

微纳光纤布拉格光栅折射率与浓度传感器研究进展

彭星玲^{1*}, 李兵¹, 李玉龙²¹南昌工程学院机械与电气工程学院, 江西省精密驱动与控制重点实验室, 江西 南昌 330099;²南昌大学机电工程学院, 江西省机器人与焊接自动化重点实验室, 江西 南昌 330031

摘要 微纳光纤布拉格光栅(MNFBG)的强倏逝场传输和波长选择的光学特性使 MNFBG 对周围介质折射率与浓度的变化具有较高的灵敏度和可靠性。阐述了 MNFBG 的制备方法,并分析了 MNFBG 折射率与浓度传感原理。对 MNFBG 应用于折射率与浓度传感的研究进展进行了综述。总结了提高 MNFBG 折射率与浓度传感灵敏度的方法,分析了目前 MNFBG 研究存在的问题,展望了 MNFBG 折射率与浓度传感器的发展方向。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 微纳光纤布拉格光栅; 折射率传感; 浓度传感

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.120010

Research Progress of Refractive Index and Concentration Sensors Based on Micro-Nanofiber Bragg Grating

Peng Xingling^{1*}, Li Bing¹, Li Yulong²¹Jiangxi Provincial Key Laboratory of Precision Drive & Control, Mechanical & Electrical Engineering School, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330099, China;²Key Laboratory for Robot & Welding Automation of Jiangxi Province, Mechanical & Electrical Engineering School, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China

Abstract Micro-nanofiber Bragg grating (MNFBG) is highly sensitive and reliable to the changes of refractive index and concentration of the surrounding media due to its strong evanescent field propagation and wavelength-selective optical properties. The fabrication methods of MNFBG are illustrated, and the sensing principle of refractive index and concentration is analyzed. In addition, a research progress of refractive index and concentration sensors based on MNFBG is reviewed. Moreover, the methods for improving the sensing sensitivity of refractive index and concentration based on MNFBG are summarized, the existing problems in the current research are analyzed, and the development direction of refractive index and concentration sensors based on MNFBG is prospected.

Key words fiber optics; fiber sensors; micro-nanofiber Bragg grating; refractive index sensing; concentration sensing

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 230.3990

1 引言

微纳光子学是以微光子器件为基础的新型前沿学科。微纳光纤的尺寸在微米或纳米量级,是构成微光子器件的基本结构单元之一。微纳光纤由于具有尺寸微小、倏逝波传输能力强、波导色散大等特性,在光纤传感领域具有极高的应用价值。微纳光纤传感器除具备传统光纤传感器的优点,如灵敏度

高、响应度快、抗电磁干扰、耐腐蚀、防爆、可靠性高和易远程操作控制等外,还具有结构紧凑、成本低和对样品需求量少等优势^[1-2]。由微纳光纤制成的折射率与浓度传感器对外界环境折射率与浓度变化非常敏感,可实现各种生物、化学样品的在线检测。尤其是微纳光纤布拉格光栅(MNFBG),它结合了微纳光纤强倏逝场传输特性和光纤光栅强波长选择特性,对于溶液或气体的折射率与浓度的检测可达到

收稿日期: 2018-06-15; 修回日期: 2018-06-26; 录用日期: 2018-07-12

基金项目: 江西省教育厅科技项目(GJJ171007)、江西省重点研发项目(20171BBE50009)

* E-mail: pengxingling0223@163.com

极高的测量精度和分辨率^[3-4]。MNFBG 传感器作为微纳光子学的一个重要部分,越来越受到全世界研究者的关注与青睐。本文简要介绍了 MNFBG 的制备方法、折射率与浓度传感原理,综述了 MNFBG 在折射率与浓度传感领域的研究进展,分析了该领域存在的问题,并对微纳光纤布拉格光栅折射率与浓度传感器的发展方向进行了展望。

2 MNFBG 的制备方法和基本传感原理

普通的光纤布拉格光栅(FBG)由于其存在较厚的包层,使得其导模光场被束缚在纤芯内部,难以与外界介质相互作用,其反射谐振波长对外界环境折射率或浓度的变化不敏感,难以应用于折射率或浓度传感。为此,须减小 FBG 的包层厚度,甚至去掉包层,减小部分纤芯的厚度,以增强光场与环境介质的相互作用。本节介绍了 MNFBG 的制备方法、折射率与浓度的传感原理。

2.1 MNFBG 的制备方法

目前制备 MNFBG 的方法可分为三类。第一类是先通过拉锥工艺制作微纳光纤,然后对微纳光纤进行紫外光(UV)照射^[5]、飞秒激光照射^[6]或聚焦离子束铣削^[7]写入成栅,此类方法制作的 MNFBG 较为均匀、柔韧性好。但是,该方法的布拉格共振是通过在微纳光纤中引入折射率调制的结构损伤来实现的,且需要昂贵精密的实验仪器及超净实验室,制作成本和工艺要求高。其中,UV 写入微纳光纤成栅法的示意图如图 1 所示。第二类是直接利用氢氟酸(HF)腐蚀掉 FBG 部分包层或者部分纤芯而制成 MNFBG。这种方法的优点是制作成本低、操作简单,该方法也是目前很多实验室常采

