

· 综述 ·

光纤布拉格光栅折射率传感研究进展

刘颖刚, 车伏龙, 傅海威, 赵娜, 邵敏

(西安石油大学 陕西省光电传感测井重点实验室, 西安 710065)

摘要:在介绍短周期光纤光栅(FBG)和微纳光纤布拉格光栅(MNFBG)折射率传感原理的基础上,围绕如何提高FBG折射率传感灵敏度,详细论述了腐蚀法和抛磨法两种折射率传感技术方案的研究进展,对比分析了两种方案的优缺点。同时综述了微纳光纤和微纳光纤光栅应用于折射率传感的研究现状,指出了目前研究所面临的技术难题与解决方案,展望了FBG折射率传感技术的发展趋势,可为进一步开展基于光纤光栅器件的折射率传感研究提供参考。

关键词:光纤光栅;微纳光纤;折射率;微纳光纤光栅;灵敏度

中图分类号:TP212.4

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2015)-01-0001-07

Research Progress of Fiber Bragg Grating Refractive Index Sensing

LIU Ying-gang, CHE Fu-long, FU Hai-wei, ZHAO Na, SHAO Min

(Key Laboratory of Photoelectric Sensing Logging in Shanxi Province, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on the introduction of sensing principles of short-period fiber Bragg grating (FBG) and micro-nano fiber Bragg grating (MNFBG) refractive index and how to improve FBG refractive index sensing sensitivity, the research progress of two refractive index sensing technology schemes such as etching and polishing methods are described in detail. The advantages and disadvantages of the two schemes are compared and analyzed. The research status of micro-nano fiber and fiber grating used in refractive index sensing is summarized. The technology problems and solution schemes on current research are proposed and the development trend of FBG refractive index sensing technology is forecasted, which provide a reference for further research on refractive index sensing based on fiber grating devices.

Key words: fiber grating; micro/nano fiber; refractive index; micro-nano fiber Bragg grating; sensitivity

物质折射率的测量在基础研究、化学分析、环境污染评估、医疗诊断和食品工业、生物传感等领域有着广泛的应用。国内外在这方面做了大量的研究,提出了光纤迈克耳涉仪检测法、光纤法布里—珀罗(F-P)法、光纤传感检测法、表面等离子体波共振法、线阵CCD几何信息调制法等^[1-2]。但是这些方法中有的测量范围受到限制,有的要求对被测样品进行加工,有的仪器调整复杂,仪器价格昂贵,且无法进行多点同时测量。为了寻求一种价格低廉、操作简单和可同时进行多点并行测量的折射率传感器,由

于光纤光栅传感器不仅具有高灵敏度、响应速度快、不受电磁干扰以及在易燃易爆等恶劣环境中安全工作优点外,而且还具有体积小、可靠性高以及能够实现在线式实时检测等特点,因此光纤光栅折射率传感器就应运而生。光纤光栅传感器按周期分为:周期为几十至几百微米的长周期光纤光栅(LPG或LPFG)、周期小于1 μm的短周期光纤光栅(FBG)两种。随着微纳光纤^[1-7]的产生,它具有低传输损耗,大比例倏逝波、大波导色散、小尺度等特性,在光纤通信、光纤传感领域具有潜在的应用价值。近年来又

收稿日期:2014-12-05

基金项目:国家自然科学基金(60727004)和陕西省自然科学基金(2013JM8032)资助项目

作者简介:刘颖刚(1977-),男,陕西西安人,副教授,主要从事光纤传感技术等方面研究。

出现了微纳光纤FBG^[2-5],它结合了微纳光纤倏逝场传输的光学特性和光纤光栅强波长选择的特性,波长变化受到外界环境折射率变化的影响,因此可用于溶液折射率的测量,并且具有体积小、测量准确、可靠性高等特点。作为纳米光子学的一个研究领域,微纳光纤光栅折射率传感正受到全世界研究者越来越多的关注。

