

激光与光电子学进展

基于微纳光纤干涉仪的光纤环形激光传感器及硝酸钆高灵敏检测

伯婉¹, 王梦宇^{1*}, 曾思藩², 何兴道¹, 吴强¹, 刘彬^{1**}¹南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063;²中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 为了对硝酸钆进行高灵敏检测, 研究一种基于微纳光纤干涉仪的光纤环腔激光传感器。制备了一种具有双锥结构的微纳光纤干涉仪, 微纳光纤的强倏逝场可与外界环境或周围介质发生有效相互作用, 且倏逝场随着光纤双锥结构直径的减小不断增强, 折射率传感的灵敏度指标也有显著提高。实验结果表明: 当微纳光纤的直径为 20 μm 时, 传感器的折射率灵敏度达 1925 nm/RIU; 对于硝酸钆溶液的质量浓度, 该传感器的灵敏度高达 0.172 nm/(mg·mL⁻¹)。此外, 该光纤环形激光传感器具有灵敏度高、结构紧凑等优点, 在生物修饰和化学传感等方面有广阔的应用前景。

关键词 传感器; 光纤环形激光器; 微纳光纤; 倏逝波; 折射率测量; 硝酸钆测量

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220630

Fiber Ring Laser Sensor Based on Micro-Nano Fiber Interferometer and Highly Sensitive Detection of Gadolinium Nitrate

Bo Wan¹, Wang Mengyu^{1*}, Zeng Sifan², He Xingdao¹, Wu Qiang¹, Liu Bin^{1**}¹Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China;²Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China

Abstract In order to detect gadolinium nitrate with high sensitivity, a fiber ring cavity laser sensor based on micro-nano fiber interferometer is studied in this paper. A kind of micro-nano fiber interferometer with double cone structure is prepared. The strong evanescent field of micro-nano fiber can interact effectively with the external environment or surrounding medium, and the evanescent field increases with the decreasing of the diameter of fiber biconical structure. The sensitivity of refractive index sensing is also significantly improved. The experimental results show that when the diameter of micro-nano fiber is 20 μm , the refractive index sensitivity of the sensor is 1925 nm/RIU; for the mass concentration of gadolinium nitrate solution, the sensitivity of the sensor is as high as 0.172 nm/(mg·mL⁻¹). In addition, the fiber ring laser sensor has the advantages of high sensitivity and compact structure, and has a broad application prospect in biological modification and chemical sensing.

Key words sensors; fiber ring laser; micro-nano fiber; evanescent wave; refractive index measurement; gadolinium nitrate measurement

1 引言

光纤激光器在空间通信、激光武器、材料加工与医疗设备、微波光子学、光信号处理、非线性光学等诸多领域具有举足轻重的地位^[1-3]。光纤激光器不仅可以为光

纤通信系统提供超短脉冲源, 在光纤传感领域也得到了研究者的广泛关注^[4]。传统光纤传感系统的干涉谱中同时存在多个波峰和多个波谷, 不易分辨, 且 3 dB 带宽较大, 可能导致测量分辨率低、精度低, 给检测过程带来了困难^[5]。光纤激光传感系统具有单峰光谱、窄 3 dB

收稿日期: 2022-01-05; 修回日期: 2022-01-15; 录用日期: 2022-02-28; 网络首发日期: 2022-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(11864025, 22106151, 62065013)、江西省自然科学基金(20212BAB202024)

通信作者: *mengyu@nchu.edu.cn; **liubin_d@126.com

带宽、高信噪比、高光强、高传感精度和分辨率^[6]等优势,目前已被用于温度^[7-8]、折射率^[9-10]、应变^[11-12]、扭矩^[13]、加速度^[14]、超声波^[15]等参量的传感应用。

微纳光纤具有的强倏逝场、强光约束、低损耗以及很好的均匀性和弹性^[16]等优良特性使光纤对外界环境更敏感,同时增强了光子与外界物质之间的非线性效应,将其应用于激光谐振腔中可实现滤波器的功能^[17]。Liang等^[18]提出了一种基于单模-锥形无包层光纤-单模的微纳结构作为激光系统的滤波器和传感元件并将其用于折射率和温度的研究。利用微纳光纤制备微纳光纤结、微纳光纤环、微纳光纤圈等谐振腔结构,可以实现多波锁模^[19-20]。Zhao等^[21]在微纳光纤表面光学沉积石墨烯,在掺铋光纤环腔中实现了双波耗散孤子锁模。Ma等^[22]制备了一种石墨烯修饰的微纳光纤,并将其用于掺铟锁模光纤激光器中产生传统的孤子和类噪声脉冲。