用的制作方法。但是,该方法难以精准控制刻蚀深度和均匀性,过度刻蚀易引起 MNFBG 机械强度低,致使其在应用过程中容易损坏。腐蚀后 MNFBG 性能受光纤表面形貌影响,控制光纤表面形貌和直径可有效地控制其性能。此外,HF 有剧毒、易挥发,可经口鼻、皮肤进入人体,具有较大的危害性,实验人员需要采取严格的防护措施来保证操作安全^[8]。腐蚀法制作 MNFBG 的示意图如图 2 所示。第三类是目前最新的双光子 3D 打印(TPP),学名为双光子聚合光固化成形技术,是世界上精密度最高的 3D 打印技术,能够在微纳光纤上打印出纳米级的光栅结构。Wang 等^[9]首次报道了在光敏树脂中通过 TPP 技术制造微纳光纤布拉格光栅的新方法,其所设计的光栅与微纳光纤的表面一起聚合,形成的微纳光纤布拉格光栅具有很高的强度,能够激发布拉格共振,并成功应用于液体折射率(RI)的测量。此方法是在光纤上或光纤中聚合的,具有许多其他功能结构,这为 MNFBG 在其他潜在传感领域的应用提供了可能。但与前面两种方法相比,该方法制成的光纤尺寸略大,一般为微米级。双光子聚合光固化成形技术制作 MNFBG 的示意图如图 3 所示。

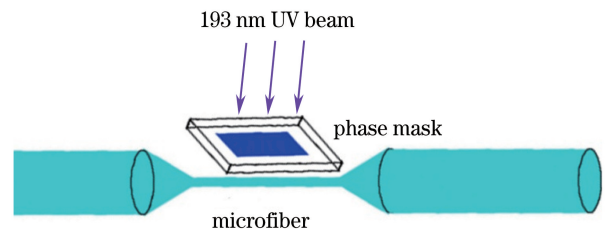


图 1 紫外光写入微纳光纤成栅法示意图
Fig. 1 Schematic of UV laser Bragg grating written within microfiber

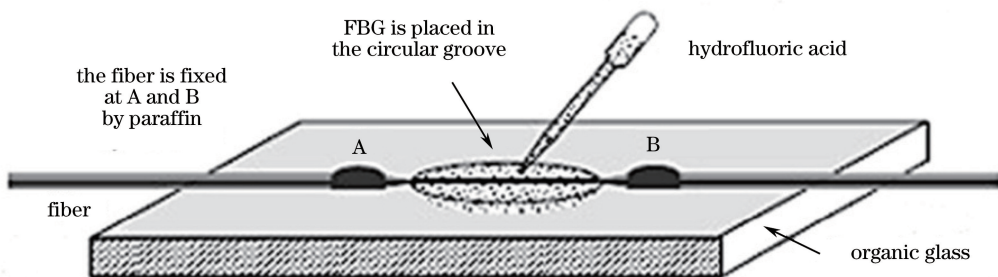


图 2 腐蚀法制作微纳光纤布拉格光栅示意图
Fig. 2 Schematic of fabrication of micro-nanofiber Bragg grating by etching

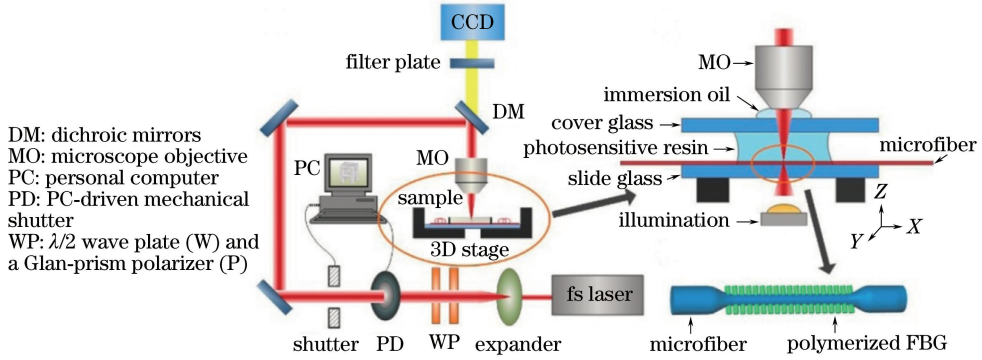


图3 双光子聚合光固化成形技术制作微纳光纤布拉格光栅示意图

Fig. 3 Schematic of fabrication of micro-nanofiber Bragg grating by two-photon polymerization

2.2 MNFBG 折射率与浓度传感原理分析

MNFBG 折射率与浓度传感的基本原理为:当 MNFBG 周围介质的折射率、浓度等发生变化时,微纳光纤中传输的部分光波将以倏逝波的形式在周围介质中传输,导致光纤布拉格光栅纤芯的有效折射

率发生变化,从而产生布拉格反射峰值波长漂移。通过检测布拉格反射峰值波长漂移即可获得周围介质的折射率、浓度的变化量。MNFBG 的工作原理示意图如图 4 所示。

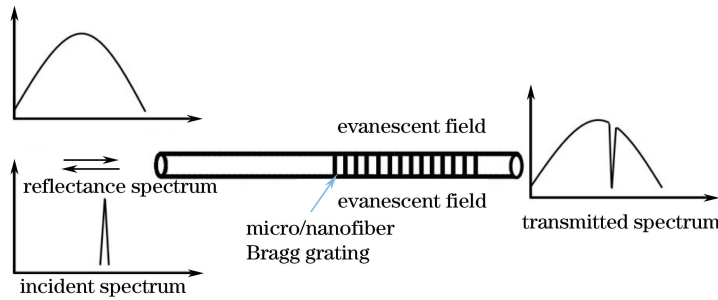


图4 MNFBG 的工作原理示意图

Fig. 4 Working principle of MNFBG

由耦合模理论可知,均匀周期 MNFBG 反射峰中心波长(布拉格波长)满足^[10]

