

# 基于微纳光纤的布里渊折射率传感技术

黄晨辉\*\*, 秦莉, 梁浩\*, 程凌浩

暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 510632

**摘要** 利用微纳光纤的倏逝场效应, 提出一种布里渊折射率传感器。利用混合声波模式激发的多峰布里渊频谱结构, 实现了液体的折射率传感测量。实验结果发现, 在氯化钠溶液中, 长  $2\ \mu\text{m}$  的微纳光纤在  $10.4\ \text{GHz}$  左右的布里渊信号峰具有较好的信噪比, 且该布里渊信号峰频移在一定范围内随液体折射率呈线性变化, 在折射率范围为  $1.3333\sim 1.3612$  时折射率传感灵敏度为  $369.6\ \text{MHz/RIU}$  (RIU 为折射率单元)。该技术为折射率传感提供了新的思路和方案。

**关键词** 光纤光学; 微纳光纤; 布里渊散射; 折射率传感

中图分类号 TP212.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170626

## Brillouin Refractive Index Sensing Technique Based on Micro-Nano Fiber

Huang Chenhui\*\*, Qin Li, Liang Hao\*, Cheng Linghao

*Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China*

**Abstract** This study proposes a Brillouin refractive index sensor based on the evanescent field effect of a micro-nano fiber. Multipeak Brillouin spectrum caused by hybrid acoustic field of the fiber is used for liquid refractive index sensing. Experimental results show that, for a  $2\ \mu\text{m}$ -micro-nano fiber, Brillouin peaks at approximately  $10.4\ \text{GHz}$  have a relatively high signal-to-noise ratio in NaCl solution, and their frequency shifts have a linear dependence on the liquid refractive index. A refractive index sensing sensitivity of  $369.6\ \text{MHz/RIU}$  (RIU is refractivity unit) is obtained within the range of  $1.3333\sim 1.3612$ . The proposed sensor will provide a new alternative for refractive index sensing.

**Key words** fiber optics; micro-nano fiber; Brillouin scattering; refractive index sensing

**OCIS codes** 060.2310; 280.4788; 290.5900

## 1 引言

折射率是表征物质光学性质的重要物理量, 测量物质折射率的变化量, 可获取浓度、密度等重要物理量的变化, 因此折射率传感器被广泛应用于生物、医学、化工等领域<sup>[1-2]</sup>。目前基于微纳光纤的折射率传感器研究, 绝大多数都是通过干涉法进行的, 利用光谱仪检测干涉信号, 通过测量波长的漂移量推导折射率的变化量<sup>[3-6]</sup>。此类传感器均为点式传感器, 每个传感器都需要一个特定的解调方案, 当传感器级联时, 信号处理会变得相当复杂。

近年来布里渊光纤传感技术是发展迅速且最具潜力的分布式传感技术。其利用布里渊频移与温度、应力的线性关系<sup>[7-8]</sup>实现传感, 利用时间和空间的对应关系实现分布式测量<sup>[9]</sup>, 并在空间分辨率和动态范围上具有很大优势<sup>[10]</sup>, 因此在结构健康监测中具有广泛应用<sup>[11-13]</sup>。布里渊散射本质上是声光相互作用的结果<sup>[14]</sup>, 改变介质的光学特性和声学特性会引起布里渊频移的变化。理论上, 布里渊传感器可测量的参数不应局限于温度和应力等物理量, 而传统传感器采用普通单模光纤, 可支持的声光模式单一且不能与环境介质相互作用, 这极

收稿日期: 2019-03-25; 修回日期: 2019-04-03; 录用日期: 2019-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(61675091)

\* E-mail: lianghao1509@gmail.com; \*\* E-mail: 154584790@qq.com

大地限制了传感器的应用范围。本文以微纳光纤作为传感介质,利用倏逝场效应<sup>[15-16]</sup>使光波能够与光纤周围的液体进行相互作用,分析微纳光纤混合声波模式引起的多个布里渊信号峰<sup>[17]</sup>频移与液体折射率之间的对应关系,最终完成液体折射率的测量。与传统传感器相比,布里渊散射可以发生在光纤的任意位置,相同的解调系统可实现光纤沿线折射率的分布式连续测量。此外布里渊传感器是从电域对信号进行解调,理论上有着更高的测量精度和更大的动态范围。

实验结果表明,在折射率为 1.3333~1.3612 的范围内,布里渊频移对折射率变化呈线性关系,且灵敏度可达 369.6 MHz/RIU(RIU 为折射率单元),该方案可为折射率传感提供新的思路。