稀土钷元素在磁光材料、磁致冷材料、微波技术、荧光粉、原子能工业和新型催化剂等方面有特殊用途^[23]。硝酸钷的配合物在医药、防腐剂、抑菌剂、农药等方面具有广泛的实用价值^[24],如硝酸钷($\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)的氨基酸配合物对人体具有抗菌(大肠杆菌、金黄色葡萄菌)作用^[25]。硝酸钷溶液可用作控制核电站连锁反应级别的抑制剂,其主要作用是吸收核反应堆的中子,减弱核反应的强度,保证核反应的安全^[26-27]。硝酸钷化合物具有光电特性,在光电调制、光纤探测、激光信号全息储存等领域引起了人们的兴趣^[28-29]。本文将基于双锥微纳光纤干涉仪与掺铟光纤环形腔相结合,搭建了基于双锥微纳光纤干涉仪结构的激光传感系统。将微纳光纤干涉仪结构作为光学带通滤波器和传感单元,可提高激光传感器的灵敏度和精度。对折射率和硝酸钷溶液的测量结果表明,随着光纤直径的减小,基于微锥结构的微纳光纤传感器对折射率的测量灵敏度有显著提高,对于硝酸钷溶液的质量浓度,该传感器的灵敏度高达 $0.172 \text{ nm}/(\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1})$ 。

2 传感器的原理与仿真

光在阶跃光纤中传输时满足全反射条件,光被束缚在纤芯内传输,且在纤芯和包层的分界面会产生一种倏逝波,部分光会以倏逝波的形式在光疏介质里传输。光强随着传输距离的增加呈指数形式变化,其相位随切向方向的变化而变化。倏逝波的场强^[30]可表示为

$$E = E_0 \exp\left(\frac{-\sigma}{z_p}\right), \quad (1)$$

式中: E_0 为入射光强度; σ 为强场到界面的垂直距离。 z_p 为倏逝波的透射深度,会影响场强的衰减速度,可表示为

$$z_p = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{n_{\text{co}}^2 \sin^2 \theta - n_{\text{cl}}^2}}, \quad (2)$$

式中: n_{co} 和 n_{cl} 分别为纤芯和包层的折射率; λ 为入射光的波长; θ 为入射光与法线之间的夹角。

微纳光纤传感器主要由标准光纤区域、过渡区域(过渡区 I 和过渡区 II)和锥腰区域 3 部分组成,如图 1 所示。其中: d 为锥腰直径; L 为锥腰区域的长度。

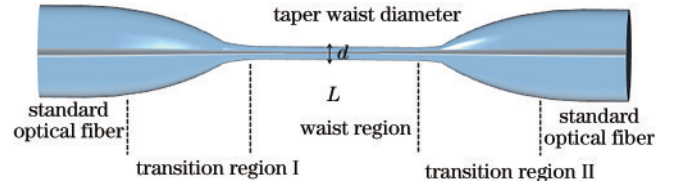


图 1 微纳光纤传感器的结构

Fig. 1 Structure of the micro-nano fiber sensor

对于标准阶跃光纤,光基本被束缚在纤芯内,很难到达包层。但随着微纳光纤直径不断减小,倏逝场作用越来越强,纤芯会泄漏部分光在包层中传输。当光从锥型过渡区进入锥腰的纤芯时,纤芯模与包层模发生耦合,从而发生干涉。纤芯与包层之间的有效折射率差以及纤芯与包层之间的光程差会导致相位差^[31],可表示为

$$\delta = \frac{2\pi L}{\lambda} \cdot (n_{\text{co}} - n_{\text{cl}}^j), \quad (3)$$

式中: n_{cl}^j 为第 j 阶包层模的有效折射率。忽略损耗的情况下,干扰强度^[32]可表示为

$$I = I_{\text{co}} + \sum_j I_{\text{cl}}^j + \sum_j 2\sqrt{I_{\text{co}} I_{\text{cl}}^j} \cos \delta, \quad (4)$$

式中: I_{co} 和 I_{cl}^j 分别为芯模和第 j 阶包层模的强度。当外界周围介质的折射率变化时,会使纤芯模和包层模有效折射率发生变化,导致相位发生变化,考虑到模式色散,可将折射率灵敏度^[30]定义为

$$\frac{\partial \lambda}{\partial n_{\text{ex}}} = \frac{\lambda}{\Delta n_{\text{c}}} \frac{\partial n_{\text{c}}}{\partial n_{\text{ex}}} \left/ \left(1 - \frac{\lambda}{\Delta n_{\text{c}}} \frac{\partial \Delta n_{\text{c}}}{\partial \lambda}\right)\right., \quad (5)$$

式中: Δn_{c} 为基模与高阶模的有效折射率差。外界折射率发生改变时,会得到一个新的有效折射率差 $\Delta n_{\text{c}}'$,且 $\partial \Delta n_{\text{c}} = \Delta n_{\text{c}}' - \Delta n_{\text{c}}$ 。可以发现,传感器的折射率灵敏度主要由色散因子 $\left(1 - \frac{\lambda}{\Delta n_{\text{c}}} \frac{\partial \Delta n_{\text{c}}}{\partial \lambda}\right)$ 、基模与高阶模的折射率差 (Δn_{c}) 、有效折射率差与环境折射率 (n_{ex}) 变化量的比 $(\partial \Delta n_{\text{c}} / \partial \Delta n_{\text{ex}})$ 决定,即外界周围介质的折射率变化会引起波长的漂移。

