding diameters. (a) Outer cladding diameter is 125.0 μm; (b) outer cladding diameter is 103.6 μm; (c) outer cladding diameter is 82.0 μm; (d) outer cladding diameter is 60.4 μm

理论计算了这 4 个模式谐振波长对外界环境折射率的响应曲线,如图 3 所示。从图中可以看出,当外界折射率增加时,DCF 谐振峰向长波长方向移

动,且谐振峰的漂移量随折射率的增加呈指数上升趋势。进一步比较 4 个模式的传感灵敏度,计算了谐振峰的波长漂移量,当外界环境折射率从 1.336 增加至 1.456 时,LP₀₅、LP₀₄、LP₀₃和 LP₀₂ 4 个模式谐振峰波长漂移量分别为 43.5, 57.4, 83.7, 152.1 nm,理论验证了降低 DCF 外包层直径可以显著地提高 DCF 的折射率传感灵敏度这一结论。

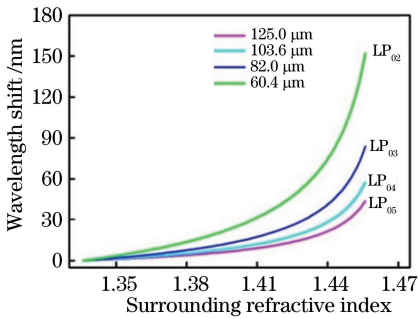


图 3 理论计算具有不同外包层直径的 DCF 折射率传感响应特性

Fig. 3 Theoretical RI sensing response of DCFs with different cladding diameters

3 实验结果分析

3.1 腐蚀 DCF 传感实验

实验中采用质量分数为 40% 的氢氟酸溶液 (HF)对 DCF 进行腐蚀以减小其外包层厚度。随着腐蚀时间的增加,外包层厚度逐渐减小,腐蚀速率约为 1.8 μm/min,如图 4 所示。图 4(b)中 3 幅插图分别为当腐蚀时间为 0 min(外包层直径为 125 μm)、

25 min(外包层直径为 $75\ \mu\text{m}$)、35 min(外包层直径为 $59\ \mu\text{m}$)时 DCF 传感头的透射谱,在特定腐蚀区间内出现新的谐振峰即说明特定的模式被激发,与

理论分析一致。因此,根据腐蚀时间与 DCF 外包层直径的关系,就可以通过控制腐蚀时间来设计 DCF 结构及需要被激发的包层模式。

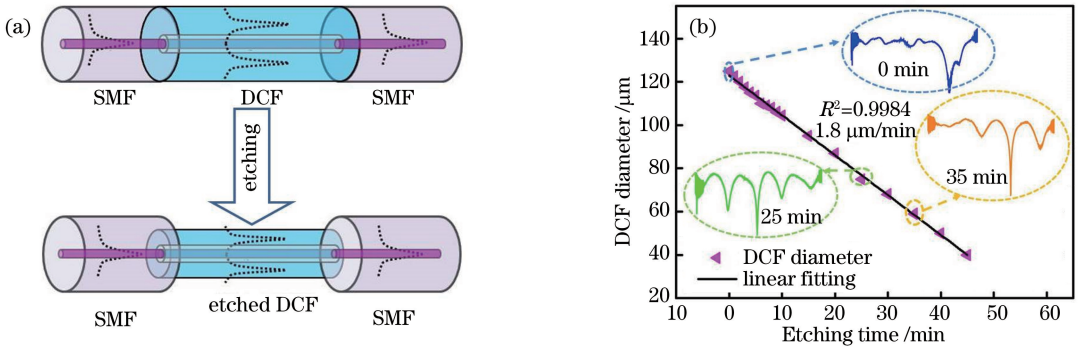


图 4 (a)腐蚀 DCF 传感头结构;(b)随着 HF 腐蚀时间增加 DCF 直径变化曲线

Fig. 4 (a) Sensor head structure of etched DCF; (b) relationship between DCF cladding diameter and HF etching time