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中: n_{eff} 为纤芯的有效折射率; Λ 为光栅周期。

由(1)式可知,MNFBG 反射峰中心波长是随 n_{eff} 和 Λ 改变的。MNFBG 所处外界介质的折射率发生变化,可导致 MNFBG 纤芯的有效折射率 n_{eff} 发生变化。波长漂移的幅度 $\Delta\lambda_B$ 与纤芯有效折射率的改变量 Δn_{eff} 的关系为^[10]

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda. \quad (2)$$

根据光纤波导理论,单模微纳光纤纤芯导模的有效折射率为^[11]

$$n_{\text{eff}}^2 = n_1^2 - \left(\frac{U}{V}\right)^2 (n_1^2 - n_2^2), \quad (3)$$

式中: V 为光纤归一化频率, $V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$; U 为光纤横向传播常数, $U = a \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2}$; a 为纤芯半径; n_1 为纤芯折射率; n_2 为环境包层折射率; k_0 为

光的波数; β 为纤芯导模传播常数。采用 Gauss 场近似对光纤 LP_{01} 模的本征方程进行化简^[11],可得单

模光纤 LP_{01} 基模的 U - V 关系为 $U = \frac{(1+\sqrt{2})V}{1+(4+V^4)^{1/4}}$,

将该式代入(3)式,则 MNFBG 导模有效折射率为

$$n_{\text{eff}}^2(n_2, a) = n_1^2 - \left[\frac{(1+\sqrt{2})}{1+(4+V^4)^{1/4}} \right]^2 (n_1^2 - n_2^2). \quad (4)$$

将有效折射率对环境包层求导可得有效折射率 n_{eff} 随环境包层折射率 n_2 变化的灵敏度 k_n 为

$$k_n = \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_2} = \frac{n_2 (1+\sqrt{2})^2}{n_{\text{eff}} [1+(4+V^4)^{1/4}]^3} \times \left[1+(4+V^4)^{1/4} - \frac{V^4 (n_1^2 - n_2^2)}{(4+V^4)^{3/4}} \right], \quad (5)$$

其中下角标 n 表示折射率。于是可得

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda \cdot k_n \cdot \Delta n_2 = K \cdot \Delta n_2, \quad (6)$$

式中: Δn_2 为环境包层的折射率变化量; K 为

MNFBG 的谐振波长随环境折射率变化的灵敏度。 K 是栅格周期 Λ 和有效折射率随环境包层折射率变化的灵敏度 k_n 的函数, 而 k_n 取决于纤芯半径 a 和环境包层折射率 n_2 。当某种已知待测液体或气体的浓度发生变化时, 其折射率也会改变, 一般情况下折射率 n_2 与其质量浓度 C 呈线性变化。设折射率变量 Δn_2 与浓度变量 ΔC 之间的系数为 k_c , 则

$$\Delta n_2 = k_c \cdot \Delta C, \quad (7)$$

式中: k_c 取决于气体或液体的种类。将(7)式代入(6)式可得

$$\Delta \lambda_B = K \cdot k_c \cdot \Delta C = K_C \cdot \Delta C. \quad (8)$$

根据(8)式可知, 只要确定 K 与 k_c 就可以分析谐振波长随物质浓度变化的灵敏度 K_C 。此外, 由于 FBG 对温度较为敏感, 温度变化会引起反射谐振波长漂移, 从而造成折射率或者浓度的测量误差。设由温度变化引起的谐振波长的变化为 λ_T , 由环境折射率或浓度变化引起的谐振波长变化为 λ_n , 则有 $\lambda_B = \lambda_n + \lambda_T = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ 。通过分析 MNFBG 的谐振波长随温度的变化, 就可以对 MNFBG 谐振波长随环境折射率或浓度的变化进行修正, 得到 MNFBG 谐振波长随环境折射率或浓度变化的灵敏度的准确值。

3 MNFBG 折射率与浓度传感器研究现状

目前关于 MNFBG 折射率与浓度传感器的理论与实验研究尚处于实验室研究阶段, 本文分别就 MNFBG 折射率、浓度、温度补偿方法和一些其他微纳光纤折射率传感器的研究现状进行综述。

3.1 MNFBG 折射率传感器研究现状

1998年, 瑞典斯德哥尔摩皇家物理研究所的 Asseh 等^[12]最早采用腐蚀光纤包层的方法实现了折射率传感, 并理论计算出外界折射率非常接近包层折射率时传感器的折射率分辨率可达到 4.6×10^{-6} RIU, 其中 RIU 为单位折射率。此后, 意大利萨尼奥大学的 Iadicicco 等^[13]将 MNFBG 应用于折射率传感实验, 制作了高分辨率折射率传感器, 在折射率为 1.333 和 1.45 附近时, 分辨率分别高达 10^{-4} RIU 和 10^{-5} RIU。2006年, 东南大学崔一平等^[14]实验研究了包层部分腐蚀后的 FBG 在不同折射率的介质中不同阶次包层模共振的变化特性, 其中三阶包层模共振的折射率灵敏度可达 172 nm/RIU, 但低阶模的折射率较低。2007年, 浙江大学的童利民等^[15-16]通过求解 Maxwell 方程组, 计算了各阶模