1 短周期光纤光栅折射率传感器原理

基于耦合模式理论^[8],光纤光栅中周期性折射率调制引起满足相位匹配条件的波长处的模式耦合,光纤布拉格光栅的纤芯基模耦合的共振波长是由下式决定

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

式中, λ_B 为光纤布拉格光栅的纤芯基模耦合的谐振波长; n_{eff} 为纤芯导模的有效折射率; Λ 为光纤光栅周期。 n_{eff} 与光纤的直径和外部折射率有关,外部折射率将引起 n_{eff} 随之发生的变化,由式(1)则进一步引起布拉格中心波长的漂移。在FBG中,模式耦合发生在正向与反向传输的芯层导模中。由于芯层导模的绝大部分能量限制在光纤的芯层中,在光纤外的倏逝波场很小,所以共振波长几乎不受外界折射率影响。通过探测 λ_B 的偏移量就可以对外部折射率进行检测,其测量原理如图1所示。当短周期光栅的直径减小到微纳尺度时,就具有倏逝场传输的光学特性和光纤光栅强波长选择的特性。根据倏逝场的特性可知,微纳尺度的短周期光纤光栅的中心波长易受外界环境的折射率变化的影响。基于微纳光纤FBG的折射率测量原理图如图2所示。为了将FBG应用于折射率传感或提高灵敏度,就必须设法增加光纤外的倏逝波场,使倏逝波与外界介质的相互作用增强。人们提出了HF腐蚀光纤光栅、侧面抛磨的FBG等手段来提高折射率测量灵敏度。

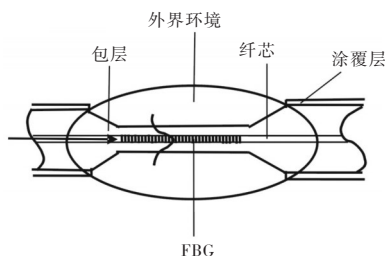


图1 基于FBG的折射率测量原理图

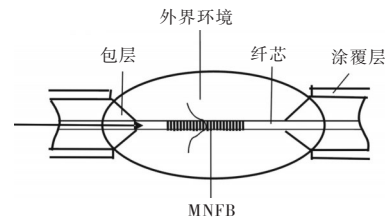


图2 基于MNFBG的折射率测量原理图

2 短周期光纤光栅折射率研究

1978年,加拿大渥太华通信研究中心K·O·Hill等^[9]人首次在掺锗石英光纤中发现光纤的光敏效应,并采用驻波写入法制成世界上第一根光纤布拉格光栅。1989年,美国联合技术研究中心G·Meltz等^[10]人利用UV激光侧面写入技术实现了光纤Bragg光栅(FBG)的制作。1993年,Hill^[11]等人又提出用紫外光垂直照射相位掩膜版形成衍射条纹曝光氢载光纤写入光纤布拉格光栅的相位掩膜法,使得光纤光栅走向实用化和产业化。此方法不仅克服了对光源和环境较高的要求,而且克服了对光源相干长度很严格的要求,还降低了写入装置的复杂度。因此大规模生产光纤光栅得以实现,更是极大地推动了光纤光栅在通信领域和传感领域的应用。在1995年长周期光纤光栅才逐渐应用于折射率传感,随后几年才出现了布拉格光纤光栅应用于折射率传感,一直到现在光纤光栅折射率传感的研究仍是学者关注的热点。

2.1 腐蚀FBG折射率传感研究现状

1998年,Asseh^[12]等最早提出将腐蚀光纤包层的方法用于实现折射率传感测量,理论计算出外界折射率非常接近包层折射率时的灵敏度可达到 4.6×10^{-6} riu。2004年,Dionisio A Pereira^[13]等用双FBG实现了温度和浓度同时测量,FBG腐蚀后对折射率灵敏度为7.3 nm/riu。而后,Athanasios N Chryssis^[14]等将FBG的光纤包层几乎全部腐蚀掉,在1.45和1.33附近的分辨率分别为 10^{-5} 和 10^{-4} 。2005年,Chryssis^[15]等将FBG的光纤直径腐蚀到3.4 μm ,获得1394 nm/riu的高灵敏度倏逝场传感器,这是迄今为止报道FBG折射率传感的最高灵敏度。同年,Agostino Iadicco^[16]等又提出了一种将FBG中间的一小段光纤包层腐蚀掉的微结构FBG,光谱特性会随着外界折射率的变化而变化,当直径被腐蚀到10.5 μm 时,

