

微纳尺度光纤布拉格光栅折射率传感的理论研究*

梁瑞冰 孙琪真[†] 沃江海 刘德明

1) (华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

2) (华中科技大学下一代互联网接入系统国家工程实验室, 武汉 430074)

(2010年10月8日收到; 2011年3月29日收到修改稿)

亚波长直径微纳光纤强倏逝场传输的光学特性,使其对周围介质折射率的变化具有极高的灵敏度. 本文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,对其制备可行性进行了讨论. 论文中对MNFBG折射率传感机理进行了深入的理论分析,并使用OptiGrating软件进行了数值模拟,模拟数据显示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灵敏度增加了170倍,说明MNFBG对发展微型化、高灵敏度折射率传感器具有良好的应用前景.

关键词: 微纳光纤, 光纤布拉格光栅, 折射率传感

PACS: 42.81.Pa, 42.79.Dj, 42.79.-e

1. 引言

折射率传感在气体和水溶液样品测量以及飞机复合材料固化监测中都有重要意义. 长周期光纤光栅(LPG)对周围介质折射率变化具有很高的灵敏度,但是LPG多谐振峰和传输峰带宽大限制了折射率测量的准确性,有报道通过蚀刻包层的FBG利用倏逝场光波导来测量介质的折射率,可达到很高的灵敏度^[1,2],但这种方法在蚀刻增加灵敏度的同时降低了传感器的机械强度.

亚波长直径微纳光纤具有大比例倏逝波传输的光学特性,使得微纳光纤对其附近及表面介质的变化非常敏感,具有极高的灵敏度^[3]. 光纤光栅是一种纵向上纤芯折射率周期性变化的微结构,表现出非常优异的波长选择特性. 微纳光纤光栅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,利用光波长来感知外界环境折射率的变化,使得传感测量准确可靠. 目前关于微纳光纤光栅的研究还很少,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^[4];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^[5]. 本文将刻写有均匀光纤布拉格光栅的微纳光纤作为传感单元,提出基于微纳尺度光纤布拉格光栅的高精度折射率传感器,将进一步减小光纤的尺寸到纳米量级,从理论上分析微纳尺度光纤布拉格光栅的折射率传感特性,讨论光纤尺寸对折射率传感灵敏度的影响,为实现微纳光纤布拉格光栅折射率传感应用提供理论依据.

2. 理论分析

微纳光纤是一种直径尺度在亚波长量级的圆柱光波导,其特点在于:波导横截面直径小于入射光波长,光纤本身没有纤芯和包层结构. 将其置于介质(如空气、液体等)中,可将微纳光纤本身视为纤芯,而光纤周围介质视为包层,从而构成折射率凸型分布的光纤波导. 微纳光纤具有大比例倏逝场传输的光学特性,光纤的直径越小,倏逝场的比例越大,在入射波长为633 nm的氧化硅光纤中,当光纤的直径降到200 nm时,大于90%的能量移到了光纤外部以倏逝场的形式在光纤外部介质中传输^[6]. 大比例倏逝场的特性使得其与周围介质的接

* 国家自然科学基金(批准号:60907037,60937002)和中央高校基本科研业务费(批准号:HUST:Q2009026)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: qzsun@mail.hust.edu.cn

触十分紧密,可用于探测周围环境的变化,当周围介质折射率改变时,导模的有效折射率随之改变,从而影响微纳光纤的模式分布.图1所示微纳光纤纤芯内外Poynting矢量分布的剖面图,黑色部分为纤芯内的场,渐变部分为纤芯外的场.从图1中可以看到当周围介质由空气变为水溶液时,微纳光纤纤芯内能量百分比由72.5%降至29.2%,通过测量输出光的强度和相位等特性的改变,可以实现周围介质折射率传感功能.