采用光束传播方法(BPM)对双锥结构微纳光纤干涉仪进行数值仿真分析。模拟参数:基于二维(2D)模型,在 X 和 Z 方向的网格尺寸分别为 $0.1 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$;对于边界条件,在模型中采用了完全匹配层(PML)条件;单模光纤的纤芯和包层直径分别为 $8.2 \mu\text{m}$ 和 $125 \mu\text{m}$,对应的折射率分别为 1.4507 和 1.4428;双锥结构中间微纳光纤长度和拉锥过渡区域分别设置为 12 mm 和 7 mm 。图 2(a)为该结构在环境折射率为 1.34 时的传输光谱。可以发现,传输光谱中存在

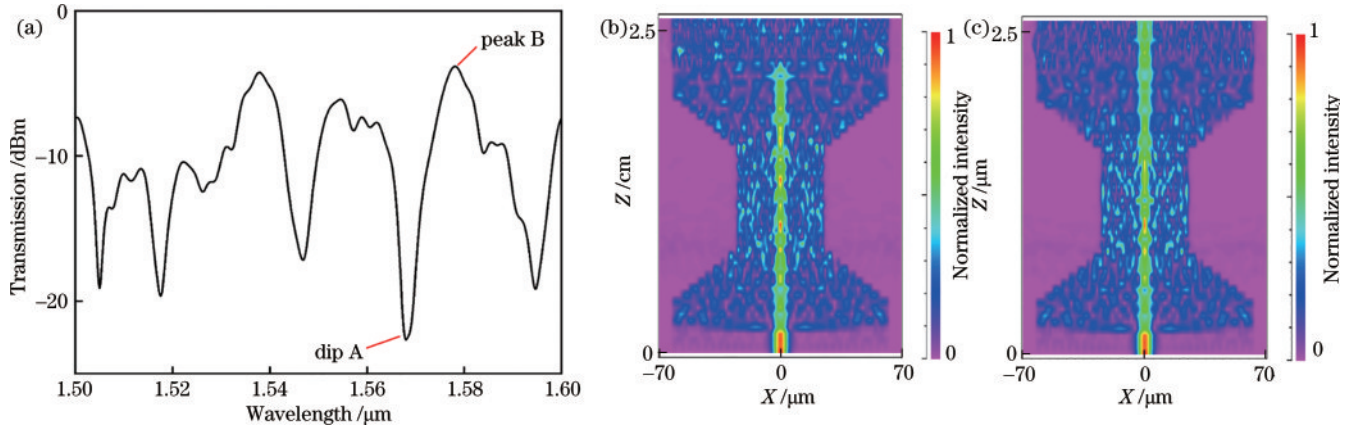


图 2 双锥微纳光纤结构的光谱。(a)环境折射率为 1.34 时的干涉光谱图;(b) dip A 的光场传输图;(c) peak B 的光场传输图
Fig. 2 Spectra of the double-tapered micro-nano fiber structure. (a) Interference spectrum when the ambient refractive index is 1.34; (b) optical field transmission diagram of the dip A; (c) optical field transmission diagram of the peak B

明显的干涉光谱现象。图 2(b)和图 2(c)分别表示在干涉波谷(dip A)和干涉波峰(peak B)处的传输光场分布。

3 传感器的制作

基于微锥结构的微纳光纤的制作:首先用剥线钳

剥掉一段单模光纤 4.5 cm 长的涂覆层;然后在相距 1.5 cm 的地方制作两个锥点。在锥点处,利用熔接机的自动熔接模式进行放电,其中,功率设置为 100 bit,放电时间为 2000 ms,两个锥点的锥径均为 80 μm ,如图 3 所示。

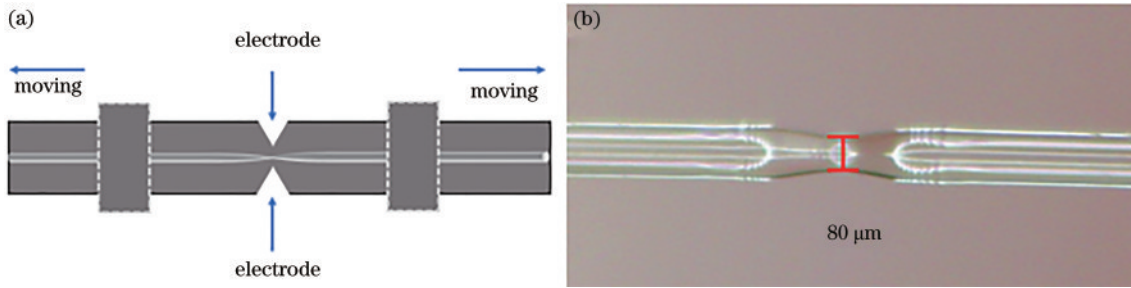


图 3 微纳光纤的结构。(a)制作示意图;(b)显微镜下的微锥点
Fig. 3 Structure of micro-nano fiber. (a) Schematic diagram of fabrication; (b) microcone point under microscope