其对折射率测量分辨率为 4×10^{-5} 。Liang Wei^[17]等提出了全光纤 F-P 干涉仪结构, 具有更窄的干涉条纹便于波长测量, 腐蚀两个 FBG 中间的那段光纤直径为 $1.5 \mu\text{m}$, 可测到 4×10^{-5} 的折射率的微小变化。将多模斜光栅腐蚀到直径为 $12 \mu\text{m}$ 后进行折射率测量, 在 $1.33 \sim 1.442$ 的测量范围内, 对应 $LP_{\infty-\infty}^{0-1}$ 耦合的波长移动为 5.35 nm , 在 1.43 附近灵敏度为 $0.23 \text{ nm}/\%$ ($\%$ 为蔗糖浓度单位)。K Zhou^[18]等利用写在 D 型光纤上的 FBG 进行折射率测量, 不腐蚀几乎对折射率不敏感, 而腐蚀后其折射率变化的灵敏度为 $11 \text{ nm}/\text{riu}$ 。秦颖^[19]通过计算机数值模拟, 给出了理论模拟的光栅反射率和反射波长随腐蚀时间的变化关系图, 对不同化学溶液进行了测试 (甲醇、乙醇、IPA 等溶液), 将腐蚀后的光纤 Bragg 光栅放置在溶液中时, Bragg 光栅的反射波长随折射率的增大往长波方向移动, 反射波长相对折射率的变化量约在 $7.3 \pm 0.3 \text{ nm}$; 通过曲线拟合给出了光纤 Bragg 光栅反射波长随溶液折射率变化的曲线关系图, 验证了光纤 Bragg 光栅的化学敏感性及其理论模拟的正确性。恽斌峰等^[20]将光纤布拉格光栅包层直径腐蚀到十几微米, 采用不同浓度的丙三醇水溶液来改变外界折射率, 测量不同外界折射率对第四阶包层模式的谐振波长偏移的实验, 结果表明, 在接近光纤包层折射率时, 第四阶包层模式有很高的折射率灵敏度 (最大 172 nm)。Na Chen^[21]等人在经典耦合模式理论的基础上, 考虑多模之间的相互作用和优化的三层阶跃折射率光纤结构, 建立了包层腐蚀光纤布拉格光栅 (FBG) 反向包层模共振环境折射率传感的理论模型, 并分析了腐蚀过程和环境折射率改变对谐振模式的影响特性, 用实验验证了理论模型的正确性。徐俊娇^[22]等通过对圆形少模光纤基模之间及基模与 LP_{02} 高阶模之间耦合对应的布拉格波长随外界折射率变化的理论分析和实验测量, 得出采用检测基模与高阶模之间耦合对应的布拉格波长变化的方法和温度有近似相同的特性, 提高传感器对外部折射率变化的灵敏度, 并且通过测量计算这两个布拉格波长移动量的差值消除温度对测量结果的影响。在 2008 年, 陈敏哲^[23]研究了腐蚀对光纤有效折射率的影响、光纤光栅的光谱影响, 腐蚀相移光纤光栅的制作, 提出了相移光纤光栅折射率传感器, 试验多种制作方式和解调方式, 获得了对温度不敏感的折射率传感器。在 $1.33 \sim 1.45$ 范围内, 传感精度在 1.33 左右为 $0.3/\text{nm}$,

在 1.45 左右为 $1/\text{nm}$, 具有很高的可重复性。苗银萍等^[24]研究利用 HF 腐蚀倾斜光纤光栅得到具有不同包层直径时对外界折射率的传感特性, 得出 HF 腐蚀其包层前后的纤芯模式与包层模式具有相同的温度敏感特性, 以纤芯模与任一包层模之间的中心波长差去探测外界环境的改变能够解决温度交叉敏感效应, 还可利用 HF 酸溶液腐蚀包层使得包层直径减小的方法来提高倾斜光纤光栅对外界折射率传感的灵敏度, 而且可以通过不同的腐蚀程度来定制所需要的灵敏度。在 2010 年, 赵明富^[25]等用实验验证 Bragg 波长漂移量与光栅包层直径的关系, 用 HF 腐蚀包层的方法制作出光纤 Bragg 光栅倏逝波传感器, 实现了对化学物质折射率的测量。2011 年, 罗彬彬^[26]等对不同腐蚀深度的高斯切趾 FBG 基模的谐振波长随外界折射率的变化特性进行理论分析和实验测量, 实验结果与理论仿真基本吻合。而后, 罗彬彬^[27]等又研究单端腐蚀 FBG 在低折射率区 (约 $1.333 \sim 1.360$) 的折射率与温度同时测量的理论模型, 分析其主要结构参数对折射率测量的灵敏度和线性度的影响, 建立相应的折射率测量的线性近似和误差分析。2012 年, 曹雪梅^[28]对单端腐蚀 FBG 折射率传感进行研究, 用 HF 腐蚀法制作单端倏逝波 FBG 传感器并对蔗糖溶液及温度进行了同时测量, 能有效地消除环境温度变化对蔗糖溶液浓度测量的影响。实验证明, 随着蔗糖溶液折射率的增加, Bragg 波长近似线性地往长波方向漂移, 蔗糖溶液折射率灵敏度达到 $5.42 \text{ nm}/\text{riu}$ 。2013 年, B N Shivananju^[29]等提出了一种室温下检测 CO_2 气体浓度的包层腐蚀并在纤芯表面涂覆聚烯丙胺氨基碳纳米管的新型 FBG 气体传感器, 其测量范围为 $1\ 000 \sim 4\ 000 \text{ ppm}$, 最低检测限为 75 ppm , 具有良好的短期及长期的重复性和再现性。Qi Zhang^[30]等人给出了一种基于化学腐蚀高 Q 相移 FBG (π FBG) 到其纤芯的折射率传感器, 当 π FBG 的长度为 7 mm 、直径约为 $9.3 \mu\text{m}$, 外界折射率为 1.318 时响应为 $2.9 \text{ nm}/\text{riu}$ 。Kim, Kwang Taek^[31]等研究了包层腐蚀双芯光纤布拉格光栅应用于同时检测的液体的温度和折射率, 其中由内芯模的布拉格波长获得液体温度, 而液体的折射率是通过内芯模和外芯模的两个布拉格波长的间隔获得。Jitendra Kumar^[32]等人利用紫外激光写入法制作了反射率为 11% 和 93% 的两个 FBG 并用 HF 进行腐蚀, 腐蚀速率分别为 $2.03 \mu\text{m}/\text{min}$ 和 1.96