折射率传感实验所用的光源为超连续谱光源(NKT Photonics SuperK Compact),传输光谱由光纤光谱分析仪(AQ-6375)检测。在折射率传感实验中,DCF 传感头被固定在洁净无尘的载玻片上,且 DCF 传感头在实验过程中始终保持水平拉直状态,有效避免了杂质和弯曲对 DCF 折射率传感的影响。液体折射率样品是由不同比例的甘油和去离子水混合制备而成,样品折射率参考值由阿贝尔折射仪测量得到,其折射率范围为 $1.336\sim 1.456$ 。每次测试后,均使用去离子水清洗 DCF 传感头,干燥后进行下一次测试。实验使用的掺氟 DCF 具有温度不敏

感特性^[26-27],在 $0\sim 100\ ^\circ\text{C}$ 区间内掺氟 DCF 谐振波长漂移量小于 $1\ \text{nm}$,其温度传感灵敏度仅为 $9\ \text{pm}/^\circ\text{C}$,远小于折射率变化对传感头谐振峰的影响。因为室温浮动对 DCF 传感头折射率传感实验的影响可以忽略不计,本文所有实验过程均在室温下进行。

图 5(a)、(b)和(c)为同一个 DCF 样品分别在外包层直径为 $125, 75, 59\ \mu\text{m}$ 时的传输光谱的折射率传感响应。测试了 $1570\ \text{nm}$ 附近对应 LP_{05} 、 LP_{03} 和 LP_{02} 阶包层模式的 3 个谐振峰变化情况,随着环境折射率的增加,DCF 谐振峰往长波长方向漂移。为了更直观地观察和讨论谐振波长与外界折射率的

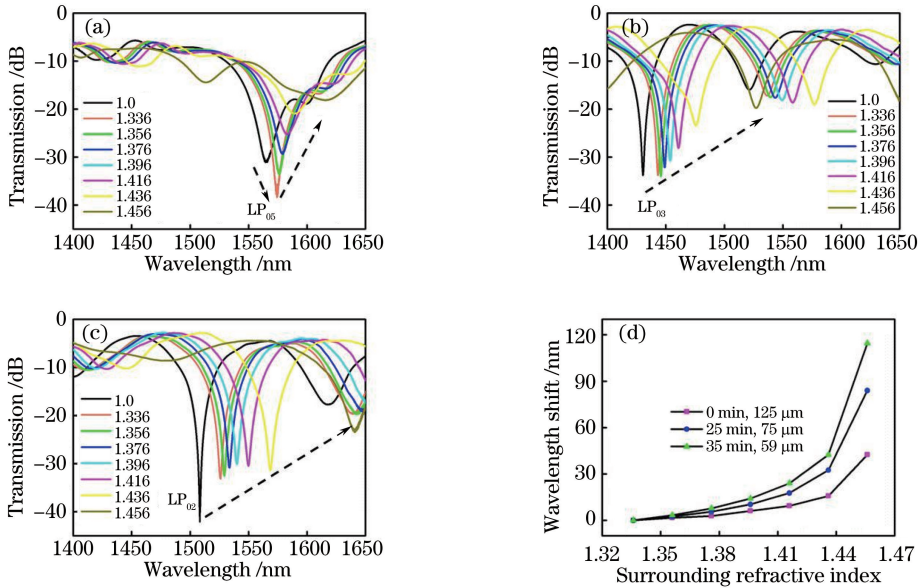


图 5 外包层直径分别为(a) 125,(b) 75,(c) $59\ \mu\text{m}$ 的 DCF 传输光谱折射率传感响应;

(d)外包层直径为 $125, 75, 59\ \mu\text{m}$ 的 DCF 谐振峰波长折射率传感响应曲线

Fig. 5 Transmission spectra of RI sensing response of DCFs with (a) 125, (b) 75, (c) $59\ \mu\text{m}$ outer cladding diameters;

(d) RI sensing response of resonant wavelength of DCF with different outer cladding diameters of 125, 75, $59\ \mu\text{m}$