利用自主搭建的光纤熔融拉锥系统,利用电热陶瓷加热器高温加热双微锥光纤,制备微纳光纤干涉仪,

如图 4 所示。分别制备拉锥直径分别为 125、50、20 μm 的光纤干涉仪结构,分别记为 M_1 、 M_2 、 M_3 ,然后将其加

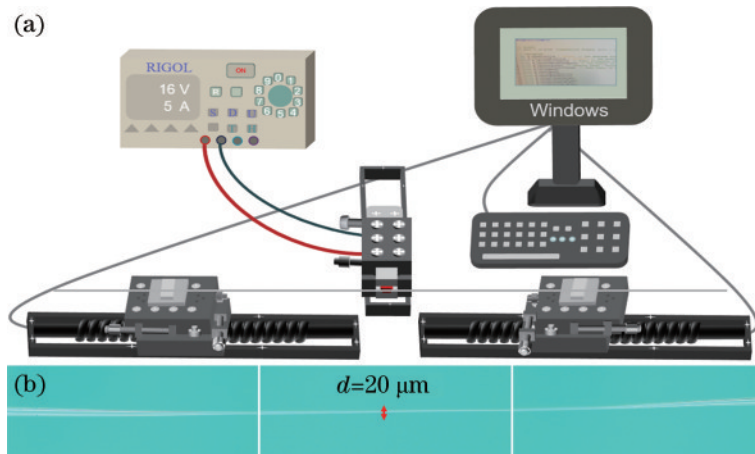


图 4 微纳光纤干涉仪的制作。(a)微纳光纤拉锥平台;(b)直径为 20 μm 的微纳光纤显微镜视图
Fig. 4 Fabrication of micro-nano fiber interferometer. (a) Micro-nano fiber taper platform; (b) micro-nano fiber microscope view with a diameter of 20 μm

入光纤激光器系统对其折射率传感性能进行测试分析。

4 实验结果

整个环形腔激光器的系统结构如图 5 所示。980 nm 泵浦光 (VLSS-980-B-650-FA, VENUS) 通过 980/1550 nm 波分复用器 (WDM) 注入环形腔。用 5 m 长的掺铒光纤 (EDF, 纤芯直径为 8 μm , 包层直径为 125 μm , Nufern) 作为增益介质。环形腔内装置了光隔

离器 (PI-ISO), 以保证单向传播, 使用 10:90 光耦合器 (OC) 从 10% 端口提取激光输出, 剩余的 90% 重新注入环形腔。此外, 在环形腔内加入偏振控制器 (PC) 调节偏振状态。基于双锥的微纳光纤干涉结构可作为滤波器和传感元件, 当折射率、硝酸钆溶液作用于微纳传感元件时, 折射率的变化会引起光相位变化, 进而调制激光谐振腔的参数, 改变输出的激光波长。利用光谱分析仪 (OSA, MS9710C, Anritsu) 监测输出激光光束的波长。

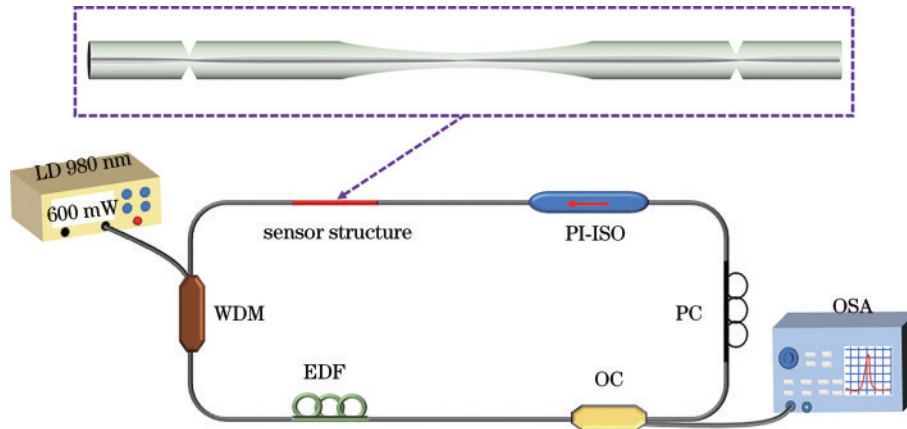


图 5 光纤环形激光器的结构

Fig. 5 Structure of the fiber ring laser

图 6(a) 为泵浦功率为 95 mW 时环形腔的原始正激泵浦放大自发发射光 (ASE) 光谱以及输出的激光光谱, 图 6(b) 为基于双锥的微纳光纤结构在 1550~1565 nm 处的透射光谱。可以发现, 在闭环腔中, 利用 PC 调节环形腔的偏振相关损耗 (PDL), 当具有滤波特性的干涉仪插入饱和 EDF 环形腔时, 相应的滤波器峰值得到循环累积增益并在谐振腔中放大, 实现了单波长窄线宽的激光输出。此外, 光纤激光传感系统的输出光谱的 3 dB 带宽小于 0.1 nm。

