文章编号: 0253-2239(2010)06-1608-05

基于环形反射面的全光纤法-珀干涉式折射率传感器

柯 涛[1] 朱 涛[1,2*] 饶云江[1,2] 段德稳[1] 徐 敏[1]

([1] 重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044
[2] 电子科技大学通信学院宽带光纤传输及通信网络技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054)

摘要 通过在单模光纤后依次熔接一段大芯径空芯光纤和一段小芯径空芯光纤,制作了一种由小芯径空芯光纤形成环形反射面的全光纤法-珀腔。由于这种环形反射面结构的中间通孔适合气体或低粘度液体进出,因此可将其应用于气体或低粘度液体的折射率测量。分析了这种结构形成光纤法-珀腔的机理,并实验研究了这种基于环形反射面的干涉式折射率传感器,得到了这种传感器用于折射率测量时的分辨率约为 1.652×10^{-6}。可以预见这种具有环形反射面的法-珀干涉式折射率传感器在有毒、易燃、易爆的气体以及低粘度液体的折射率或含量检测中具有极大的潜在应用价值。

关键词 光纤传感;法布里-珀罗(法-珀)干涉仪;环形反射面;折射率

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20103006.1608

All-Fiber Fabry-Pérot Interferometer Refractive Index Sensor Formed by Ring Reflector

Ke Tao[1] Zhu Tao[1,2] Rao Yunjiang[1,2] Duan Dewen[1] Xu Min[1]

([1] *Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing* 400044, *China*
[2] *Key Lab oratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks Technologies, Education Ministry of China, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu, Sichuan* 610054, *China*)

Abstract All-fiber Fabry-Pérot based on ring reflector structure is fabricated by orderly splicing two section of hollow fibers with different core diameters to the light induced single-mode fiber. As the small hole in the ring surface is easy for gas or liquid in and out the cavity, it is useful in detecting the refractive index of gas and liquid. The forming theory of the fiber\optic Fabry-Pérot cavity is analyzed, and the refractive index sensor base on ring reflector is studied by experiments. A resolution of the refractive index 1.652×10^{-6} is obtained in a measuring refractive index experiment. It can be anticipated that the Fabry-Pérot refractive index sensors with ring reflector will have important applications in the fields of the toxic, flammable, explosive gases and low viscosity liquid refractive index or content detection.

Key words optical fiber sensors; Fabry-Pérot interferometer; ring reflector; refractive index

1 引 言

光纤法-珀干涉仪(FPI)以其精度高、分辨率高、体积小、抗腐蚀和抗电磁干扰优点而被广泛地应用于应变、位移、压力、加速度以及折射率测量

收稿日期: 2009-07-16; **收到修改稿日期:** 2009-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(60807019)、重庆市自然科学基金(CSTC2008BB2165)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0602)资助课题。

作者简介: 柯 涛(1983—),男,硕士研究生,主要从事光纤通信及传感技术方面的研究。E-mail: ketao365@163.com

导师简介: 饶云江(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感及通信技术方面的研究。E-mail: yirao@cqu.edu.cn

* **通信联系人。** E-mail: zhutao@cqu.edu.cn

中[1~4]。光纤法-珀腔通常分为本征法-珀腔，非本征法-珀腔，在线型光纤法-珀腔[5]。本征法-珀腔是光纤本身作导光介质，在测量过程中温度交叉影响大。非本征光纤法-珀腔的导光介质是空气，但由于大多采用光学胶胶粘的结构，因此结构稳定性差。而在线型法-珀腔的典型结构如单模光纤中间熔接上一段空芯光子晶体光纤形成法-珀腔，光在空芯光子晶体光纤内的空气孔中传播，具有温度影响小、结构稳定和测量精度高等优点[6]。