$\mu\text{m}/\text{min}$,还对不同剩余包层直径的FBG对乙醇和乙二醇在不同蚀刻时间下的折射率传感进行了实验研究,指出测量乙醇和乙二醇要具有相同的折射率灵敏度可根据较少的腐蚀时间来实现。2014年,Shivananju B^[33]等证实了碳纳米管涂覆在腐蚀FBG表面上可制作高度敏感湿度传感器,其室温下检测湿度的范围为20%~90%,灵敏度约为31 pm% RH,最低检测极限约为0.03 RH,是现有基于FBG的湿度传感器的最高灵敏度。G Tsigaridas^[34]等从理论和实验上研究了蚀刻工艺对FBG折射率传感器性能的影响,给出了腐蚀后的FBG半径与有效折射率的解析表达式,并计算了FBG的腐蚀速率约为0.818 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。

2.2 侧边抛磨FBG折射率传感研究现状

在1992年,是由S M Tseng^[35]等人最早提出抛磨法。经历将近十年的努力,在2001年,K Schroeder^[36]等人提出将FBG固定在弯曲直径为2 m的基底上,用侧边抛磨法去除部分光纤包层,中间部分包层最薄厚度大约为0.5 μm ,用此FBG传感器对外界折射率进行测量,同时,在未抛磨的区域用另一个FBG作温度参考测量,可除去温度对折射率测量带来的影响。1 pm波长移动对应着折射率变化为 10^{-3} ($n_1=1\sim 1.3$)到 2×10^{-5} ($n_1=1.44\sim 1.46$)之间。侧面抛磨的FBG上涂覆一层高折射率的膜可以提高较低折射率区域的灵敏度,实验中用0.25 μm 厚,折射率为1.68的膜,在 $n_1=1.33\sim 1.37$ 范围内,使分辨率从 10^{-3} riu提高到 2.5×10^{-5} riu。2005年,沈乐^[37]等人通过将光纤Bragg光栅侧边抛磨,使得光纤Bragg光栅结合了侧边抛磨光纤的特性,以波长变化和功率变化同时作为传感度量,具有更高的传感精度和准确性。在2007年,刘林合^[38]通过理论计算和实验得出,由轮式侧边抛磨法制备的侧边抛磨光纤光栅的Bragg波长会随抛磨区覆盖材料的折射率的增大向长波长方向偏移,最大可出现偏移1.402 nm。2009年,范若岩^[39]等基于双布拉格反射峰效应提出了侧边抛磨光纤光栅(SPFBG)进行折射率测量的新型光纤折射率传感器,当折射率液在1.429 8~1.447 9范围内,其折射率测量分辨率为0.000 1。2010年,尹丹^[40]等对抛磨程度和抛磨区材料折射率对光谱特性影响进行了模拟研究。2012年,许亮等^[41]应用三层结构光纤波导模型,借助计算机软件改变外界折射率、剩余包层厚度等