式传播常数随光纤直径变化的关系, 给出了微纳光纤纤芯以及包层的电场、磁场分量以及能量的分布情况。此外, 童利民等基于圆形微粒 Rayleigh-Gans 散射模型分析了微纳光纤的倏逝场与微粒的相互作用情况。2009年, 湖南大学的文双春等^[17]通过解析复本征方程, 计算出包层的增益系数和复数模参数, 为包层增益的微纳光纤的设计提供了一定的理论依据。香港理工大学的 Fang 等^[18]通过飞秒激光器在微纳光纤上刻写 FBG 制成了 MNFBG 折射率传感器, 该传感器具有较高折射率灵敏度和可靠性。随后, 华中科技大学的张新亮等^[19]从理论上推导了 MNFBG 的传输模型, 由理论上分析可知, MFBG 折射率灵敏度随着光纤光栅的直径减小而增大, 相同直径时高阶模产生的反射峰变化比低阶模式大, 灵敏度较高。在较大折射率范围内, 光纤光栅的折射率输出特性曲线是非线性的。该研究为 MNFBG 折射率传感的应用做了理论铺垫。上海交通大学的余小草等^[20]对多种直径下 MNFBG 的反射谱进行了仿真与测量, 结果表明: 随着 MNFBG 的直径减小, 有效折率先迅速减小后缓慢变小, 从而引起光纤光栅的中心波长漂移和反射率降低。直径为 25.9 μm 的 MNFBG 的 3 dB 带宽仅为 0.3 nm, 可用于 WDM 信道滤波和高灵敏度生物传感。2011年, 华中科技大学的梁瑞冰等^[3]提出一种高精度的 MNFBG 折射率传感器, 并分析了其制备的可行性。梁瑞冰等的模拟分析结果表明 MNFBG 折射率灵敏度随着光纤直径的减小而增大, 其中光纤直径为 800 nm 的 MNFBG 灵敏度可达 993 nm/RIU, 相比于包层蚀刻的 FBG 灵敏度增加了 170 倍。2016年, Shih 等^[21]建立了基于 MNFBG 的液体折射率测量系统, 实现了精度为 0.01, 最大折射率为 1.45 的折射率测量, 该传感器对于食品工业中废油的鉴定具有潜在价值。随后, 关柏鸥等^[22]研制了基于微波光子滤波器的高分辨率和温度补偿型的人表皮生长因子受体 2 (HER2) 抗原生物传感器。关柏鸥等将 MNFBG 和普通 FBG 分别用于 HER2 抗原-抗体特异性结合检测和温度补偿, 进行了分辨率高达 2.45×10^{-6} RIU 的生物传感检测。新加坡南洋理工大学的 Tan 等^[23]将乙二醇四乙酸 (EDFA) 涂覆到 FBG 末端制成了一种新型超级结构的 MNFBG 末端传感器。该传感器能够检测液体和气体折射率的变化, Tan 等对水中质量浓度高于 10 mg/L 的重金属镉离子进行了检测。

3.2 MNFBG 浓度传感器研究现状

重庆理工大学的赵明富等^[24]将腐蚀后的 FBG 用于蔗糖溶液折射率与浓度的测量,采用质量分数为 0%~68%蔗糖溶液作为实验研究对象,该 FBG 在 1.3330~1.4586 的折射率范围内获得的最大折射率灵敏度为 605 nm/RIU。2011 年,南京大学的王光辉等^[25]分析了 MNFBG 对生物蛋白质的敏感性,结果表明该传感器可用于生物传感方向。同年,童利明等^[26]制作了直径为 1.8 μm 的 MNFBG,并对不同浓度甘油溶液进行了测定,其灵敏度为 660 nm/RIU。2013 年,国防科技大学的卫正统等^[27]将 MNFBG 应用于盐水浓度的测量,在折射率为 1.33 处分辨率高达为 10^{-5} RIU。该研究为 MNFBG 用于其他常见液体的浓度测量进行了铺垫。东北大学的吴朝霞等^[28]推导并实验验证了带包层光纤布拉格光栅结构模型,获得了布拉格波长对化学溶液浓度的敏感特性,实现了不同浓度的蔗糖、乙醇和 NaCl 溶液的测量。关柏鸥等^[29]指出 MNFBG 传感器具有低刚度和小尺寸的优势,并采用钽涂覆 MNFBG 气体传感器来检测氢气的浓度。由于倏逝场与涂覆的钽膜之间的相互作用,当将钽涂覆 MNFBG 气体传感器暴露于氢气体积分数为 5% 的空气中时,直径为 3.3 μm 的光栅的反射峰偏移了 1.08 nm,由此产生的波长偏移是传统单模光纤中的 26 倍。采用上述方法,关柏鸥等实现了气体浓度的高灵敏度测量。电子科技大学的吴宇等^[30]将 MNFBG 涂覆石墨烯制成气体浓度传感器,并将该气体传感器用于检测氨气的浓度。该气体传感器对氨气十分敏感,当 MNFBG 的直径为 10 μm 时,灵敏度为 6×10^6 pm,比无石墨烯涂覆的气体传感器的灵敏度提高了数十倍。武汉理工大学的杨明红等^[31-32]分别设计制作了基于 Pd/Ni 共溅射涂层和 Pt-WO₃ 纳米薄层的 MNFBG 氢气传感器。这类传感器对氢气浓度的响应较快,传感性能优于标准 FBG 的氢气传感器。印度卡纳塔克大学的 Raikar 等^[33-35]利用刻蚀法制成了 MNFBG 浓度传感器,并用该传感器检测了饮用水中镉(质量浓度低至 0.01 mg/L)、氟化物(质量浓度低至 0.05 mg/L)以及处理过的糖厂废水中氯化物和铅离子的浓度,为饮用水的检测提供了一种新方法。