光纤法-珀干涉式折射率传感器一直受到人们的重视，然而通过外界折射率改变法-珀腔干涉谱对比度来测量折射率的方式获得的理论分辨率一般在 $10^{-4}\sim10^{-5}$ 数量级[7~9]，且对比度还易受光强波动的影响。混合气体(低粘度液体)的折射率由其所含气体(低粘度液体)的浓度比决定[10~12]。由于折射率在不同浓度的液体或气体之间，其值相差不大，特别是不同气体折射率相差在 10^{-4} 数量级，要实现对气体(低粘度液体)浓度进行有效的测量则需要有更高的折射率分辨率和稳定性的传感器。

本文利用电弧放电熔接方法将不同芯径的空芯光纤熔接成具有环形反射面结构的在线型法-珀腔，光在空芯光纤内的空气孔中传播，具有温度交叉影响小等优点[6]。测量气体折射率的实验表明，具有 1.652×10^{-6} 的折射率分辨率。可以预见这种具有环形反射面结构的全光纤法-珀腔可以对混合气体或低粘度液体的浓度和折射率进行有效的测量。

2　法-珀腔的结构及原理

基于环反射面法-珀腔的结构如图 1 所示，用光纤熔接机在单模光纤 SMF28 后熔接一段内径为 80 μm，外径为 200 μm 的大芯径空芯光纤(燕山大学候蓝田教授提供)，然后在显微镜下切割大芯径空芯光纤(切割的同时测量大芯径空芯光纤长度)，使预留大芯径空芯光纤的长度比设计的法-珀腔的腔长长5～10 μm，接着在大芯径空芯光纤末端熔接一段内径为 9 μm，外径为 125 μm 的小芯径空芯光纤(北京玻璃所究院定制)，在显微镜下用光纤切割刀切割小芯径空芯光纤，使其尽量短。

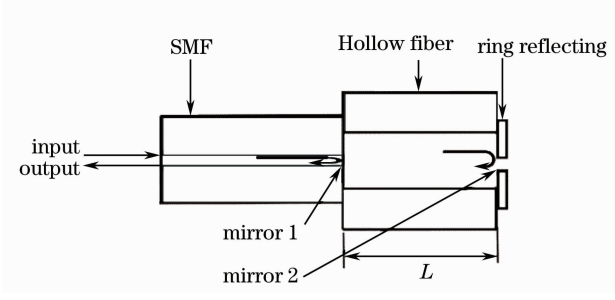

图 1　环形反射面法-珀腔的结构

Fig. 1　Configuration of ring reflecting FPI

从 SMF28 出射的光是束腰直径约为 10.4 μm 的高斯光束，其进入大芯径空芯光纤的一段距离内，是一个相对自由空间，存在夫琅禾费衍射，高斯光束的束腰将扩展，中心幅值减小，如图 2 所示，其中扩展角[13]

$$\theta_{\mathrm{d}} \approx \arctan\left(\frac{\lambda}{\pi n w_0}\right), \tag{1}$$

则由几何关系可得当光在大芯径空芯光纤内传播的距离为 d 时，扩束后的高斯光束的束腰半径为

$$w = \frac{d\lambda}{\pi n w_0}. \tag{2}$$

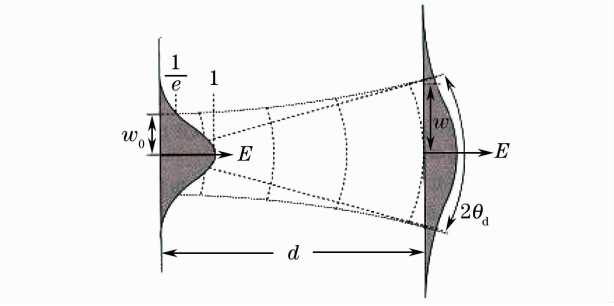

图 2　高斯光束在自由空间的扩束

Fig. 2　Gaussian beam spread in the freedom space

当束腰直径增大到接近 80 μm 时，由于大芯径空芯光纤壁的反射，部分光折射出空芯光纤而损耗掉，部分光反射回纤芯空气层中继续传播。运用商业化光学软件 OptiBPM 仿真波长 1550 nm 的光从 100 μm 长的 SMF28 进入 600 μm 长的空芯光纤，其传输特性如图 3(a)所示。