参数,对完整抛磨光纤光栅在外界环境影响下的Bragg波长变化进行数值模拟,Bragg波长表现为外界折射率接近纤芯折射率时,先红移而后又略回蓝移。2013年,白春河^[42]等利用在线抛磨和测量对抛磨区域长度和剩余包层厚度与光纤折射率传感的影响进行了实验研究,发现抛磨长度增加会使传感器稳定性增加,但不提高灵敏度;折射率在1.30~1.45区间内,灵敏度小、线性度高;在1.45~1.50区间内,灵敏度高、线性度差;在1.50以上区间内,灵敏度、线性度、稳定性较好。紧接着唐洁媛^[43]等提出了一种用轮式侧边抛磨法对单模多模单模结构中多模光纤进行抛磨处理的新型光纤折射率传感器,用实验证明了传感器的灵敏度随着抛磨深度的增加而变大。Anna Dud.^[44]等对超细光纤和侧边抛磨光纤传感器用于微流体折光率的研究比较中发现:在折射率区间为1.330~1.457,直径5 μm 、长500 μm 的超细光纤比长7 mm的侧边抛磨光纤用于1 550 nm宽带光纤干涉仪测量折射率时,超细光纤的折射率灵敏度远远超过侧边抛磨光纤。2014年,陈小龙^[45]等提出轮式侧边抛磨法和磁控溅射法制成镀膜侧边抛磨光纤表面等离子体共振传感器,其共振波长随折射率的增大向长波方向漂移,而随温度的升高向短波方向漂移;其平均折射率灵敏度和温度灵敏度分别为 4.1×10^3 nm/RIU、0.36 nm/°C。

2.3 腐蚀FBG方案与抛磨FBG方案的比较

用HF溶液腐蚀FBG方法的优点是操作简单容易实现;不需要昂贵精密的实验设备;可大幅度提高传感器的灵敏度;通过对腐蚀时间的控制,得到需要的光纤光栅直径的尺寸;选用HF溶液浓度依次降低对光纤光栅进行分时段腐蚀,光纤光栅的表面缺陷减少,光谱展宽小有利于提高传感器的分辨率;光纤光栅灵敏度的控制可以通过腐蚀控制光栅直径来实现;部分腐蚀FBG可消除温度与折射率的交叉敏感问题。但是HF溶液腐蚀法会降低光纤光栅的机械强度,致使光纤光栅容易损坏;使光纤光栅的光谱展宽,功率降低。

抛磨FBG的优点是光纤光栅的机械强度明显提高;光栅直径尺寸的控制更加精密;对FBG进行部分抛磨,由剩下的FBG作为温度参考,抛磨FBG作为折射率传感器可以消去温度影响;抛磨后的FBG可以涂覆高折射率敏感膜,以提高FBG对外界

折射率变化的灵敏度。抛磨FBG需要专业的抛磨设备,而腐蚀FBG是不需要专业设备。其弊端是抛磨FBG的最小直径是不可能比腐蚀FBG的最小直径小,由于FBG的包层直径越小,其灵敏度就越高,因此抛磨FBG方法的最大灵敏度是不会超过腐蚀FBG方法的最大灵敏度。

对两种提高FBG折射率传感灵敏度方案的比较说明,它们是各有优缺点,可根据实际需要进行选择,得到满足要求的传感灵敏度和机械强度。

3 微纳FBG折射率传感研究现状

目前关于微纳光纤光栅的研究处于实验阶段,已有报道通过把微米光纤绕在微结构圆柱上构造光栅用于微流体折射率测量。2005年,童利民^[6]等在纳米光纤传感器文章中就已经提出了微纳光纤传感。童利民^[7]等研究了亚波长直径光纤的光学传输特性及其应用。2007年,童利民^[46]等人基于Maxwell方程组的精确解,给出了微纳光纤的内部及其周围光的模场分布,计算了各阶模式特别是 HE_{11} 模的传播常数随光纤直径变化的关系,给出了电场、磁场分量以及能量在光纤纤芯内部和包层的分布情况。同年,浙江大学王珊珊等人采用圆形微粒的Rayleigh-Gans散射模型从理论上计算出微纳光纤的倏逝场与微粒相互作用的情况^[47]。2010,郑之伟^[48]介绍一种简便有效的方法来解析复杂的复本征方程,从而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和制备提供一定的理论依据。香港理工大学则采用飞秒激光器在微米光纤上刻写光纤布拉格光栅用于折射率的测量^[49]。张羽^[50]建立了微纳光纤布拉格光栅的物理模型,并理论分析了将MFBG用于折射率传感时,直径较小的MFBG比直径较大的MFBG具有更高的传感灵敏度,同样直径的MFBG,基模对应的反射峰比高阶模式对应的反射峰的传感灵敏度更高。作了折射率测量实验,其高阶模式的灵敏度可以达到102 nm/riu。吴平辉^[51]对微纳光纤Mach-Zehnder建立模型,并给出灵敏度计算公式,还对白光干涉微纳光纤传感作了实验研究,传感器灵敏度约为3 665 nm/riu,对折射率的最小分辨率约为 10^{-5} 。因此,该传感器可用于液体折射率和各种气体传感。在2011年,余小草^[52]等使用紫外光刻法制作微纳光纤布喇格光栅并测得不同直径下微纳光纤布喇格光栅的反射谱。结果显示,在直径几个微米的