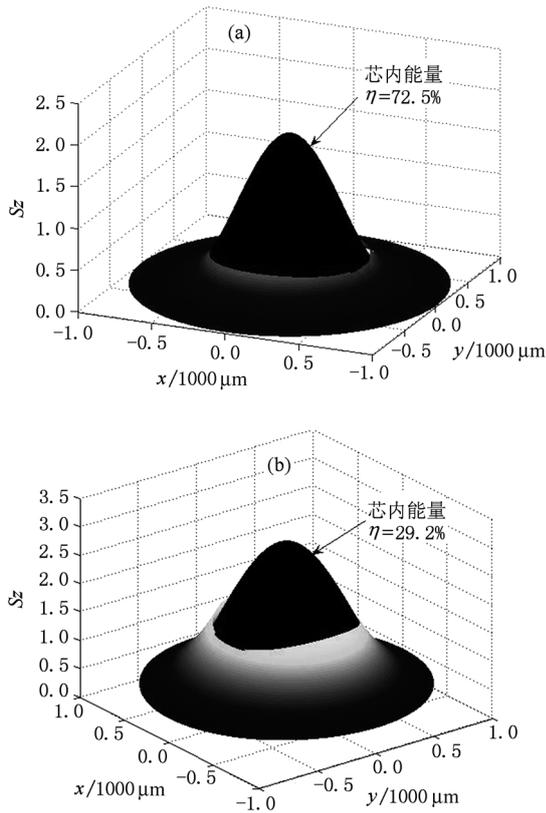


图1 入射波长为1550 nm,芯层材料为氧化硅($n_1 = 1.444$),光纤直径 $D = 1000$ nm的微纳光纤Poynting矢量分布剖面图 (a) $n_2 = 1.0$ (周围介质为空气); (b) $n_2 = 1.316$ (周围介质为水溶液)

FBG是光学光栅的基本元件并在光纤传感上具有广泛的应用,基于FBG的光纤传感器的基本原理是监测反射回的“Bragg”信号波长的变化.FBG的中心波长为^[7]

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

其中 n_{eff} 是光纤的有效折射率, Λ 是光栅周期, λ_B 是反射Bragg中心波长.

FBG折射率光纤传感器的灵敏度依赖于导模有效折射率的改变,刻写在普通光纤上的FBG并不

直接暴露于周围介质中,其本身对外界折射率的变化并不具有灵敏性.利用微纳光纤倏逝场传输的光学特性,我们提出基于微纳尺度光纤布拉格光栅的折射率传感器,将外界折射率的变化转化为光栅中心波长的变化,以实现折射率的准确测量.如图2所示为微纳FBG折射率传感的原理图,利用微纳光纤倏逝场传输的光学特性,传输光一部分以倏逝场的形式在光纤外的介质中传输,因而周围介质折射率的变化会引起传输模有效折射率的改变,微纳FBG中心波长也会随之发生变化,就可以通过中心波长的改变来实现周围介质折射率的测量.

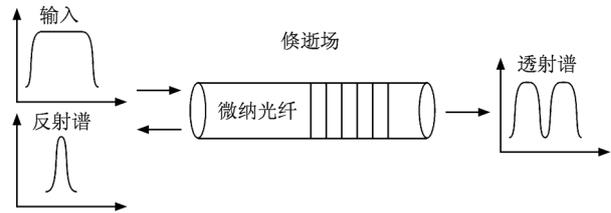


图2 微纳尺度光纤布拉格光栅折射率传感原理图

微纳光纤布拉格光栅的制备可采用紫外光照射相位掩膜板的方法来实现^[8].由于微纳光纤的尺寸非常小,工艺制备的关键在于增加微纳光纤的光敏性.以高掺锗的光敏光纤为载体,采用火焰加热一步拉伸法拉至微纳尺寸,还可对微纳光敏光纤进行载氢以进一步增加光敏性,从而使微纳光纤光栅的制备相对简单易行.文献[8]中张新亮课题组已经采用该方法在微米尺度的光纤上成功制备了微米布拉格光栅(MFBG)^[8].