Z 为 267.8 μm 处(即是法-珀腔长为 167.8 μm 时)的高斯光束的光强分布，如图 3(b)所示。由于此处为中心通孔的环型反射面，因此中心有直径约为 9 μm 的光从环型反射面中心通孔直接出射，而其余部分的光被环型反射面反射回大芯径空芯光纤内，再耦合进入 SMF28 光纤，由此这束由环型反射面反射回的光与反射面 1 反射回的光存在光程差，这两束光将发生干涉，形成法-珀腔，在弱反射情况下其干涉谱为[14]

$$I_R = \frac{R_1 + R_2 + 2R_1R_2\cos\delta}{1 + R_1R_2 + 2R_1R_2\cos\delta}\alpha I_{\mathrm{i}}, \tag{3}$$

式中 R_1，R_2 分别是两反射面的反射率，$\delta = 4n\pi L/\lambda$ 为光学相位，α 是光在大芯径空芯光纤内传输以及与单模光纤耦合的能量总损耗系数，I_{i} 是法-珀腔的

入射光强。通过 SI720 光谱仪采集的不同腔长环形反射面结构法-珀腔的干涉光谱如图 4 所示，可见此种法-珀腔的干涉谱具有较高的对比度，有利于后续对传感器的信号进行解调 。

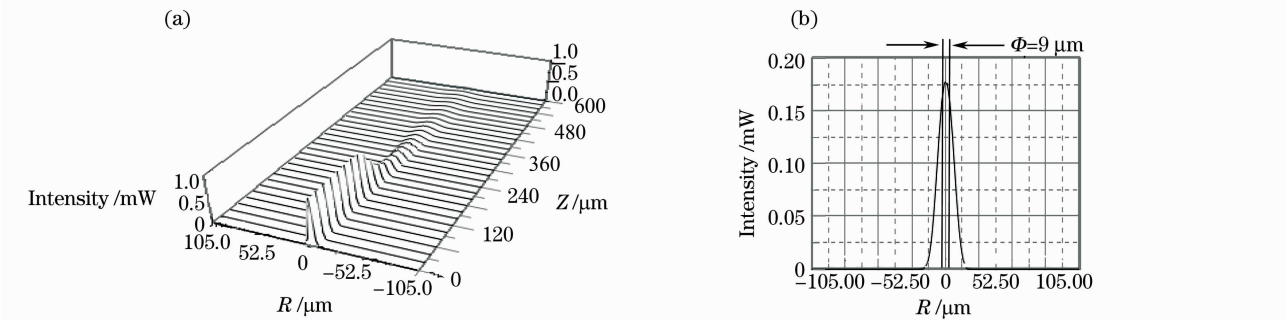

图 3 (a)高斯光束的大芯径空光纤中的传输 ，(b) $Z=267.8$ μm 处能量分布图

Fig. 3 (a)Propagating Gaussian beam in hollow fiber, (b) power distribution of $Z=267.8$ μm

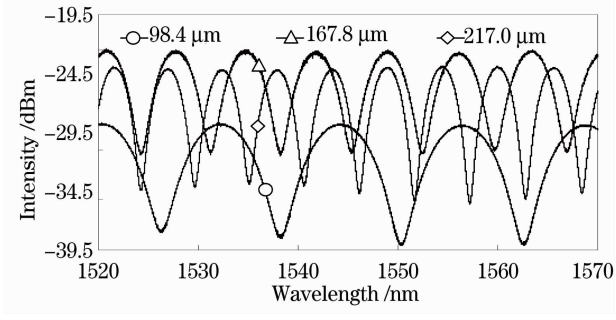

图 4 不同长度的环型反射面法-珀腔干涉谱线

Fig. 4 Interference spectrums of different lengths of ring reflecting Fabry-Pérot Interferometer