微纳光纤上仍可以刻出布喇格光栅来。仿真实理论和实验表明,随着微纳光纤的直径变小(20 μm 左右)有效折率先是迅速减小而后变化速度减缓从而导致光栅的中心波长向短波长方向飘移和反射率降低。最后给出了一个直径为25.9 μm 微纳光纤布喇格光栅的测量光谱曲线,其3 dB带宽约0.3 nm,可用于WDM信道滤波和对灵敏度要求很高的生物传感中。刘艳鑫^[5]对MNFBG的制作、传感中的应用做了详细介绍。梁瑞冰^[53]等提出一种基于微纳尺度光纤布拉格光栅(MNFBG)的折射率传感器,结合微纳光纤倏逝场传输和光纤布拉格光栅(FBG)强波长选择的特性来实现高精度折射率传感,使用Opti-Grating软件进行数值模拟,显示出MNFBG折射率测量的灵敏度随着光纤半径的减小而增加,其中光纤半径为400 nm的MNFBG灵敏度可达到993 nm/riu,相比于包层蚀刻的FBG灵敏度增加170倍。2013年,刘颖刚^[54]等建立了MNFBG反射波长随环境折射率变化的数学模型,数值模拟并详细讨论了有效折射率随纤芯半径和环境折射率的变化规律。考虑到MNFBG的机械强度以及实际折射率测量范围,提出按小折射率区间内的高线性关系进行折射率传感测量,并拟合了纤芯半径为0.5 μm 的MNFBG的反射波长随环境折射率的变化关系,在1.20~1.30和1.33~1.43环境折射率范围内,分别获得了477.33 nm/riu和856.30 nm/riu的波长灵敏度,论证了折射率区间划分测量方案的可行性。Bai-Ou Guan^[55]等指出了超细FBG传感器对于周围介质折射率变化的检测是基于倏逝场的相互作用,该传感器具有低刚度和小尺寸的优势。卫正统^[56]等将常规光敏光纤的包层利用HF腐蚀到直径为17 μm ,然后用超细光纤制造系统将光纤直径刻蚀到6 μm ,最后利用KrF准分子激光在载氢常规光敏光纤上写入FBG。该传感器应用于盐水的浓度测量,在折射率为1.33时其最小分辨率可达 7.2×10^{-5} 。Wei Zhang^[57]等基于阶跃型光纤基膜的有效折射率函数建立了MNFBG波长飘移的理论模型。数值模拟结果显示,对于给定半径的MNFBG,随环境温度的升高其有效折射率降低,波长向短波方向飘移。特别是当MNFBG半径小于0.5 μm 时,对温度的灵敏度正比于周围液体的热光系数。Yu Wu^[58]等采用石墨烯涂覆MNFBG的气体传感器来检测化学气体的浓度,具有增强表面场、吸附气体、超高灵敏度的优点。此气体传感器对氨气和二甲苯气体的灵敏度分

别是 0.2 ppm 和 0.5 ppm,比无石墨烯的微小气体浓度变化检测的灵敏度高出数十倍。

4 展 望

通过对短周期光纤光栅的折射率传感现状的研究,发现经过腐蚀和抛磨的 FBG 虽然大幅度提高了折射率传感灵敏度,但仍存在着缺点,需要进一步改进腐蚀和抛磨技术,使得腐蚀后的 FBG 机械强度得到提高和抛磨后的 FBG 尺寸更小更加精确。近年来,随着纳米技术的兴起,又出了微纳光纤,其在折射率传感方面有着独特的优势,引起了国内外学者的广泛关注,尤其是微纳光纤布拉格光栅应用于折射率传感方面。微纳光纤布拉格光栅不仅具有倏逝场传输的光学特性和强波长选择的特性,还具有体积小,不受电磁干扰,测量准确、可靠性高,可应用于化学分析、环境污染评估、医疗诊断、食品工业、生物传感等领域。改善 MNFBG 的制作法和封装技术,有助于提高 MNFBG 的机械强度、光学可靠性,进一步提高 MNFBG 的灵敏度和实用性。