## 2 传感机理

布里渊散射可以描述为入射的抽运光与斯托克斯光通过声波的形式进行相互作用。抽运光通过电致伸缩效应产生声波,可对光纤介质的折射率进行周期性调制,在光纤中产生折射率光栅并以声速沿光纤运动,而此光栅对入射光的散射就是布里渊散射,由于多普勒效应,谱线会产生一个布里渊频移,频移公式为

$$V_B = \frac{2n_{\text{eff}}V_A}{\lambda_p} \quad (1)$$

式中: $V_B$  为布里渊频移; $V_A$  为光纤中的纵模声速; $\lambda_p$  为入射光波长; $n_{\text{eff}}$  为光纤的有效折射率。在单模光纤中,光场模被限制在纤芯附近,并且在波长为 1550 nm 处的有效折射率约为 1.4461。后向布里渊散射为光场的基模和纵向声波模式相互作用的结果,在石英介质中,纵向声波的速度约为 5800 m/s。而在大部分单模光纤中,对于波长为 1550 nm 的抽运光,后向布里渊散射谱多呈单峰模式,且中心频率约为 11 GHz。由于声光场都不能与环境折射率进行交互作用,所以普通的单模光纤中的后向布里渊散射谱只对温度、应力等影响光纤纵向声波速度和纤芯有效折射率的参量进行传感,而不能测量外界的折射率。理论上,光纤的直径接近光波的波长时,光纤的声光耦合方式会发生变化。抽运光在光纤中传输时,会在光纤周围形成倏逝场,使得光纤中传输的光能可与外界进行相互作用<sup>[18-19]</sup>。当环境折射率改变时,光纤的  $n_{\text{eff}}$  会发生相应变化。此外,在直径较小的光纤中,横向声场和纵向声场也会发生耦合,形成混合声波模式,其声速介于横向声波速度

(3400 m/s)和纵向声波速度(5800 m/s)之间。假设声波的传输常数不随外界折射率变化而发生改变,根据(1)式,计算波长为 1550 nm 的抽运光在直径为 1,2,4  $\mu\text{m}$  的三种微纳光纤中的有效折射率与外界折射率关系,结果如图 1 所示,可以发现微纳光纤的直径越小,微纳光纤的有效折射率随外界折射率变化越大,对折射率灵敏度越高。但微纳光纤直径越小,液体吸收引起的传输损耗也会相应增加。

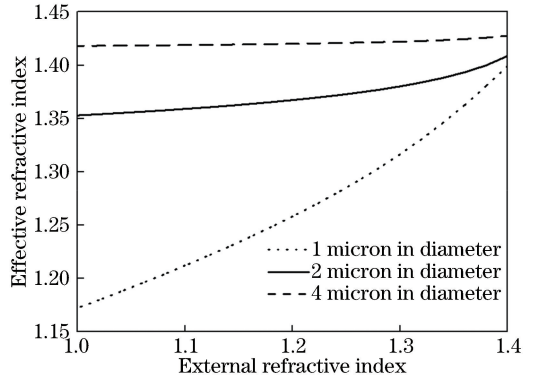


图 1 不同直径微纳光纤有效折射率与外界折射率关系  
Fig. 1 Relationship between effective refractive index of micro-nano fibers and external refractive index with different diameters

图 2 为直径为 2  $\mu\text{m}$  的微纳光纤产生的布里渊频移与外界折射率的关系曲线。由图 2 可见,布里渊频移随折射率增加而逐渐增加,并且当折射率在 1.33~1.36 范围内时呈近似线性关系。因此可利用微纳光纤中的后向布里渊散射获取环境折射率的变化。

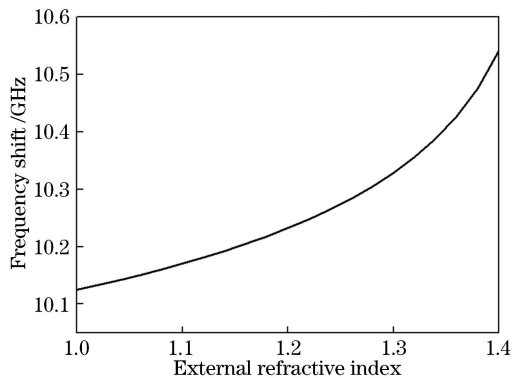


图 2 直径为 2  $\mu\text{m}$  的微纳光纤布里渊频移与外界折射率关系  
Fig. 2 Brillouin frequency shift of 2  $\mu\text{m}$  micro-nano fiber versus external refractive index