3 实验及讨论

当温度在 15 ℃～30 ℃之间时，空气的折射率为[15]

$$n=1+2.8793\times10^{-9}\times P/(1+0.003671t), \tag{4}$$

式中 P，t，n 分别是气体的压强(单位为 Pa)，温度(单位为℃)和折射率。实验装置如图 5 所示。由此通过对一个密闭气室在恒温下加压来产生折射率渐变的气体。

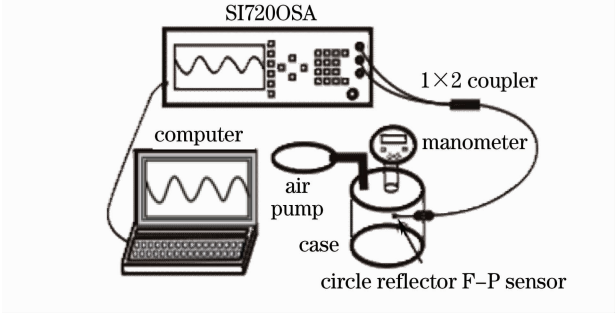

图 5 折射率实验系统

Fig. 5 Experimental system of gas refractive index

气室采用的是钢材料，导热性好，可以认为整个实验过程气室内的温度恒定(室温 25 ℃)，即此时气室内的空气折射率是其内压强的一次函数。调节气泵使气室内的压强增大(数字压力表 CST2008，分辨率 0.1 kPa)，气室内的气体折射率会线性增加，而折射率的增大会引起法-珀腔的光学相位发生变化，从而导致法-珀腔的干涉谱发生变化，用 SI720 光谱仪(美国微光公司生产，其工作波长范围为 1520～1570 nm，波长分辨率为2.5 pm)可探测这种谱线变化，由于该法-珀传感器的干涉谱对比度高，波长周期较小，所以可以利用找波谷波长的漂移来解调得出气体的折射率。实验中用气泵为气室加压，压强从标准大气压 101 kPa 增加到 401 kPa，每次增加 5 kPa，所用法-珀腔的腔长为约 167.8 μm，得到法-珀干涉谱随压强变化的波长漂移关系如图 6(a)所示。通过(4)式将得到不同压强对应的空气折射率，其波长漂移随气室内空气折射率变化的关系如图 6(b)所示。

由于折射率变化相对较小，法-珀腔干涉谱的波谷对应的相位不变，由(3)式的相位关系，可得 $\lambda=n\lambda_0/n_0$，n_0，n，λ_0，λ 分别为加压前后气室内空气的折射率和法-珀腔干涉谱波谷波长，得出如图 7 所示的法-珀腔干涉谱波谷(图中取的是实验所用法-珀腔的第一个波谷)对应的波长随气室内空气的折射率变化实验曲线与理论曲线的对比图。

由图 6(b)和图 7 可知这种环形反射面结构法-珀腔的干涉谱的波长漂移与气体的折射率的变化具有很好的线性关系，且与理论值具有良好的一致性。整个加压过程，折射率变化量为 0.000791，对应的法-珀腔的波长变化量为 1.197 nm，单位折射率的波长漂移量约为 1513.244 nm，对于波长分辨率为 2.5 pm的光谱仪(SI720)，其折射率的分辨率约为

1.652×10^{-6}，可见这种通过被测物进入法-珀腔内引起干涉谱漂移测量折射率的方法比文献[4～6]通过外界折射率改变法-珀腔干涉谱对比度来测量折射率的方法获得的分辨率高一到两个数量级。