3.3 MNFBG 温度补偿方法研究现状

MNFBG 对温度较为敏感。温度的变化会引起光纤光栅的有效折射率和光栅周期发生变化,从而引起布拉格反射波长的改变,故 MNFBG 折射率传

感器存在折射率和温度交叉敏感问题。在精密测量以及温度变化较大的场合,必须考虑温度补偿以提高 MNFBG 的测量精度。2004 年,葡萄牙的 Pereira 等^[36]采用腐蚀后的双 FBG 实现了温度和折射率的同时测量,腐蚀后的 FBG 对折射率灵敏度为 7.3 nm/RIU。这种方法原理简单,一般需要在同一根光纤上制作周期或谐振波长不同的两个 FBG。此后,暨南大学的冉洋等^[37]通过使用准分子激光器制作出了温度补偿型 MNFBG 折射率传感器。实验发现:MNFBG 直径越小,光波导在 MNFBG 中传输时形成的模式阶次越高,其对外界物质折射率变化响应越敏感。西安建筑科技大学的张伟等^[38]研究了温度对 MNFBG 波长的影响,建立了基于基模有效折射率变化的反射波长漂移的 MNFBG 理论模型,发现随着环境温度的升高,MNFBG 有效折射率逐渐减小,反射峰值波长向短波方向漂移,尤其是当 MNFBG 直径小于 1 μm 时,反射峰值波长的温度灵敏度与周围液体的热光系数成正比。2015 年,马来亚大学 Lim 等^[39]制作了可同时测量折射率和温度的少模光纤光栅。该光纤光栅的直径为 14.1 μm ,其反射谱中产生了两个布拉格反射峰值波长,通过监测这两个峰值波长的变化实现了环境折射率和温度的同时测量。宁波工程学院的赵洪霞等^[40-41]开展了微纳光纤光栅的折射率与温度传感特性的研究。赵洪霞等采用双微纳光纤光栅传感器,消除了温度引起的折射率测量误差的因素。后来,西安石油大学的刘颖刚等^[42-43]建立了 MNFBG 折射率传感理论模型,并进行了温度修正,数值模拟并分析了光纤有效折射率随纤芯直径和环境折射率的变化规律。刘颖刚等发现在较大折射率范围内 MNFBG 存在非线性输出,并提出按区间划分灵敏度的方法,结果显示:在 1.20~1.30 RIU 和 1.33~1.43 RIU 范围内,折射率灵敏度分别为 477.33 nm/RIU 和 856.30 nm/RIU。该方法为 MNFBG 折射率传感器的优化设计提供了理论依据。2018 年,刘颖刚等^[44]采用微加工的方法制成了双 Fabry-Perot FBG (FP-FBG) 复合光纤干涉传感器。该传感器可同时测量极小液体环境中折射率和温度的变化,分辨率可达 1.0×10^{-5} RIU 和 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。华中科技大学的 Xiang 等^[45]设计了一种基于级联微纳光纤法布里-珀罗干涉仪(MFPI)的准分布光纤传感器,并用于同时测量折射率和温度。该准分布式双参数传感系统对监测化学和生物传感应用中的梯度参数变化具有重要意义。巴西的 Fernandes

等^[46]推导了一个简单的非线性方程,以描述光纤布拉格光栅折射计中温度和折射率之间的交叉敏感特性,该方程适合将布拉格波长描述为温度和折射率的函数。葡萄牙波尔图大学的 Gomes 等^[47]使用飞秒激光和相位掩模干涉仪制作了突变锥形光纤光栅。该锥形光纤光栅激发了具有不同有效折射率的导模,这些导模在不同的波长处被反射,研究人员可利用两次测量的反射峰的波长偏移之间的差异来实现与温度无关的折射率测量。该结构的交叉灵敏度为 2.0×10^{-5} RIU/°C,可用于温度补偿。