图 7 为折射率和硝酸钆溶液测量的实验装置示意图。用该装置对微纳激光传感系统进行折射率测试, 实验中始终保持泵浦功率和 PC 不变, 对三种不同拉锥直径的传感器 M_1 、 M_2 、 M_3 进行折射率响应测试, 折射率测量在室温下 (20 $^{\circ}\text{C}$) 进行。图 8(a)~(c) 为折射率响应光谱图, 其中 3 dB 带宽小于 0.1 nm。可以发现, 未经过拉锥的 M_1 传感器随着折射率溶液质量浓度的不断增加, 输出激光出现逐渐蓝移, 折射率灵敏度为 $-12.695 \text{ nm}/\text{RIU}$, 拟合系数 R^2 为 0.9943, 如图 7(d)

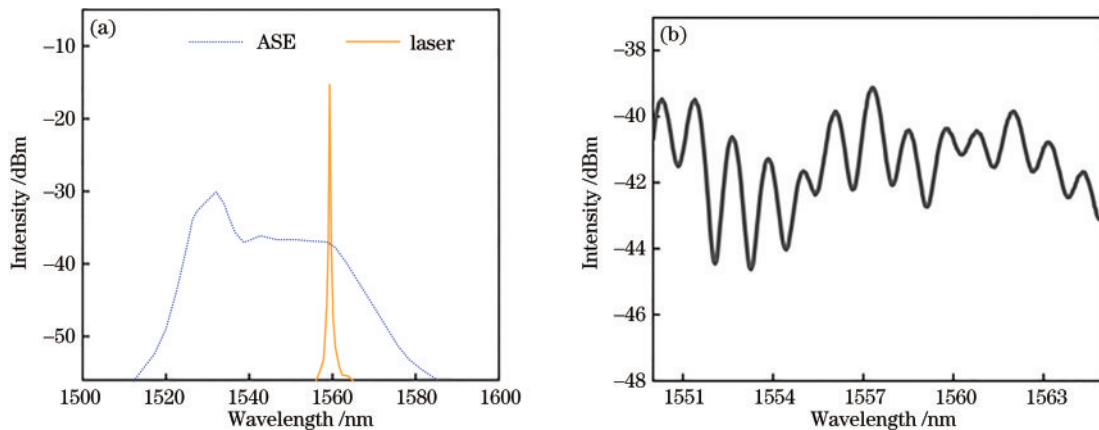


图 6 光纤光谱图。(a) 掺铒光纤的 ASE 光谱和激光光谱; (b) 微纳干涉仪的透射光谱

Fig. 6 Fiber spectrogram. (a) ASE spectrum and laser spectrum of erbium-doped fiber; (b) transmission spectrum of micro-nano fiber interferometer

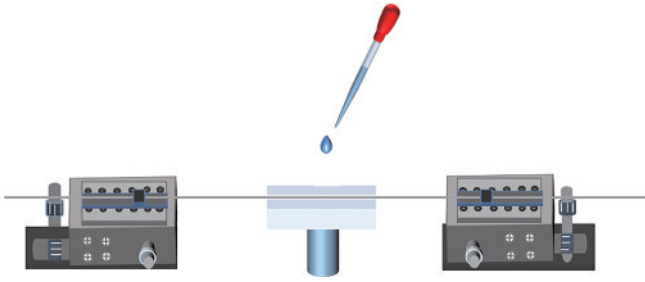


图 7 折射率和硝酸钆溶液测量的实验装置示意图

Fig. 7 Diagram of experimental setup for measuring refractive index and gadolinium nitrate solution

所示。经过拉锥的 M_2 、 M_3 传感器随着折射率液质量浓度的增加, 输出激光出现红移现象, 在折射率增加时,

高阶模式的指数增量大于基阶模式, 此时 $\partial \Delta n_c / \partial \Delta n_{ex}$ 为负值, 因此波长随着折射率 (RI) 的增加而发生红移。图 8(e) 和图 8(f) 为对应的折射率响应线性拟合图。可以发现, 传感器 M_2 和 M_3 的折射率灵敏度分别为 228.002 nm/RIU 和 1925.078 nm/RIU, 拟合系数 R^2 分别为 0.993 和 0.996, 不同微纳光纤直径的波长偏移量与外界折射率之间均有较好的线性关系。实验结果表明, 随着光纤直径的减小, 折射率灵敏度明显增加。原因是当微纳光纤直径减小时折射率指数差 Δn_c 增加。整个折射率测量过程中峰值功率稳定, 是因为折射率溶液质量浓度增加引起的吸收损失可以通过工作在饱和增益状态的掺铒光纤进行补偿, 所以激光光谱有规则的波长漂移而不是明显的功率波动。