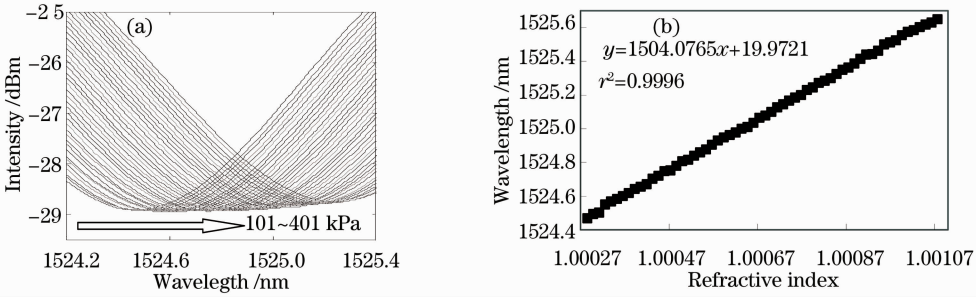

图 6　(a)法-珀干涉谱随压强变化的波长漂移关系，(b)波长与气体折射率的关系

Fig. 6　(a) Relationship between the F-P interference spectrum wavelength shift and pressure, (b) The relationship between the wavelength and the gas refractive index

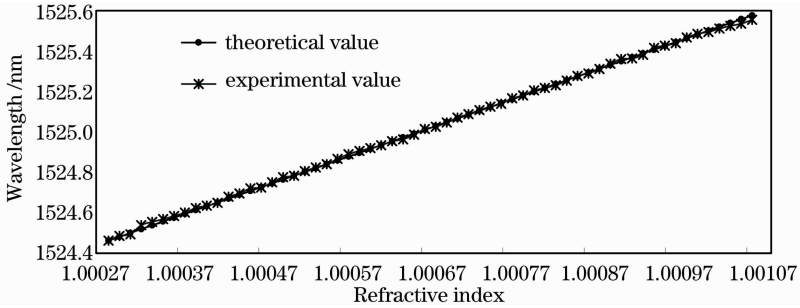

图 7　实验值与理论值的对比

Fig. 7　Comparison between measured and theoretical values

由于环形反射面的中心通孔直径为9 μm，远大于一般液体分子的直径，因此对于低粘度，易挥发的液体(如汽油，酒精等)可以缓慢地进入腔体内，只是液体进入的时间相对气体进入腔体内的时间要稍长(约 10 min)，液体在进入腔体过程中，法-珀腔的干涉谱线发生明显的变化，待腔内充满液体后，法-珀腔的干涉谱线稳定，此时可以采集法-珀腔的干涉谱，通过计算得到液体的折射率。再次使用该传感器时，可将内有低粘度，易挥发的液体传感器置于相对高温干燥的环境中(实际应用可采用如对传感器鼓吹热风的方式来达到快速清除法-珀传感器腔体内的液体的目的)，使其内的液体挥发出去，使得传感器可再次使用，因此该法-珀折射率传感器对于实时性要求不高的低粘度，易挥发液体折射率测量也是实用的。

另外由于采用的是法-珀腔反射谱的波长漂移量来测量折射率，根据(3)式可知，法-珀腔的物理长度 L 越小，相同折射率变化的 n 对应的波长变化量越大，这样可以提高法-珀腔测量气体折射率的精度。

4　结　　论

报道了一种环形反射面结构的法-珀腔，由于这种法-珀腔环形反射面中心有通孔，十分适合气体进出腔体，从而实现了通过探测法-珀腔干涉谱的波长漂移来测量气体或液体的折射率。理论分析了这种环形反射面结构形成法-珀腔的机理。实验结果表明其测量折射率的分辨率约为 1.652×10^{-6}，可以预见这种具有结构简单、稳定性好、分辨率高、以及抗腐蚀等优点的环形反射面结构法-珀干涉式折射率传感器在有毒、易燃、易爆气体以及低粘稠度的液体折射率和含量检测领域中具有广阔的应用前景。

参　考　文　献

1 Yun jiang Rao, Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors [J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, **12**(3): 227～237