3.4 其他微纳光纤折射率传感器研究现状

浙江工业大学的吴平辉等^[48]建立了微纳光纤的 Mach-Zehnder 模型,给出折射率灵敏度计算公式,还对白光干涉微纳光纤传感进行了实验研究,所研制的传感器灵敏度高达 3665 nm/RIU。暨南大学的关柏鸥等^[49]采用啁啾光纤布拉格光栅的波谱变化来测量液体折射率。他们将啁啾布拉格光栅部分浸入液体中以充当宽带法布里-珀罗干涉仪,其光谱可以通过控制液体位置和环境折射率来调节。关柏鸥等^[50]设计了基于表面等离子体共振的纳米级镀金倾斜光纤布拉格光栅折射率传感器,在折射率从 1.3330 到 1.3410 变化的蔗糖溶液中进行实验。实验结果表明:分别使用波长和光强调制方法获得的折射率灵敏度分别为 450 nm/RIU 和 2040 dB/RIU,采用光强调制的传感器更经济,其灵敏度也更高。2017 年,关柏鸥等^[51]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温度对折射率的串扰。关柏鸥等研究了矩形保偏微纳光纤在溶液中的折射率响应特性,发现随着折射率的增大,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,两个偏振态对应光谱的响应度基本相同。2018 年,关柏鸥等^[52]又设计了一种基于相移 MNFBG 探针的心肌钙蛋白 I(cTn-I)免疫传感器。调制中的相移引起的良好的反射信号显著改善了光谱分辨率,使得传感器能够感知由于特异性捕获 cTn-I 抗原而导致的超小折射率变化,传感器灵敏度高达 0.03 ng/mL。该传感器在心脏生物标志物和急性心肌梗死等疾病临床前诊断的“即时检测”中具有广阔前景。西北工业大学的姜碧强等^[53]采用碳纳米管涂覆 MNFBG 测量环境折射率。碳纳米管层的引入影响 MNFBG 的倏逝场并导致反射光谱的改变,碳纳米管涂覆 MNFBG 在 1.333~1.435 的低折射率范围内表现出较高的灵敏度,峰值强度高达 -53.4 dBm/RIU,比未涂覆碳纳米管的

MNFBG 高出 15 倍。美国弗吉利亚理工大学的 Yang 等^[54]通过红外飞秒激光在大直径蓝宝石光纤中制造了一种微型蓝宝石光纤布拉格光栅,并用湿热酸蚀刻法获得了直径为 9.6 μm 的光纤光栅,实现了 1~1.75 大折射率范围和从室温到 1400 °C 大温度范围的测量。

4 结束语

本文从 MNFBG 制作方案、折射率与浓度传感原理以及温度补偿方法的理论和实验分析等方面总结了国内外 MNFBG 折射率与浓度传感器的研究进展。笔者发现 MNFBG 不仅能够检测蔗糖、盐水、氨气和氢气等常规液体或气体的折射率与浓度,而且能够检测饮用水中极其微量(低至 0.01 mg/L)的镉等重金属的浓度。MNFBG 亦可制成对生物体损伤极小的微纳生物探针,通过检测血液中心肌钙蛋白 I(质量浓度低至 0.03 ng/mL)等的含量,实现对急性心肌梗死(AMI)等疾病的临床前诊断的“即时检测”。这是其他折射率与浓度传感器难以媲美的,在生物和化学等领域具有独特的优势和应用前景。此外,对 MNFBG 的折射率与浓度传感特性和研究中发现的问题进行了总结,结论如下:

1) MNFBG 传感器的折射率灵敏度和分辨率随着 MNFBG 直径的减小而增大。通过减小 FBG 的直径,尤其是纤芯的直径,MNFBG 传感器的折射率灵敏度可提高到 1000 nm/RIU,分辨率可提高到 10^{-6} RIU,甚至更高。直径相同时高阶模产生的反射峰变化比低阶模式大,灵敏度更高,但反射峰值波长与折射率之间存在一定的非线性,一般只能在较小范围内实现线性传感。

2) MNFBG 浓度传感器的灵敏度较高,通过涂覆石墨烯、Pd/Ni 等能增强 MNFBG 对某些气体或溶液的敏感性,但主要用于某一种单一气体或液体浓度的测量。

3) 微纳光纤光栅主要成分是石英,化学性质稳定,除氢氟酸等强酸外,几乎不受酸碱液体的侵蚀,可重复性强,能够作为非一次性传感器长期使用。但是,MNFBG 微纳表面会吸附待测物质,易污染传感器。每次测量后都需要采用超声波清洗仪等装置及时将传感器清洗干净,以避免传感器被待测物的污染,避免影响下次测量结果的准确性。