关系,对图 5(a)、(b)和(c)中标记的谐振峰进行分析,得到外包层直径为 125,75,59 μm 的 DCF 谐振峰的折射率传感响应曲线如图 5(d)所示,其在 1.336~1.456 折射率区间内的谐振峰波长漂移量分别为 42.5,83.9,114.8 nm,与理论计算结果基本相一致,验证了减小 DCF 外包层直径增加折射率传感灵敏度的可行性。通过计算得到 DCF 在 1.336~1.356 折射率区间内传感灵敏度分别为 50,122,166 nm/RIU,在 1.436~1.456 折射率区间内的灵敏度分别为 1342,2574,3616 nm/RIU。实验结果表明,DCF 在 1.336~1.356 折射率区间内传感灵敏度增加了 3.3 倍,在 1.436~1.456 折射率区间内传感灵敏度增加了 2.7 倍。由此可知,从增敏效果的角度分析,减小 DCF 外包层直径,对在低折射率范围和高折射率范围内传感灵敏度均可实现显著的提高;但是从灵敏度绝对值的角度分析,减小 DCF 外包层直径对在低折射率范围内的传感灵敏度虽有提高,但仍远小于高折射率范围内的灵敏度,因此减小 DCF 外包层直径的样品更适用于高折射率的传感应用环境,而低折射率范围内的传感灵敏度仍有待进一步的提高。

为对该传感器进行一致性实验,另外制备了 3 组外包层直径约为 59 μm 的 DCF 样品(腐蚀时间均为 35 min),与前组 59 μm 的 DCF 进行对比发现,4 组样品谐振峰的折射率传感响应结果如图 6 所示。实验结果表明,4 组外包层直径为 59 μm 的 DCF 样品在 1.336~1.456 折射率范围内具有一致的传感趋势和传感量,表明减小外包层直径的 DCF 样品具备较好的一致性。

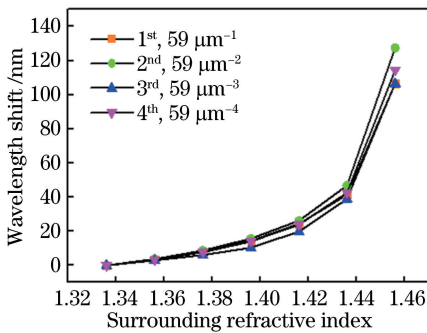


图 6 DCF 腐蚀样品折射率传感响应的一致性

Fig. 6 Consistency of RI sensing response of etched DCF

3.2 纳米膜涂覆腐蚀 DCF 传感实验

对外包层直径为 59 μm 的 DCF 样品进行纳米膜涂覆实验,在其外包层表面涂覆高折射率的 Al_2O_3 纳米膜,研究其折射率传感特性变化规律。

由模式跃迁理论可知,在 DCF 表面涂覆高折射率纳米膜可以引导 DCF 模式向低阶模式跃迁,由于在跃迁区内模式有效折射率快速变化,因此 DCF 折射率传感灵敏度将得到有效提升^[20]。实验中利用 ALD 技术在 DCF 表面涂覆 Al_2O_3 纳米膜,ALD 技术具有膜厚可精确控制、涂层特性稳定、对复杂结构适应性好、附着性强、保形沉积、一致性好等优点,因此非常适用于如光纤这类圆柱式微结构的纳米膜涂覆^[28-30]。图 7(a)给出了纳米膜涂覆腐蚀 DCF 传感头结构示意图,在腐蚀 DCF 的基础上进一步涂覆了 Al_2O_3 纳米膜。为了检测 Al_2O_3 纳米膜的特性,首先在光纤表面涂覆 1000 层 Al_2O_3 纳米膜,然后选取光纤纳米膜涂覆区将其端面切割平整,最后使用扫描电子显微镜(SEM)表征其端面结构,如图 7(b)所示,DCF 端面边缘有一层涂覆均匀的 Al_2O_3 纳米膜,测量得到纳米膜的厚度为 107.9 nm,则涂覆速率为 0.1 nm/cycle。