2 Wang Wei, Rao Yunjiang, Tang Qingtao *et al*.. Micromachining of an in-fiber extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensor by using a femtosecond laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1660～1664
王　维，饶云江，唐庆涛 等. 飞秒激光加工的微型光纤法布里-珀罗干涉传感器 [J]. 中国激光，2007，**34**(12)：1660～1664

3 Rao Yunjiang, Li Hong, Zhu Tao *et al*.. High temperature strain sensor based on in-line Fabry-Pérot Interferometer formed by hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1484～1492
饶云江，黎　宏，朱　涛 等. 基于空芯光子晶体光纤的法-珀干涉式高温应变传感器 [J]. 中国激光，2009，**36**(6)：1484～1492

4 Liao Xian, Rao Yunjiang Ran Zengling *et al*., Simultaneous

measurement of high-temperature and strain using a combined long-period fiber grating/Fabry-Pérot sensor fabricated by laser pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 884～888
廖 弦，饶云江，冉曾令 等. 激光脉冲制作的长周期光纤光栅/法布里-珀罗高温-应变组合传感器[J]. 中国激光，2008，**35**(6)：884～888

5 J. Sirkis, T. A. Berkoff, R. T. Jones *et al.*. in-Line fiber etalon (ILFE) fiber-optic strain sensors [J]. *J. Lightwave Technology*, 1995, **13**(7): 1256～1263

6 Y. Rao, T. Zhu, X. Yang *et al.*, In-line fiber-optic etalon formed by hollow-core photonic crystal fiber [J], *Opt. Lett.*, 2007, **32**(18): 2662～2664

7 Y. Rao, M. Deng, D. Duan *et al.*. In-line fiber Fabry-Pérot refractive-index tip sensor based on endlessly photonic crystal fiber [J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, **148**(1): 33～38

8 Su Hui, Huang Xuguang, Wu Yiting. Design and study of fiber refractive index sensor based on intensity modulation [J]. *Acta Photonic Sincia*, 2007, **37**(4): 713～715
苏 辉，黄旭光，邬怡婷. 强度调制型光纤折射率传感器的设计与研究[J]. 光子学报，2007，**37**(4)：713～715

9 Liu Weijun, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Novel Fabry-Pérot fiber-optic refractive-index sensor based on laser micromachining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1400～1403
刘为俊，饶云江，冉曾令 等. 基于激光微加工的新型光纤法布里-珀罗折射率传感器[J]. 光学学报，2008，**28**(7)：1400～1403

10 U. Willer, D. Scheel, I. Kostjucenko *et al.*. Fiber-optic evanescent-field laser sensor for in-situ gas diagnostics [J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 2002, **58**(11): 2427～2432

11 Yin Fangxiong, Gas concentration translation method in gas concentration detection using optical interferometer methane detector [J]. *Coal Mine Safety*, 1997, **6**: 31～33
尹芳雄. 用光干涉式甲烷测定器测定其它气体浓度的换算方法[J]. 煤矿安全，1997，**6**：31～33

12 Yang Xiufang, Wang Xiaoming, Gao Zonghai *et al.*. Search on liquid concentration realtime detecting system based on Fabry-Pérot interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1343～1346
杨秀芳，王小明，高宗海 等. 基于法布里珀罗干涉仪的液体浓度实时检测系统的研究[J]. 光学学报，2005，**25**(10)：1343～1346

13 A. Yariv. Optical Electronics in Modern Communications (Fifth Edition) [M]. Oxford University Press, 1997. 52～53

14 Rao Yunjiang, Wang Xijing, Zhu Tao *et al.*. Demodulation algorithm for frequency-division-multiplexed fiber-optic fizeau strain sensor networks [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 997～1000
饶云江，王希晶，朱 涛 等. 光纤菲佐传感器频分复用网络解调方法研究[J]. 光学学报，2006，**26**(7)：997～1000

15 K. P, Buch, M. J. Downs. An updated Edlen equation for the refractive index of air [J]. *Metrologies*, 1993, **30**: 155～162