4) 与 FBG 相比,MNFBG 能获得极高的折射率与浓度灵敏度,获得微小的尺寸,但仍存在温度、折射率或浓度交叉敏感效应、机械强度低及抗疲劳

性能差等问题。

因此,今后研究 MNFBG 折射率传感有待解决的问题有:1)如何提高 MNFBG 的机械强度和抗疲劳性能,提高其使用寿命;2)如何消除温度与折射率或浓度交叉敏感效应;3)研究一种能同时测量多种气体或液体浓度的新型涂覆方法,提高 MNFBG 对生物、化学等领域某些物质的敏感性;4)如何改善非线性问题,扩大折射率的测量范围。针对这些问题,国内外许多科研人员正在采取各种方案对其系统研究。本课题组正在针对采用金属化涂覆的方法提高 MNFBG 机械强度、增强液体折射率与浓度传感性能等问题进行深入研究。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
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.
- [3] Liang R B, Sun Q Z, Wo J H, *et al.* Theoretical investigation on refractive index sensor based on Bragg grating in micro/nanofiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10): 104221.
梁瑞冰, 孙琪真, 沃江海, 等. 微纳尺度光纤布拉格光栅折射率传感的理论研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(10): 104221.
- [4] Jia Z A, Duan W W, Liu X, *et al.* Study on the refractive index sensing property of micro/nano dispersion compensation fiber Bragg grating [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2017, 39(6): 886-888.
贾振安, 段维维, 刘鑫, 等. 微纳色散补偿光纤光栅的折射率传感特性研究[J]. *压电与声光*, 2017, 39(6): 886-888.
- [5] Ran Y, Jin L, Tan Y N, *et al.* High-efficiency ultraviolet inscription of Bragg gratings in microfibers [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(1): 181-186.
- [6] Ahmed F, Jun M B G. Bragg grating fabrication in microfiber by femtosecond pulse filamentation induced periodic refractive index modification [C]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9350: 93500C.
- [7] Nayak K P, Le Kien F, Kawai Y, *et al.* Cavity formation on an optical nanofiber using focused ion beam milling technique [J]. *Optics Express*, 2011, 19(15): 14040-14050.
- [8] Zhong N B, Liao Q, Zhu X, *et al.* Fiber Bragg grating with polyimide-silica hybrid membrane for accurately monitoring cell growth and temperature in a photobioreactor [J]. *Analytical Chemistry*, 2014, 86(18): 9278-9285.
- [9] Wang J, Lin C P, Liao C R, *et al.* Bragg resonance in microfiber realized by two-photon polymerization [J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 3732-3737.
- [10] Rao Y J, Wang Y P, Zhu T. The principle and application of fiber grating [M]. Beijing: Science Press, 2006.
饶云江, 王义平, 朱涛. 光纤光栅原理及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [11] Liao Y B. Fiber optics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
廖延彪. 光纤光学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [12] Asseh A, Sandgren S, Ahlfeldt H, *et al.* Fiber optical Bragg grating refractometer [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 1998, 17(1): 51-62.
- [13] Iadicicco A, Cusano A, Campopiano S, *et al.* Thinned fiber Bragg gratings as refractive index sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, 5(6): 1288-1295.
- [14] Chen N, Yun B F, Cui Y P. Cladding mode resonances of etch-eroded fiber Bragg grating for ambient refractive index sensing [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(13): 133902.
- [15] Tong L M, Hu L L, Zhang J J, *et al.* Photonic nanowires directly drawn from bulk glasses [J]. *Optics Express*, 2006, 14(1): 82-87.
- [16] Wang S S, Pa X Y, Tong L M. Modeling of nanoparticle-induced Rayleigh-Gaussian scattering for nanofiber optical sensing [J]. *Optics Communications*, 2007, 276(2): 293-297.
- [17] Zheng Z W, Ren W H, Zhao C J, *et al.* Guiding and far-field radiation characteristics of micro/nano optical fibers [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(5): 497-499, 502.
郑之伟, 任卫红, 赵楚军, 等. 微纳光纤的导波及远场辐射特性 [J]. *激光技术*, 2009, 33(5): 497-499, 502.
- [18] Fang X, Liao C R, Wang D N. Femtosecond laser fabricated fiber Bragg grating in microfiber for

- refractive index sensing[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(7): 1007-1009.
- [19] Zhang Y, Lin B, Tjin S C, *et al.* Refractive index sensing based on higher-order mode reflection of a microfiber Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26345-26350.
- [20] Yu X C, Jiang W N, Zhang Y, *et al.* Research on microfiber-based Bragg gratings fabricated by ultraviolet-light exposure[J]. *Optical Communication Technology*, 2011, 35(2): 25-27.
余小草, 姜文宁, 张英, 等. 基于紫外光刻的微纳光纤布喇格光栅研究[J]. *光通信技术*, 2011, 35(2): 25-27.
- [21] Shih M C, Yang H H, Shih C H. Measurement of the index of refraction of an liquid by a cladding depleted fiber Bragg grating [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, 48(2): 1-6.
- [22] Cao Y, Wang X D, Guo T, *et al.* High-resolution and temperature-compensational HER2 antigen detection based on microwave photonic interrogation [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 245: 583-589.
- [23] Tan R X, Yap S H K, Tan Y C, *et al.* Functionalized fiber end superstructure fiber Bragg grating refractive index sensor for heavy metal ion detection[J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1821.
- [24] Zhao M F, Huang D Y, Luo B B, *et al.* Evanescent wave sensors based on fiber Bragg grating [J]. *Journal of Chongqing University of Technology*, 2010, 24(10): 46-50.
赵明富, 黄德翼, 罗彬彬, 等. 光纤 Bragg 光栅倏逝波传感器[J]. *重庆理工大学学报*, 2010, 24(10): 46-50.
- [25] Wang G H, Shum P P, Ho H P, *et al.* Modeling and analysis of localized biosensing and index sensing by introducing effective phase shift in microfiber Bragg grating (μ FBG)[J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8930-8938.
- [26] Liu Y X, Meng C, Zhang A P, *et al.* Compact microfiber Bragg gratings with high-index contrast [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3115-3117.
- [27] Wei Z T, Jiang N, Song Z Q, *et al.* KrF excimer laser-fabricated Bragg grating in optical microfiber made from pre-etched conventional photosensitive fiber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(4): 040603.
- [28] Wu Z X, Yu X Y, Gu E D, *et al.* Characteristics analysis of chemical concentration sensor based on three-layer FBG [J]. *Optics and Photonics Journal*, 2013, 3(2): 268-271.
- [29] Yu Z P, Jin L, Chen L J, *et al.* Microfiber Bragg grating hydrogen sensors [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(24): 2575-2578.
- [30] Zhang A Q, Wu Y, Yao B C, *et al.* Optimization study on graphene-coated microfiber Bragg grating structures for ammonia gas sensing [J]. *Photonic Sensors*, 2015, 5(1): 84-90.
- [31] Wang G P, Yang M H, Dai J X, *et al.* Microfiber Bragg grating hydrogen sensor base on co-sputtered Pd/Ni composite film[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2015, 9655: 965513.
- [32] Zhou X, Dai Y T, Liu F F, *et al.* Highly sensitive and rapid FBG hydrogen sensor using Pt-WO₃ with different morphologies [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(7): 2652-2658.
- [33] Raikar U S, Lalasangi A S, Akki J F, *et al.* Cd concentration sensor based on fiber grating technology [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 161(1): 818-823.
- [34] Jadhav M S, Laxmeshwar L S, Akki J F, *et al.* Fluoride contamination sensor based on optical fiber grating technology [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 38: 136-141.
- [35] Laxmeshwar L S, Jadhav M S, Akki J F, *et al.* Elemental analysis of wastewater effluent using highly sensitive fiber Bragg grating sensor [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 105: 45-51.
- [36] Pereira D A, Frazao O, Santos J L. Fiber Bragg grating sensing system for simultaneous measurement of salinity and temperature[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(2): 299-304.
- [37] Ran Y, Jin L, Sun L P, *et al.* Temperature-compensated refractive-index sensing using a single Bragg grating in an abrupt fiber taper [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(2): 7100208.
- [38] Zhang W, Liu Y G, Zhou H. Theoretical investigation on the temperature characteristics of liquid-cladding micro/nanofiber Bragg grating [J]. *Journal of Modern Optics*, 2014, 61(13): 1097-1102.
- [39] Yang H Z, Ali M M, Islam M R, *et al.* Cladless few mode fiber grating sensor for simultaneous refractive index and temperature measurement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 228: 62-68.
- [40] Zhao H X, Ding Z Q, Cheng P H, *et al.* Spectral characteristics of single layer fiber Bragg grating[J].