参考文献

- [1] 梁瑞冰.基于微纳光纤倏逝场的高灵敏传感理论与应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [2] 寇君龙.基于微光纤的几种光学器件[D]. 南京:南京大学,2010.
- [3] 刘艳鑫.基于微纳光纤的 Bragg 光栅器件研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [4] 高晓倩.基于微结构光纤双模激光器的生物传感理论研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2013.
- [5] 杨飞亚,吴宇,饶云江.基于微纳光纤的双环谐振腔理论与实验研究[J]. 激光与光电子学进展,2011,48:01060.
- [6] 童利民,楼静漪.纳米光纤传感器[J]. 激光与光子学进展,2005,42(12):2930.
- [7] 童利民,潘欣云.亚波长直径光纤的光学传输特性及其应用[J]. 物理,2007,36(8):626629.
- [8] Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. J. Lightwave Technol, 1997,15(8):1277-1294.
- [9] Hill K O, Fujii, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguide: application to refraction fiber fabrication[J]. Appl. Phys. Lett, 1978,32(10):647-649.
- [10] Meltzq Morey M M, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method [J]. Optics Letters, 1989,14(5):823-825.
- [11] Hill K O. Bragg gratings fiber eted in monomode photo sensitive optical fiber by UV expose through a phase mask[J]. Applied Phycises Letters, 1993,62:1035-103.
- [12] Asseh A, Sandgren S, Ahlfeldt H, et al. Fiber optical Bragg grating refractometer[J]. Fiber Integr. Opt., 1998,17(1):51-62.
- [13] Dionisio A Pereira, Orlando Frazao. Fiber Bragg grating sensing system for simultaneous measurement of salinity and temperature[J]. Optical Instrumentation Engineers, 2004,43(2):299-304.
- [14] Iadicicco, Cusano A. Thinned fiber Bragg gratings as high sensitivity refractive index sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004,16(4):1149-1151.
- [15] Athanasios N Chryssis, Sang M Lee, Sang B Lee. High sensitivity evanescent field fiber bragg grating sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005,17(6):1253-1255.
- [16] Agostino Iadicicco, Stefania Campopiano. Refractive index sensor based on microstructured fiber Bragg grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005,17(6):1250-1252.
- [17] LIANG Wei, HUANG Yan-yi. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors[J]. Applied Physics Letters, 2005,86(15):115-122.
- [18] Zhou K, Chen X, Zhang L. High-sensitivity optical chem-sensor based on etched D-fibre Bragg gratings[J]. Electronics Letters, 2004,40(4).
- [19] 秦颖.光纤 Bragg 光栅化学敏感特性的基础研究[D]. 长春:吉林大学,2006.
- [20] 恽斌峰,陈娜,崔一平.基于包层模的光纤布拉格光栅折射率传感特性[J]. 光学学报,2006,7,26(7):1013-1015.
- [21] CHEN Na, YUN Bin-feng, WANG Yi-ping, et al. Theoretical and experimental study on etched fiber Bragg grating cladding mode resonances for ambient refractive index sensing[J]. J. Opt. Soc. Am, 2007,24(3).
- [22] 徐俊娇,李杰,戎华北,等.少模光纤布拉格光栅折射率传感的分析与测量[J]. 光学学报,2008,28(3):565-568.
- [23] 陈敏哲.光纤光栅动态应力和折射率传感研究[D]. 杭州:浙江大学,2008,9.
- [24] 苗银萍,刘波,赵启大.不同包层直径的倾斜光纤光栅折射率传感特性[J].光学学报,2008,28(11):2072-2076.
- [25] 赵明富,黄德翼,罗彬彬,等.光纤 Bragg 光栅倏逝波传感器[J]. 重庆理工大学学报学,2011,24(10):46-50.
- [26] 罗彬彬,赵明富,周晓军,等.高斯切趾光纤 Bragg 光栅折射率传感器特性研究[J]. 光电子·激光,22(2):201-206.
- [27] 罗彬彬,赵明富,周晓军,等.单端腐蚀光纤布拉格光栅在低折射率区的理论模型及设计[J]. 光学学报,2011,