图 8(a)所示为在外包层直径为 59 μm 的 DCF 上涂覆 2000 层 Al_2O_3 纳米膜的传输光谱折射率传感响应,在 1.336~1.356 折射率范围内,谐振峰随外界折射率的增加向长波长方向移动,当外界折射率进一步增加时,谐振峰消失,无法进一步检测更高的折射率。图 8(b)所示为分别在未涂覆、涂覆 500 层、1000 层、1500 层和 2000 层时 5 组外包层直径为 59 μm 的 DCF 谐振峰折射率传感响应曲线。DCF 在 1.336~1.356 折射率区间内的谐振峰波长移动量分别为 3.7,4.3,7.2,14,24 nm,其折射率灵敏度分别为 185,215,360,700,1200 nm/RIU。实验结果表明,外包层直径为 59 μm 的 DCF 上涂覆 2000 层 Al_2O_3 纳米膜样品较未涂覆样品增敏 6.5 倍,与原有未经腐蚀且未涂覆 DCF 样品相比增敏 24 倍。然而,随着涂覆厚度的增加,DCF 的动态检测范围逐渐减小,这是由于模式跃迁区向低折射率方向移动,此时当外界环境折射率增大到特定值时, LP_{02} 模式将完全跃迁至 LP_{01} 模式,发生模式重组,因而无法检测到更高的折射率。由此可知,通过涂覆纳米膜可以极大地提高 DCF 在低折射率范围内的传感灵敏度,使其更适用于低折射率传感应用环境。生物医学应用场景的折射率非常接近 1.336^[30],因此纳米膜涂覆与腐蚀相结合的 DCF 复合结构在该领域具有极大的潜在应用价值。

根据以上实验结果可知,DCF 的腐蚀传感增敏和纳米膜涂覆传感增敏特性可以通过调节其外包层直径和涂覆厚度来改变该结构的耦合模式、谐振波

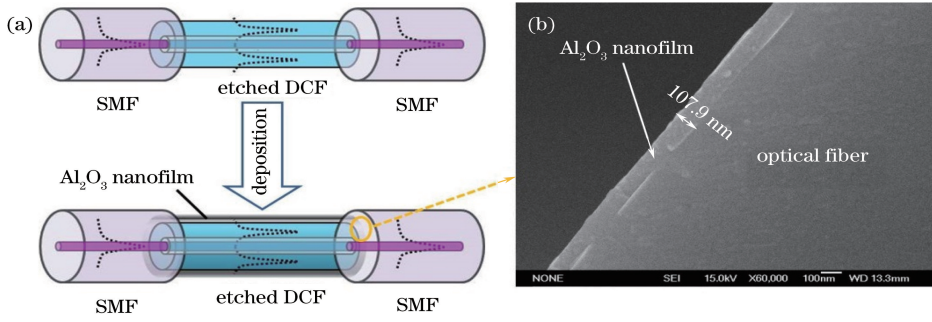


图 7 (a)纳米膜涂覆腐蚀 DCF 传感头结构;(b)光纤端面涂覆氧化铝纳米膜 SEM 表征

Fig. 7 (a) Sensor head structure of etched DCF with coated nanofilm;

(b) SEM picture of the Al_2O_3 nanofilm coated optical fiber

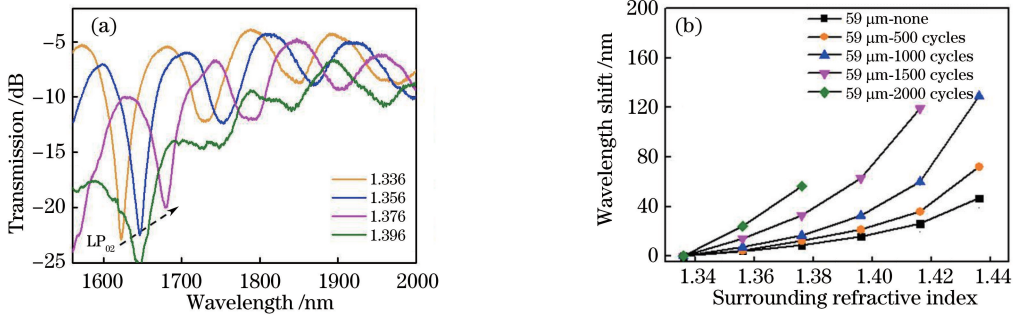


图 8 (a)涂覆 2000 层 Al_2O_3 纳米膜的 $59 \mu m$ 外包层直径的 DCF 传输光谱折射率传感响应;

(b)不同 Al_2O_3 纳米膜涂覆厚度的腐蚀 DCF 谐振峰波长折射率传感响应曲线

Fig. 8 (a) Spectral RI sensing response of DCF with $59 \mu m$ outer cladding diameter and coated with 2000 cycles Al_2O_3 nanofilm; (b) RI sensing response of resonant wavelength of etched DCF with different Al_2O_3 nanofilm coating thicknesses