## 3 实验结果与分析

采用相干检测法来获取光纤的布里渊频谱,图 3 所示为对应的实验系统图。使用波长为 1550 nm

的分布反馈激光器(DFB)作为光源,经过 80:20 的耦合器(coupler)将光源分为两路,其功率占比 20% 的输出光经过掺铒光纤放大器(EDFA1)进行放大后通过环形器(circulator)入射到微纳光纤(sensing

fiber)中。功率占比 80% 的输出光作为本地振荡与从环形器 3 口输出的散射信号拍频,信号经过光电探测器(photodiode)转换成 GHz 量级的电信号,再用频谱仪(signal analyzer)观察。

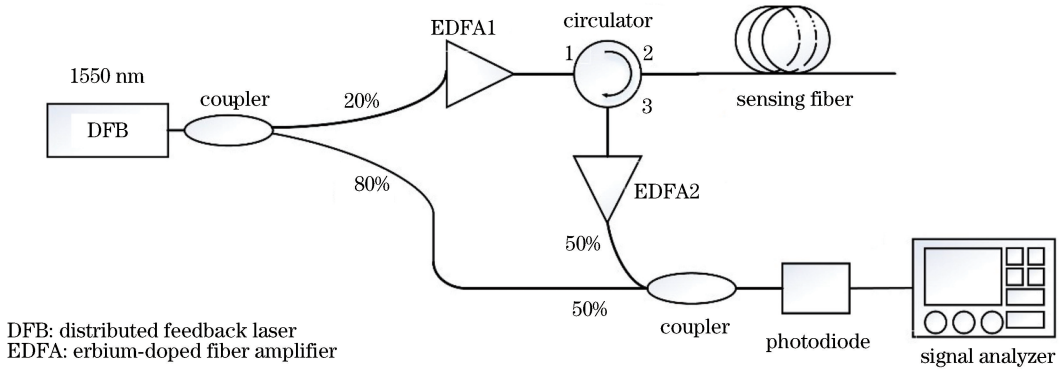


图 3 实验系统图

Fig. 3 Experimental system diagram

利用火焰拉伸法<sup>[20]</sup>将长度为 3 m 的普通单模光纤尾端拉制成直径为 2  $\mu\text{m}$ 、总长度为 20 cm 的微纳光纤,其中:微纳光纤均匀区长度约为 9.5 cm;前端和后端锥区长度分别为 5.5 cm 和 4.7 cm。为避免温度对布里渊频移的影响,整个实验环境在 26  $^{\circ}\text{C}$  室温下进行。在制备微纳光纤前,测试了单模光纤的布里渊散射峰,如图 4 中点线所示,单模光纤长度约为 3 m。其布里渊主峰中心频率在 10.8 GHz 附近,由于光纤不均匀,在频率 10.7~11.1 GHz 之间均能观察到频率分量。将单模光纤末端拉制成微纳光纤后,测到的布里渊频谱如图 4 中实曲线[micro-nano fiber(air)]所示,发现其呈现多峰形式。与单模光纤中的布里渊频谱相比,除单模尾纤产生的布里渊信号峰外,还测到低频处的 a、b 两个峰。显然这两个布里渊信号峰是微纳光纤中特有的频率信号,是光场基模和混合声波模式相互作用的结果<sup>[13]</sup>。将微纳光纤完全浸没到折射率为 1.3333 的去离子水中,并保持光纤水平拉直状态,以减少杂质和弯曲损耗对散射信号的影响,得到图 4 中虚线[micro-nano fiber(water)]。图中可以看到 a、b 峰值功率减小,这是由于微纳光纤中有一部分光场以倏逝场的形式分布在去离子水中,而水对波长为 1550 nm 的光吸收较大,进而导致功率损耗。与空气中的频谱相比,在水中的布里渊频谱能看到明显的频率右移,主要是因为环境折射率增加,使得微纳光纤的  $n_{\text{eff}}$  变大,从而引起布里渊频率右移。