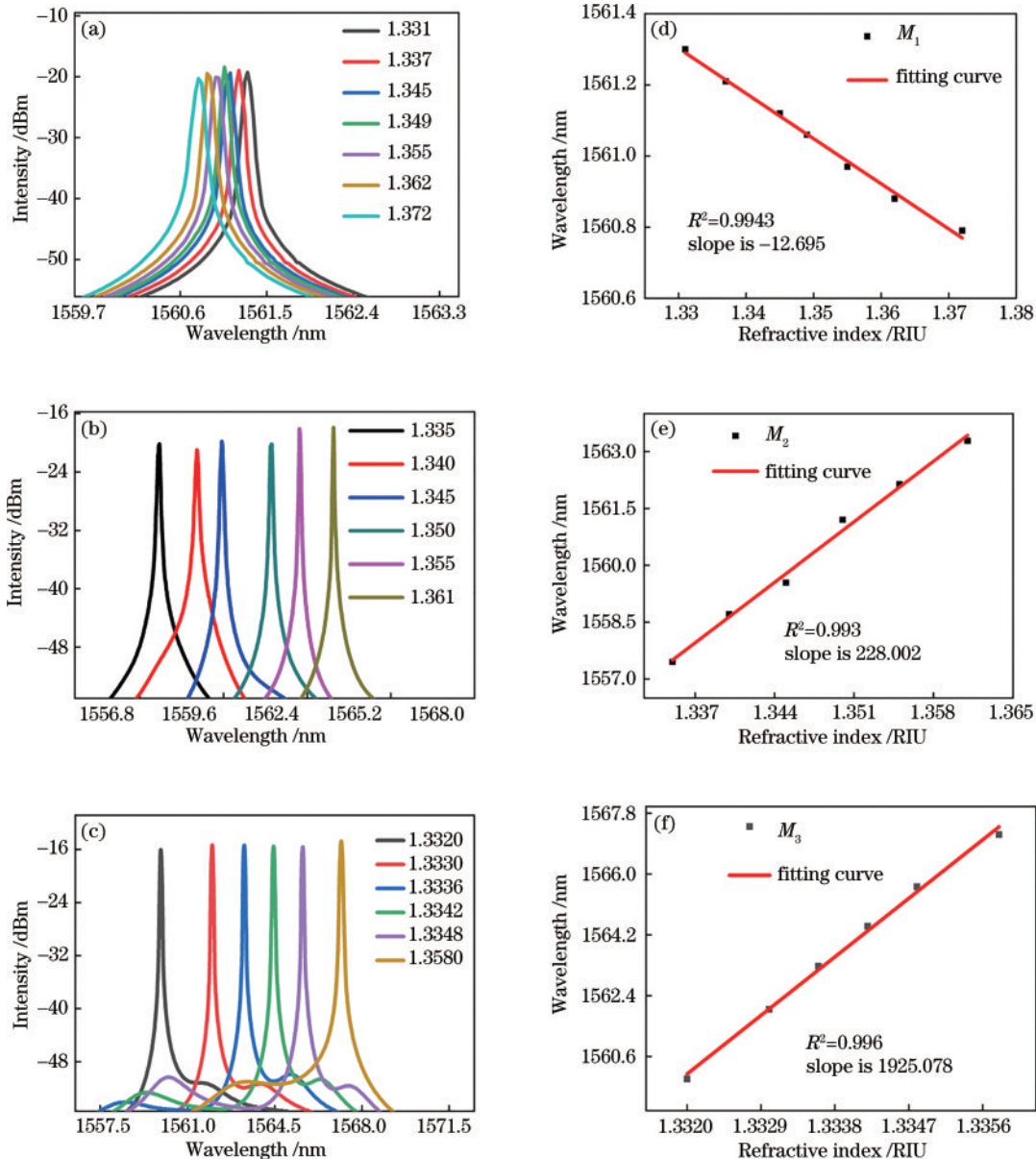


图 8 不同直径微纳光纤的折射率传感曲线。(a)~(c)直径分别为 125, 50, 20 μm 的折射率响应光谱;(d)~(f)直径分别为 125, 50, 20 μm 的传感曲线

Fig. 8 Refractive index sensing curves of micro-nano fibers with different diameters. (a)~(c) Refractive index response spectra with diameters of 125, 50, and 20 μm, respectively; (d)~(f) sensing curves with diameters of 125, 50, and 20 μm, respectively

拉锥直径为 $20\ \mu\text{m}$ 的传感器 M_3 对折射率有着较高的灵敏度,因此,用其对硝酸钆溶液(GaNS)进行灵敏度响应测试,硝酸钆溶液测量在室温下($20\ ^\circ\text{C}$)进行。图 9(a)为硝酸钆溶液响应光谱图。可以发现,随着硝酸钆溶液质量浓度的增加,输出激光的中心波长向长波方

向漂移,峰值功率稳定在 $-15\ \text{dBm}$ 附近,表明该系统具有较好的稳定性。图 9(b)为其对应的折射率响应线性拟合图。可以发现,传感器 M_3 的硝酸钆溶液灵敏度为 $0.172\ \text{nm}/(\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1})$,且拟合度 R^2 可以达 0.95,波长偏移量与硝酸钆溶液外界之间有良好的线性关系。