长、传感灵敏度以及最佳折射率传感区。

5 结 论

提出并实现了一种腐蚀和纳米膜涂覆相结合的 DCF 折射率传感增敏方案。理论研究了 DCF 外包层直径减小对光纤模式的影响,并对腐蚀增敏的可行性进行了理论计算。实验结果表明,随着腐蚀时间的增加,DCF 的低阶模式会被激发出来,其中外包层直径为 $59 \mu m$ 的 DCF 样品相比未腐蚀 DCF 在 $1.336 \sim 1.456$ 折射率范围内灵敏度均实现了 $2.7 \sim 3.3$ 倍的提高。在腐蚀 DCF 上涂覆纳米膜可以进一步提高 DCF 在低折射率范围内的传感灵敏度,与未加工 DCF 样品相比,在 $1.336 \sim 1.356$ 低折射率范围内灵敏度提高了 24 倍,高达 1200 nm/RIU 。通过腐蚀时间和涂覆厚度的调控可以改变耦合模式、谐振波长、折射率传感灵敏度和最佳折射率传感区间,因此可以利用这种关系来设计不同的 DCF 结构以适应不同的传感应用场景。

参 考 文 献

- [1] Zibai M I, Kazemi A, Latifi H, *et al.* Measuring bacterial growth by refractive index tapered fiber optic biosensor [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2010, 101(3): 313-320.
- [2] Ma J, Zheng Y, Yu H H. A temperature and glucose solution concentration sensor based on etched optical fiber [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46 (4): 0406003.
马健, 郑羽, 余海湖. 基于腐蚀光纤的温度及葡萄糖溶液浓度传感器 [J]. 光子学报, 2017, 46 (4): 0406003.
- [3] Wang H, Zhou W C, Li K W, *et al.* Label-free biosensing characteristics of micro/nano-fiber coupler [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0306005.
汪海, 周文超, 李凯伟, 等. 微纳光纤耦合器无标生物传感特性 [J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0306005.
- [4] Banerjee A, Mukherjee S, Verma R K, *et al.* Fiber optic sensing of liquid refractive index [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2007, 123(1): 594-605.
- [5] Zhao Y, Deng Z Q, Li J. Photonic crystal fiber based