为观察液体折射率对微纳光纤布里渊频移的影响,在去离子水中加入不同浓度的氯化钠溶液使液

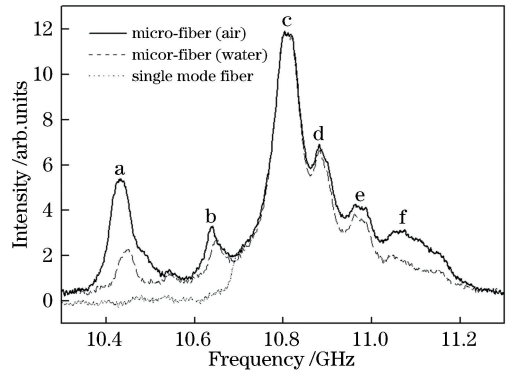


图 4 单模光纤与微纳光纤的布里渊散射峰图

Fig. 4 Brillouin scattering peaks in single mode fiber and micro-nano fiber

体折射率发生变化,并用光折射率计检测每次的折射率值。其中 a、b 两个布里渊信号峰随折射率变化关系如图 5 所示。可以看到,当折射率从 1.3333 变化到 1.3612 时,a 峰的频移值由 10.44284 GHz 增大到 10.45500 GHz,增大了 12.16 MHz;b 峰的频移由 10.64581 GHz 增大到 10.65517 GHz,增大了 9.36 MHz。

实验测量了 a、b 两个峰在 1.3333、1.3349、1.3402、1.3438、1.3486、1.3512、1.3572 和 1.3612 这 8 个折射率下的布里渊频谱,通过拟合得到中心频率与环境折射率的对应关系,如图 6 所示。其中两条虚线分别是 a、b 两个峰频移实验结果。由图可见这两个布里渊信号峰与折射率都具有非常良好的线性关系,10.4 GHz 左右的布里渊信号峰的折射率灵敏度为 369.6 MHz/RIU,10.6 GHz 左右的布里渊信号峰的折射率灵敏度为 311.3 MHz/RIU。理论

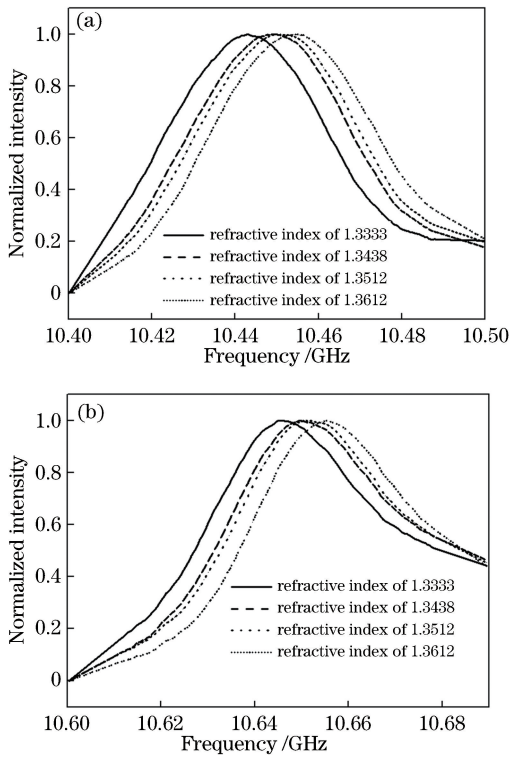


图5 在不同折射率下布里渊信号峰的频移。  
(a) a 峰的布里渊频移; (b) b 峰的布里渊频移

Fig. 5 Frequency shifts of Brillouin peaks at different refractive indexes. (a) Brillouin frequency shift of peak a; (b) Brillouin frequency shift of peak b

上,假设声场完全限制在光纤中并且只以纵波模式沿光纤轴向传播,在  $2\ \mu\text{m}$  直径光纤中传播速率约为  $5880\ \text{m/s}$ ,根据(1)式,外界折射率变化与布里渊频移对应关系理论折射率灵敏度要高于实验结果,如图6中实线所示。这是因为在微纳光纤中,声场的轴向和径向声波会发生耦合,而布里渊过程中的实际声速速率小于  $5800\ \text{m/s}$ ,所以实验获得的灵敏度有所降低。