- Acta Photonica Sinica, 2016, 45(3): 0306004.
- 赵洪霞, 丁志群, 程培红, 等. 单层结构光纤布拉格光栅光谱特性研究 [J]. 光子学报, 2016, 45(3): 0306004.
- [41] Wang L, Zhao H X, Ding Z Q, *et al.* Research on the sensing characteristics of high sensitivity refractive index of micro/nano dual-FBG [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26(7): 1284-1287. 王啦, 赵洪霞, 丁志群, 等. 微纳双FBG高灵敏度折射率传感特性研究 [J]. 光电子 • 激光, 2015, 26(7): 1284-1287.
- [42] Liu Y G, Che F L, Jia Z A, *et al.* Investigation on the characteristics of micro/nanofiber Bragg grating for refractive index sensing [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(10): 104218. 刘颖刚, 车伏龙, 贾振安, 等. 微纳光纤布拉格光栅折射率传感特性研究 [J]. 物理学报, 2013, 62(10): 104218.
- [43] Liu Y G, Zhang W. Temperature characteristics of micro-nanofiber Bragg grating surrounded with liquids [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 040605. 刘颖刚, 张伟. 液体环境中微纳光纤布拉格光栅的温度特性 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 040605.
- [44] Liu Y G, Liu X, Ma C J, *et al.* Micro-structured optical fiber sensor for simultaneous measurement of temperature and refractive index [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 41: 168-172.
- [45] Xiang Y, Luo Y Y, Li Y P, *et al.* Quasi-distributed dual-parameter optical fiber sensor based on cascaded microfiber Fabry-Perot interferometers [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 1-9.
- [46] Fernandes D, Barreto R C, Macedo A G, *et al.* A simple equation to describe cross-sensitivity between temperature and refractive index in fiber Bragg gratings refractometers [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(3): 1104-1110.
- [47] Gomes A D, Silveira B, Warren-Smith S C, *et al.* Temperature independent refractive index measurement using a fiber Bragg grating on abrupt tapered tip [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 101: 227-231.
- [48] 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. 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.
- [49] Xiao P, Liu T, Feng F R, *et al.* Spectral tuning of the diameter-dependent-chirped Bragg gratings written in microfibers [J]. Optics Express, 2016, 24(26): 29749-29759.
- [50] Qiu X H, Chen X Y, Liu F, *et al.* Plasmonic fiber-optic refractometers based on a high Q-factor amplitude interrogation [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(15): 5974-5978.
- [51] Li J, Li M M, Sun L P, *et al.* Polarization-maintaining microfiber-based evanescent-wave sensors [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 074209. 李杰, 李蒙蒙, 孙立朋, 等. 保偏微纳光纤倏逝场传感器 [J]. 物理学报, 2017, 66(7): 074209.
- [52] Liu T, Liang L L, Xiao P, *et al.* A label-free cardiac biomarker immunosensor based on phase-shifted microfiber Bragg grating [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2018, 100: 155-160.
- [53] Jiang B Q, Xue M, Zhao C Y, *et al.* Refractometer probe based on a reflective carbon nanotube-modified microfiber Bragg grating [J]. Applied Optics, 2016, 55(25): 7037-7041.
- [54] Yang S, Homa D, Pickrell G, *et al.* Fiber Bragg grating fabricated in micro-single-crystal sapphire fiber [J]. Optics Letters, 2018, 43(1): 62-65.