- 24(10):0406004.
- [28] 曹雪梅. 倏逝波光纤 Bragg 光栅传感器理论及应用研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2012.
- [29] Shivananju B N, Yamdagni, Fazuldeen R, et al. CO₂ sensing at room temperature using carbon nanotubes coated core fiber Bragg grating[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(6):0650021.
- [30] Zhang Q, Ianno NJ, Han M. Fiber-Optic refractometer based on an etched high-Q π -phase-shifted fiber-Bragg-grating[J]. Sensors (Basel), 2013, 13(7):8827-8834.
- [31] Kim, Kwang Taek, Kim In Soo, et al. Simultaneous measurement of temperature and refractive index of liquid using cladding-etched double-core fiber bragg grating[J]. Fiber & Integrated Optics, 2013, 32(3):145-152.
- [32] Jitendra Kumar, Ramakant Mahakud, Prakash Om, et al. Study on hydrofluoric acid-based clad etching and chemical sensing characteristics of fiber Bragg gratings of different reflectivity fabricated under different UV exposure times[J]. Opt. Eng, 2013, 52(5):055402.
- [33] Shivananju B, Varma M, Asokan S, et al. Highly sensitive carbon nanotubes coated etched fiber bragg grating sensor for humidity sensing[J]. IEEE, Sensors Journal, 2014, 14(8):2615-2619.
- [34] Tsigaridas G, Polyzos D, Ioannou A, et al. Theoretical and experimental study of refractive index sensors based on etched fiber Bragg gratings[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 209:9-15.
- [35] Tseng SM, Chen CL. Side-polished fibers[J]. Applied Optics, 1992, 31(18): 3438-3447.
- [36] Kerstin Schroeder, Wolfgang Ecke, Rudolf Mueller. A fibre Bragg grating refractometer[J]. Measurement Science And Technology, 2001, 12: 757-764.
- [37] 沈乐, 郑史烈, 章献民. 侧面研磨光纤 Bragg 光栅的外部折射率敏感特性研究[J]. 光子学报, 2005, 34(7): 1036-1038.
- [38] 刘林和, 陈哲, 白春河, 等. 侧面抛磨区材料折射率对光纤光栅波长的影响[J]. 光子学报, 2007, 36(5):865-868.
- [39] 范若岩, 陈哲, 刘林和, 等. 基于侧面抛磨光纤光栅双反射峰的折射率传感器[J]. 中国激光, 2009, 36(5):1134-1139.
- [40] 尹丹, 杨明红, 代吉祥, 等. 侧面抛磨光纤光栅的数值模拟和实验研究[J]. 光子学报, 2010, 39:54-58.
- [41] 许亮, 刘一泓, 彭修峰. 完整抛磨光纤光栅三层介质波导模型数值模拟[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2012, 19(15):19-22.
- [42] 白春河, 罗云瀚, 陈哲, 等. 基于侧面抛磨光纤折倏逝场的折射率传感特性[J]. 光子学报, 2013, 10, 42(10):1183-1187.
- [43] 唐洁媛, 罗云瀚, 陈哲, 等. 侧面抛磨 SMS 光纤传感器[J]. 光子学报, 2013, 10, 42(10):1188-1193.
- [44] Anna Dud, Robert Blue. Comparative study of microfiber and side-polished optical fiber sensors for refractometry in microfluidics[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 5, 13(5): 1594-1601.
- [45] 陈小龙, 罗云瀚, 徐梦云, 等. 基于侧面抛磨光纤表面等离子体共振的折射率和温度传感研究[J]. 光学学报, 2014, 32(2): 0206005.
- [46] Tong L, Hu L, Zhang J, et al. Photonic: nanowires directly-drawn from bulk glasses[J]. Opt. Express, 2006, 14(1):82-87.
- [47] Wang, Pana X, Tong L. Mode of nanoparticle induced rayleigh-ganss scattering for nanofiber optical sensing[J]. Opt. Commun, 2007, 276(2):293-297.
- [48] 郑之伟. 微纳光纤的导波及远场特性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [49] Fang X, Liao C R, Wang D N. Femtosecond laser fabricated fiber Bragg grating in microfiber for refractive index sensing[J]. Optics Letters, 2010, 5(7):1007-1009.
- [50] 张羽. 微纳光纤器件及其在全光信号处理中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [51] 吴平辉. 基于倏逝场的微纳光纤传感器的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
- [52] 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]. 光器件, 2011, 2:25-27.
- [53] 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, 2011:60104221.
- [54] 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]. 2013, 10(62):1042218.
- [55] GUAN Bai-ou, LI Jie, JIN Long, et al. Fiber Bragg gratings in optical microfibers[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(6):793-801.
- [56] WEI Zheng-tong, JIANG Nuan, SONG Zhang-qi, 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.
- [57] ZHANG Wei, LIU Ying-gang, ZHOU Hong. Theoretical investigation on the temperature characteristics of liquid-cladding micro/nanofiber Bragg grating[J]. Journal of Modern Optics, 2014, 61(13):1097-1102.
- [58] WU Yu, YAO Bai-cheng, ZHANG An-qi, et al. Graphene-coated microfiber Bragg grating for high-sensitivity gas sensing[J]. Optics Letters, 2014, 39(5):1235-1237.