3. 数值模拟和分析

采用OptiGrating软件对MNFBG的折射率传感特性进行数值模拟及分析.

3.1. 微纳光纤尺寸对折射率灵敏度的影响

我们建立理想微纳光纤光栅的数学模型,微纳光纤的形状视为无限长的圆柱,直径为 $2a$,光纤材料的折射率为1.46,外部包层实为无限大的周围介质层,由于光纤的直径比较小,此处我们将周围介质包层的半径设置为 $8 \mu\text{m}$.均匀光纤布拉格光栅的周期 $\Lambda = 0.5618 \mu\text{m}$,光栅的长度 $L = 50 \text{ mm}$.

微纳光纤半径 a 取值由 $1 \mu\text{m}$ 下降至 $0.3 \mu\text{m}$,间隔为 $0.1 \mu\text{m}$,改变周围介质折射率由1增至

1.45, 观察中心波长的变化, 比较光纤半径改变对折射率传感灵敏度的影响.

模拟结果如图 3 所示, 从图中可以看出随着周围介质折射率的增加, MNFBG 的中心波长向长波长方向漂移. 当周围介质折射率比较小时, 中心波长的变化比较缓和, 随着周围介质折射率的继续增加接近于光纤材料的折射率时, 中心波长的增加速率加快且接近于线性变化. 当周围介质折射率由 1 增加到 1.4, 微纳光纤的半径为 1 μm 时, 光栅中心波长由 1550 nm 漂移至 1593.64 nm, 而当光纤的半径减小到 0.5 μm , 光栅中心波长由 1387.71 nm 漂移至 1573.74 nm. 我们可以看出微纳光纤半径越小, 中心波长随周围介质折射率的变化越快, 并且从图中易见其可实现线性测量的区域也越大. 由此可知, 微纳光纤的半径越小, 微纳尺度 FBG 折射率传感的灵敏度就越高, 且更容易实现一定范围内折射率的线性测量.

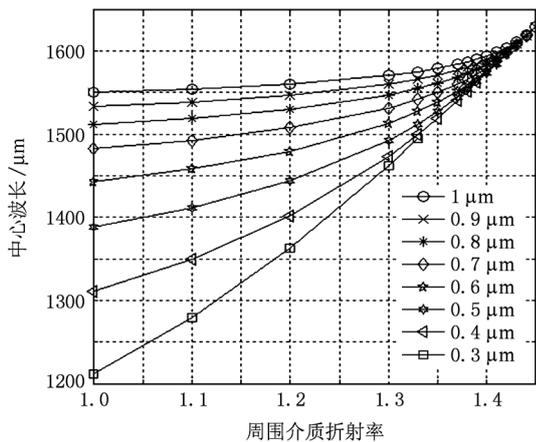


图 3 半径不同的 MNFBG 中心波长随周围介质包层折射率的变化

3.2. 光纤半径为 400 nm 的 MNFBG 折射率传感特性模拟

因为软件分析条件限制, 无法得到半径更小的折射率传感数据. 这里我们取光纤半径为 400 nm 的 MNFBG 中心波长随周围介质折射率的变化曲线进行线性拟合. 如图 4 所示, 拟合结果为

$$\lambda_B = 993.350n_a + 179.807, \quad (2)$$

其中 λ_B 为 MNFBG 中心波长, n_a 为周围介质折射率. 线性拟合的相关系数为 0.9985.