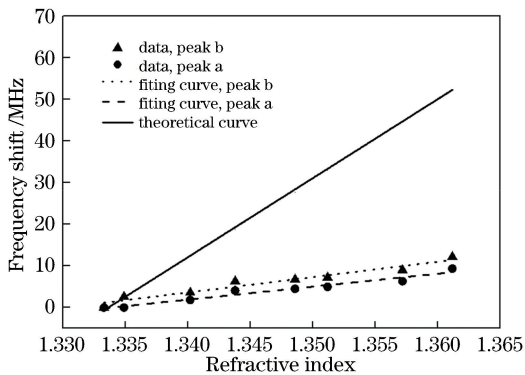


图6 布里渊频移关于折射率的线性拟合

Fig. 6 Linear fitting of Brillouin frequency shift related to refractive index

## 4 结 论

提出了利用微纳光纤中布里渊散射进行折射率传感,理论分析了折射率对光纤布里渊频移的影响。实验中利用  $2\ \mu\text{m}$  直径光纤中的布里渊散射信号,实现了对氯化钠溶液折射率的测量。结果表明,微纳光纤中频率为  $10.4\ \text{GHz}$ 、 $10.6\ \text{GHz}$  左右的布里渊信号峰频移与环境折射率呈线性关系,且折射率灵敏度分别为  $369.6\ \text{MHz/RIU}$  和  $311.3\ \text{MHz/RIU}$ 。该技术为折射率传感提供新的思路,理论上通过高空间分辨率的布里渊传感系统,在未来工作中可实现折射率的分布式测量。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang X P, Peng W, Liu Y, *et al.* Core-cladding mode recoupling based fiber optic refractive index sensor[J]. Optics Communications, 2013, 294: 188-191.
- [2] 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.
- [3] Peng X L, Li B, Li Y L. Research progress of refractive index and concentration sensors based on micro-nanofiber Bragg grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 120010.  
彭星玲, 李兵, 李玉龙. 微纳光纤布拉格光栅折射率与浓度传感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 120010.
- [4] 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.
- [5] Allsop T, Reeves R, Webb D J, *et al.* A high sensitivity refractometer based upon a long period grating Mach-Zehnder interferometer[J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73(4): 1702-1705.
- [6] Hu Y H, Jiang C, Zhou M, *et al.* High-sensitivity fiber temperature and refractive index sensing with nonadiabatic fiber taper [J]. Journal of Optical Technology, 2018, 85(4): 233-237.
- [7] Kurashima T, Horiguchi T, Tateda M. Thermal

- effects of Brillouin gain spectra in single-mode fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1990, 2(10): 718-720.
- [8] Horiguchi T, Kurashima T, Tateda M, *et al.* Brillouin characterization of fiber strain in bent slot-type optical-fiber cables [J]. Journal of Lightwave Technology, 1992, 10(9): 1196-1201.
- [9] Li J T. The research of the distributed sensing technique based on Brillouin scattering [D]. Xi'an: Xidian University, 2015.  
李江涛. 基于布里渊散射的分布式传感技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [10] Shang Q F, Hu Y T. Research progress of dynamic measurement technology based on Brillouin optical time-domain analysis [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 100004.  
尚秋峰, 胡雨婷. 基于布里渊光时域分析的动态测量技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 100004.
- [11] Minardo A, Porcaro G, Giannetta D, *et al.* Real-time monitoring of railway traffic using slope-assisted Brillouin distributed sensors [J]. Applied Optics, 2013, 52(16): 3770-3776.
- [12] Glišić B, Posenato D, Inaudi D. Integrity monitoring of an old steel bridge using fiber optic distributed sensors based on Brillouin scattering [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6531: 65310P.
- [13] Wang F, Sun Z Q, Zhu F, *et al.* Research on the leakage monitoring of oil pipeline using BOTDR [C]//2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium ( PIERS ), August 8-11, 2016, Shanghai, China. New York: IEEE, 2016: 4907-4910.
- [14] Cheng G X. L. Brillouin and Brillouin scattering [J]. The Journal of Light Scattering, 2018, 30(3): 284-296.  
程光煦. L. 布里渊与布里渊散射 [J]. 光散射学报, 2018, 30(3): 284-296.
- [15] Vienne G, Grelu P, Pan X Y, *et al.* Theoretical study of microfiber resonator devices exploiting a phase shift [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2008, 10(2): 025303.
- [16] Brambilla G. Optical fibre nanowires and microwires: a review [J]. Journal of Optics, 2010, 12(4): 043001.
- [17] Beugnot J C, Lebrun S, Pauliat G, *et al.* Brillouin light scattering from surface acoustic waves in a subwavelength-diameter optical fibre [J]. Nature Communications, 2014, 5: 5242.
- [18] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics [M]//Christiansen P L, Sørensen M P, Scott A C. Nonlinear science at the dawn of the 21st century. Lecture notes in physics. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000, 542: 195-211.
- [19] Boyd R W. Nonlinear optics [M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2003.
- [20] Brambilla G, Finazzi V, Richardson D J. Ultra-low-loss optical fiber nanotapers [J]. Optics Express, 2004, 12(10): 2258-2263.