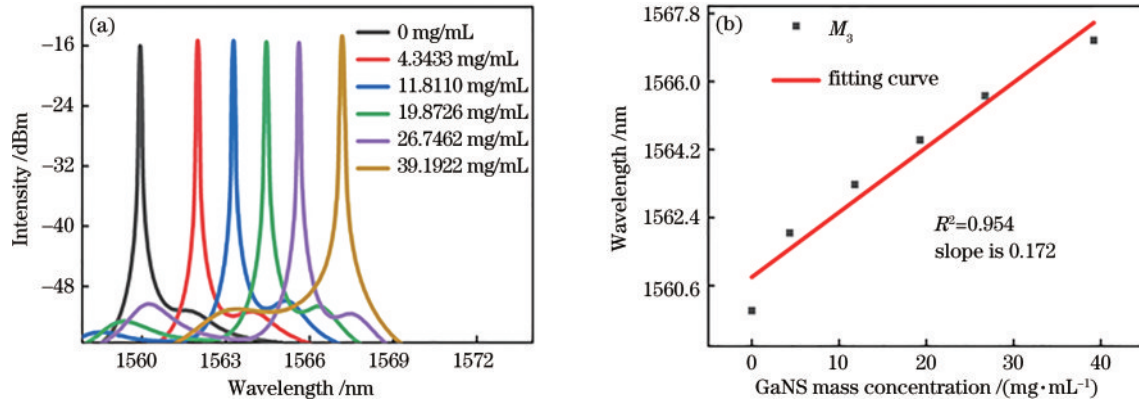


图 9 硝酸钆溶液质量浓度的灵敏度检测。(a)响应光谱;(b)传感曲线

Fig. 9 Sensitivity detection of mass concentration of gadolinium nitrate solution. (a) Response spectra; (b) sensing curve

5 结 论

将微纳光纤干涉仪与掺铒光纤环形激光器相结合,设计和搭建了基于双锥的微纳光纤激光传感系统。由于微纳光纤的强倏逝波有效地增强与外界环境的相互作用,随着光纤直径的减小显著提升了折射率灵敏度。实验结果证明,环形激光腔内得到了稳定平滑的干涉光谱,产生了小于 $0.1\ \text{nm}$ 的 $3\ \text{dB}$ 带宽,使激光传感系统具有较高的测量分辨率和精度。用直径为 $20\ \mu\text{m}$ 的微纳光纤时,环境折射率灵敏度和硝酸钆溶液的质量浓度灵敏度可分别达 $1925\ \text{nm}/\text{RIU}$ 和 $0.172\ \text{nm}/(\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1})$ 。该微纳激光传感器具有灵敏度高、结构紧凑等优点,在生物修饰和化学传感等方面有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 刘江, 徐佳, 王潜, 等. 高能量全光纤结构被动锁模 $2.0\ \mu\text{m}$ 掺铥超短脉冲光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602009.
Liu J, Xu J, Wang Q, et al. High-pulse-energy passively mode-locked $2.0\ \mu\text{m}$ thulium-doped ultrafast all-fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(6): 0602009.
- [2] 杨铁山, 王秀红, 孙若愚, 等. 基于耗散孤子共振的纳秒脉冲掺铒全光纤激光器及其倍频[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0302006.
Yang T S, Wang X H, Sun R Y, et al. Ytterbium-doped nanosecond-pulsed all-fiber laser based on dissipative soliton resonance and its frequency-doubling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0302006.
- [3] 董自凯, 宋晏蓉. 光纤激光器被动锁模技术研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501006.
Dong Z K, Song Y R. Research progress of mode-locked fiber lasers based on saturable absorbers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501006.
- [4] 钟义晖, 张祖兴, 陶向阳. 被动锁模光纤激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(8): 46-51.
Zhong Y H, Zhang Z X, Tao X Y. Research progress of passively mode-locked fiber laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(8): 46-51.
- [5] Liu J X, Wang M G, Liang X, et al. Erbium-doped fiber ring laser based on few-mode-singlemode-few-mode fiber structure for refractive index measurement[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 93: 74-78.
- [6] Bai X K, Fan D F, Wang S F, et al. Strain sensor based on fiber ring cavity laser with photonic crystal fiber in-line Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4): 6801608.
- [7] Zhao Y, Cai L, Li X G. In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on up-taper fiber structure with Er3 doped fiber ring laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(15): 3475-3481.
- [8] Liu X J, Zhang X D, Yang J R, et al. Dual-ring dual-wavelength fiber laser sensor for simultaneous measurement of refractive index and ambient temperature with improved discrimination and detection limit[J]. Applied Optics, 2019, 58(27): 7582-7587.
- [9] Cai L, Zhao Y, Li X G. A fiber ring cavity laser sensor for refractive index and temperature measurement with core-offset modal interferometer as tunable filter[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 242: 673-678.
- [10] Liu Z B, Tan Z W, Yin B, et al. Refractive index sensing characterization of a singlemode-claddingless-singlemode fiber structure based fiber ring cavity laser[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5037-5042.
- [11] Li K, Xia L, Yi H, et al. Optical active fiber sensing technique based on the lasing wavelength demodulation for monitoring the human respiration and pulse[J].

- Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 296: 45-51.
- [12] Liu D, Ngo N Q, Tjin S C, et al. A dual-wavelength fiber laser sensor system for measurement of temperature and strain[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(15): 1148-1150.
- [13] Wo J H, Jiang M, Malnou M, et al. Twist sensor based on axial strain insensitive distributed Bragg reflector fiber laser[J]. Optics Express, 2012, 20(3): 2844-2850.
- [14] Ames G H, Maguire J M. Erbium fiber laser accelerometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(4): 557-561.
- [15] Guan B O, Tam H Y, Lau S T, et al. Ultrasonic hydrophone based on distributed Bragg reflector fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(1): 169-171.
- [16] 杜焱, 陈哲, 余健辉, 等. 耦合型微纳光纤偏振滤光器研究[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0610002.
Du Y, Chen Z, Yu J H, et al. All micro-fiber polarization filter based on evanescent field coupling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(6): 0610002.
- [17] 赵浙明, 吴平辉, 隋成华. 基于白光干涉的新型微纳光纤传感器[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2001-2004.
Zhao Z M, Wu P H, Sui C H. A novel microfiber sensor based on white light interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2001-2004.
- [18] Liang L J, Ren G B, Yin B, et al. Refractive index and temperature sensor based on fiber ring laser with STCS fiber structure[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(21): 2201-2204.
- [19] 文静. 可调谐双波长微纳光纤激光器的研究[J]. 激光杂志, 2017, 38(11): 23-26.
Wen J. Study on tunable dual wavelength micro-nano fiber laser[J]. Laser Journal, 2017, 38(11): 23-26.
- [20] 蔡宇, 钱禹豪, 万洪丹, 等. 基于微纳光纤环的多波长锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0901001.
Cai Y, Qian Y H, Wan H D, et al. Multiwavelength mode-locked fiber laser based on micro-fiber loop[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0901001.
- [21] Zhao N, Liu M, Liu H, et al. Dual-wavelength rectangular pulse Yb-doped fiber laser using a microfiber-based graphene saturable absorber[J]. Optics Express, 2014, 22(9): 10906-10913.
- [22] Ma W Z, Yin P, Li M M, et al. Graphdiyne-decorated microfiber based soliton and noise-like pulse generation[J]. Nanophotonics, 2021, 10(16): 3967-3977.
- [23] 胡超, 吴喆, 向莉丽, 等. 钆配合物的合成及光电性能的研究[J]. 化学试剂, 2017, 39(10): 1088-1090, 1107.
Hu C, Wu Z, Xiang L L, et al. Synthesis, luminescence and electrochemical properties of gadolinium complex[J]. Chemical Reagents, 2017, 39(10): 1088-1090, 1107.
- [24] 张阳玲, 邱立, 曾慧玲, 等. 不对称大环配体硝酸钆(III)三元配合物的合成与表征[J]. 武汉工程大学学报, 2008, 30(4): 39-41.
Zhang Y L, Qiu L, Zeng H L, et al. The synthesis and characterization of a new asymmetric gadolinium (III) nitrate with a macrocyclic ligand[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2008, 30(4): 39-41.
- [25] 郁志勇, 宋迪生, 赵续民. 硝酸钆-氨基酸配合物对细菌生长的影响[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1998, 28(5): 397-400.
Yu Z Y, Song D S, Zhao X M. The influences of complexes of $Gd(NO_3)_3$ with amino acids on the growth of germs[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 1998, 28(5): 397-400.
- [26] Verma P, Ramakumar K L. Ion chromatographic determination of traces of sodium, magnesium and chlorine in gadolinium nitrate[J]. Analytical Letters, 2009, 42(14): 2141-2156.
- [27] 王慧波, 游兆金, 刘祖洁, 等. 重水堆核电站硝酸钆纯度验收方法和实践[J]. 稀土, 2019, 40(4): 134-139.
Wang H B, You Z J, Liu Z J, et al. Practice of acceptance check of gadolinium nitrate purity in heavy water nuclear power plant[J]. Chinese Rare Earths, 2019, 40(4): 134-139.
- [28] Vijayalakshmi V, Dhanasekaran P, Ganesan N M. Influence of rare earth gadolinium nitrate addition on structural, dielectric, linear and nonlinear optical properties of glycine single crystals[J]. Journal of Crystal Growth, 2018, 493: 30-33.
- [29] Chen K F, Ren J W, Zhao C, et al. High-sensitivity fiber-optic X-ray detectors employing gadolinium oxysulfide composites[J]. Optics Express, 2021, 29(14): 22578-22592.
- [30] 张敏, 傅海威, 丁继军, 等. 基于熔融拉锥的高灵敏干涉型微光纤氨气传感器[J]. 光子学报, 2018, 47(3): 0306002.
Zhang M, Fu H W, Ding J J, et al. High sensitivity interferometric microfiber ammonia sensor based on optical fiber taper[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(3): 0306002.
- [31] Wang D D, Jiang Y F, Geng X, et al. Study of asymmetric biconical fiber tapers for in-fiber Mach-Zehnder interferometers and applications in single-frequency fiber lasers[J]. Optics Express, 2021, 29(10): 14384-14393.
- [32] 程君妮. 基于光纤锥和纤芯失配的 Mach-Zehnder 干涉湿度传感器[J]. 物理学报, 2018, 67(2): 024212.
Cheng J N. Mach-Zehnder interferometer based on fiber taper and fiber core mismatch for humidity sensing[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(2): 024212.