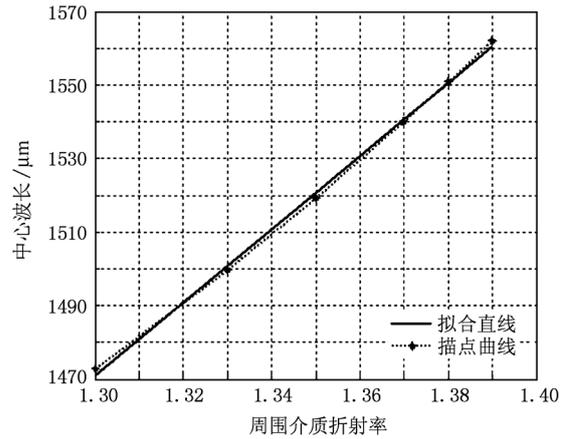


图 4 光纤半径为 400 nm MNFBG 中心波长随周围介质包层折射率变化的拟合直线

3.3. MNFBG 与包层蚀刻的 FBG 比较分析

为了更清楚地描述微纳光纤光栅的折射率灵敏度, 我们选取标准的单模光纤 SMF-28, 和纤芯直径分别为 125 和 8.2 μm , 在上面刻写周期长度相同的均匀布拉格光栅对其折射率传感特性进行比较. 因为普通 FBG 并不直接暴露在周围介质中, 需要通过蚀刻减小包层的直径, 包层直径越小测量的灵敏度越高, 在此我们对包层完全蚀刻掉的情况进行折射率传感的数值模拟, 如图 5 所示. 中心波长随介质折射率的变化趋势是一致的, 但是 MNFBG 中心波长的变化要快得多. 我们选取与光纤半径为 400 nm 的 MNFBG 相同的折射率区间 1.3—1.4 进行分析比较, 如图 6 所示. 直线拟合结果

$$\lambda_B = 5.845n_a + 1626.021, \quad (3)$$

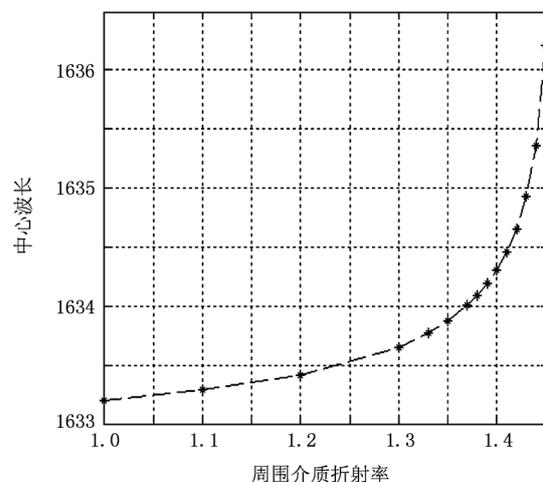


图 5 普通 FBG 蚀刻包层后中心波长随周围介质折射率的变化

其中 λ_B 为刻蚀包层的 FBG 中心波长, n_a 为周围介质折射率. 线性拟合的相关系数为 0.973.

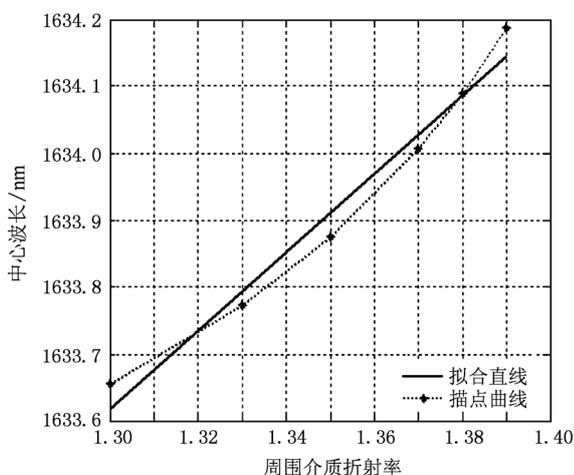


图6 普通 FBG 蚀刻包层后中心波长随周围介质折射率变化的拟合直线

基于 FBG 的折射率传感器灵敏度可从下式得到:

$$S = \frac{\partial \lambda_B}{\partial n_a}, \quad (4)$$

其中 S 为折射率测量的灵敏度, λ_B 为 MNFBG 中心

波长, n_a 为周围介质折射率. 从拟合的情况看, 半径为 400 nm 的 MNFBG 折射率传感的灵敏度达到了 993 nm/RIU, 相比于蚀刻包层的 FBG 增加了 170 倍, 并且相关系数接近于 1, 更加接近于线性变化, 这对折射率传感器的定标具有很重要的意义, 在实际折射率传感测量中具有很好的应用价值.