- surface plasmon resonance chemical sensors [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 202(4): 557-567.
- [6] Deng D S, Qin X, Huang G J, *et al.* Design and application of copper deposited tungsten disulfide film coated thin-core optical fiber gas sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1106002.
邓大申, 秦祥, 黄国家, 等. 铜沉积二硫化钨膜包覆薄芯光纤气体传感器的设计与应用 [J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1106002.
- [7] Chiavaioli F, Trono C, Baldini F. Specially designed long period grating with internal geometric bending for enhanced refractive index sensitivity [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(23): 231109.
- [8] Iadicco A, Campopiano S, Giordano M, *et al.* Spectral behavior in thinned long period gratings: effects of fiber diameter on refractive index sensitivity [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(28): 6945-6952.
- [9] Martinez-Rios A, Monzon-Hernandez D, Torres-Gomez I. Highly sensitive cladding-etched arc-induced long-period fiber gratings for refractive index sensing [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(6): 958-962.
- [10] Deng H Y, Rao Y J, Wang P H, *et al.* LPFGs written on fibers with thinned claddings [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, 19(2): 155-157.
邓洪有, 饶云江, 汪平河, 等. 薄包层长周期光纤光栅的研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2008, 19(2): 155-157.
- [11] Zou F, Liu Y Q, Deng C L, *et al.* Refractive index sensitivity of nano-film coated long-period fiber gratings [J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1114-1124.
- [12] Del Villar I. Ultrahigh-sensitivity sensors based on thin-film coated long period gratings with reduced diameter, in transition mode and near the dispersion turning point [J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8389-8398.
- [13] Jiang X L, Gu Z T, Lin Q, *et al.* Optimal design and experiments of coated dual-peak resonance long-period fiber gratings refractive index sensing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0505003.
蒋秀丽, 顾铮天, 凌强, 等. 镀膜双峰谐振长周期光纤光栅折射率传感的优化设计与实验 [J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0505003.
- [14] Huang M, Gu C S, Sun B, *et al.* Refractive index sensor based on tilted-fiber Bragg grating coated with graphene [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1210001.
黄梦, 顾昌晟, 孙兵, 等. 基于石墨烯涂覆倾斜光纤光栅的折射率传感 [J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1210001.
- [15] Shi L, Liu Y Q, Song H L, *et al.* High sensitivity refractive index sensor based on tilted fiber Bragg gratings [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2017, 23(6): 859-864.
石磊, 刘云启, 宋红亮, 等. 基于倾斜布拉格光纤光栅的高灵敏度折射率传感器 [J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2017, 23(6): 859-864.
- [16] Corotti R D P, Jr, Thaler J, Kalinowski H J, *et al.* Etched FBG written in multimode fibers: sensing characteristics and applications in the liquid fuels sector [J]. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2015, 14(1): 51-59.
- [17] Wang T Y, Pang F F, Chen Z Y, *et al.* Research on cladding mode resonant specialty optical fibers and their sensing properties [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900140.
王廷云, 庞拂飞, 陈振宜, 等. 包层模谐振特种光纤及传感特性研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900140.
- [18] Ivanov O V, Tian F, Du H. Evolution of transmission spectra of double cladding fiber during etching [J]. *Optics Communications*, 2017, 402: 238-241.
- [19] Pang F, Liu H, Chen N, *et al.* Fiber-optic refractive index sensor based on cladding-mode resonance [C] // 20th International Conference on Optical Fibre Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2009, 7503: 75036W.
- [20] Zhao Y, Pang F F, Dong Y H, *et al.* Refractive index sensitivity enhancement of optical fiber cladding mode by depositing nanofilm via ALD technology [J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26136-26143.
- [21] Fu X H, Zhang J P, Fang Y C, *et al.* Tapered double-cladding fiber temperature sensor based on surface temperature sensitive thin-film [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0810001.
付兴虎, 张江鹏, 方一程, 等. 基于表面温敏薄膜的锥形双包层光纤温度传感器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0810001.
- [22] Zhang Y S, Qiao X G, Shao M, *et al.* A fiber Mach-Zehnder interferometer based on waist-enlarged fiber taper and graded-index multimode fiber [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, 25(9): 1662-1667.
张芸山, 乔学光, 邵敏, 等. 基于光纤锥和多模渐变光纤的马赫-曾德尔干涉仪的传感特性研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2014, 25(9): 1662-1667.
- [23] Shi W H, You C J, Wu J. D-shaped photonic crystal fiber refractive index and temperature sensor based on surface plasmon resonance and directional coupling

- [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 0224221.
- 施伟华, 尤承杰, 吴静. 基于表面等离子体共振和定向耦合的 D 形光子晶体光纤折射率和温度传感器 [J]. *物理学报*, 2015, 64(22): 0224221.
- [24] Fu H W, Li H D, Shao M, *et al.* TCF-MMF-TCF fiber structure based interferometer for refractive index sensing[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 69: 58-61.
- [25] Qian C L, Chen M Y. Investigation on refractive index sensing based on interference effect in multimode optical fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 050601.
- 钱春霖, 陈明阳. 基于多模干涉效应的光纤折射率传感技术研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 050601.
- [26] Pang F F, Liang W B, Xiang W C, *et al.* Temperature-insensitivity bending sensor based on cladding-mode resonance of special optical fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(2): 76-78.
- [27] Koike A, Sugimoto N. Temperature dependences of optical path length in fluorine-doped silica glass and bismuthate glass [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6116(2): 84-93.
- [28] Zhu S, Pang F F, Huang S J, *et al.* High sensitivity refractometer based on TiO₂-coated adiabatic tapered optical fiber via ALD technology [J]. *Sensors*, 2016, 16(8): 1295.
- [29] Śmietana M, Myśliwiec M, Mikulic P, *et al.* Capability for fine tuning of the refractive index sensing properties of long-period gratings by atomic layer deposited Al₂O₃ overlays [J]. *Sensors*, 2013, 13(12): 16372-16383.
- [30] Zhu S, Pang F, Huang S, *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.