4. 结 论

本文提出了一种基于微纳尺度光纤布拉格光栅的折射率传感器, 对 MNFBG 的折射率传感进行了数值模拟, 数值模拟结果显示: 随着周围介质折射率的增加, 中心波长向长波长方向漂移; 当周围介质包层折射率接近于光纤材料折射率时, 中心波长的增加速率加快, 且接近于线性; 微纳光纤半径越小, 中心波长的变化越快且测量折射率的线性区间越大. 相比于普通包层蚀刻的 FBG, MNFBG 折射率传感特性有明显提高: MNFBG 中心波长随折射率的变化要快得多, 光纤半径为 400 nm 的 MNFBG 灵敏度可达到 993 nm/RIU, 测量灵敏度增加了近 170 倍, 并且线性度有了显著提高. 说明 MNFBG 在减小器件尺寸、提高集成度和实现化学或生物折射率高灵敏度测量具有潜在的应用价值.

[1] Liang W, Huang Y Y, Xu Y, Lee R K, Yariv A 2005 *Applied Physics Letters* **86** 151122
 [2] Chryssis A N, Lee S M, Lee S B, Saini S, Dagenais M 2005 *IEEE Photonics Technology Letters* **17** 1253
 [3] Tong L M, Gattass R R, Ashcom J B, He S L, Lou J Y, Shen M Y, Maxwell I, Mazur E 2003 *Nature* **426** 816
 [4] Xu F, Brambilla G, Lu Y Q 2009 *Opt. Express* **17** 20866
 [5] Fang X, Liao C R, Wang D N 2010 *Opt. Letters* **35** 1007

[6] Tong L M, Lou J Y, Mazur E 2004 *Opt. Express* **12** 1025
 [7] Zhang Z J 2009 *Theory Foundation of Fiber Grating and Sensing Technology* (Beijing: Science Press) p49 (in Chinese) [张自嘉 2009 光纤光栅理论基础与传感技术(北京: 科技出版社) 第 49 页]
 [8] Zhang Y, Lin B, Tjin S C, Zhang H, Wang G H, Shum P, Zhang X L 2010 *Opt. Express* **18** 26345

Theoretical investigation on refractive index sensor based on Bragg grating in micro/nanofiber*

Liang Rui-Bing Sun Qi-Zhen[†] Wo Jiang-Hai Liu De-Ming

1) (School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

2) (National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, Wuhan 430074, China)

(Received 8 October 2010; revised manuscript received 29 March 2011)

Abstract

Subwavelength and nanometer diameter optical fibers have the optical property of enhanced evanescent fields, which makes them very sensitive to the index change of the ambient medium. In this paper, a novel refractometric sensor based on fiber Bragg grating in micro/nano-fiber (MNFBG) is proposed, integrating the enhanced evanescent fields of micro/nano-fiber (MNF) with wavelength choice feature of FBG, and the fabrication about MNFBG is discussed. Refractive index sensing characteristics is comprehensively investigated in theories, and the simulation of sensing the variation of ambient refractive index is performed by using the software of OptiGrating. Results show the sensitivity of the MNFBG is increasing with the decrease of the radius of the MNF. MNFBG with the radius of 400nm can achieve the sensitivity as high as 993nm/RIU. This value is enhanced by 170 times over that of the FBG with etched cladding, which demonstrates that MNFBG has great potential of application in miniaturized, high-sensitivity refractometric sensors.

Keywords: micro/nano-fiber, fiber Bragg grating (FBG), refractive index sensing

PACS: 42. 81. Pa, 42. 79. Dj, 42. 79. - e

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 60907037,60937002) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (HUST:Q2009026).

[†] Corresponding author. E-mail:qzsun@mail.hust.edu.cn