

光纤法布里-珀罗复合结构折射率传感器的灵敏度分析*

龚元 郭宇 饶云江[†] 赵天 吴宇 冉曾令

(电子科技大学通信与信息工程学院, 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

(2010年8月2日收到; 2010年8月4日收到修改稿)

理论上推导了光纤法布里-珀罗复合结构传感器的反射光谱条纹对比度与外界介质折射率的关系, 并分析了实验参数对传感器灵敏度的影响. 利用化学腐蚀渐变折射率多模光纤制作了光纤法布里-珀罗复合结构折射率传感器, 空气中的条纹对比度可达 30 dB 以上, 折射率测量的灵敏度达 45 dB/RIU (refraction index unit, 简 RIU) 以上. 实验结果与理论符合很好. 通过理论和实验分析, 提出了进一步提高传感器灵敏度的方法.

关键词: 光纤传感器, 法布里-珀罗复合结构, 折射率测量, 灵敏度

PACS: 42. 81. Pa, 07. 60. Ly, 07. 60. Hv

1. 引言

折射率测量在工业中有着广泛的应用, 其测量方法有很多种. 最成熟的阿贝折射仪耐恶劣环境能力差、操作复杂、无法实现远程实时监控且测量精度低. 光纤传感器^[1-4] 由于具有体积小、精度高、抗电磁干扰能力强等优势, 近年来得到了广泛关注. 光纤折射率传感器耐恶劣环境能力强, 常见的主要有光纤表面等离子体型^[5]、光纤光栅型^[6-9] 以及光纤干涉仪^[10-13]. 目前, 用法布里-珀罗 (F-P) 传感器来测量介质折射率一般有两种方法. 一种是将待测介质注入 F-P 腔的空腔内, 利用反射光谱的条纹漂移来测量介质折射率^[10-12]. 这种方法测量的灵敏度较高, 但介质的注入、吸出与清洗较困难, 并且 F-P 腔的反射一般需要镀膜来提高对比度. 另一种是将传感头没入待测介质, 利用反射光谱的条纹对比度来测量折射率^[13, 14]. 这类传感器制作和测量过程比较简单. 目前利用该方法测量折射率, 都近似认为折射率在一定范围内与条纹对比度呈线性关系, 然而线性范围一般较窄, 无法实现宽范围的折射率测量.

本文从理论上得出了三反射面光纤 F-P 复合

结构传感器的反射光谱条纹对比度与外界介质折射率的函数关系. 指出折射率测量无需依赖传感器的线性度, 只需确定的温度下两个标准的折射率值定标即可实现宽范围、高精度、高灵敏度的折射率测量. 测量前利用空气校准, 可以消除温度和传感头老化等因素引起的测量误差, 校准过程简单. 利用化学腐蚀渐变折射率多模光纤制作了光纤 F-P 复合结构折射率传感器, 空气中的条纹对比度可达 30dB 以上, 折射率测量的灵敏度达 45 dB/RIU (refraction index unit, 简记为 RIU) 以上. 研究了折射率测量灵敏度与传感器结构、所测折射率大小以及特定波长处双光束干涉光强的关系, 指出灵敏度最大化的条件, 这对传感器的制作和观察波长的选取具有指导意义. 通过折射率实验验证, 实验数据与理论拟合曲线符合得很好.

2. 理论分析

由于未镀膜的光纤端面的反射率较低, 因此采用三光束干涉模型, 如图 1 所示. 考虑反射光从光疏到光密介质所引起的半波损失, 三反射光干涉的光强可表示为

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60537040) 和区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室基金资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: yjrao@uestc.edu.cn

$$I_{r\text{III}} = \begin{cases} (R_I + R_{\text{II}} + R_{\text{III}}) + [-2\sqrt{R_I R_{\text{II}}}\cos\delta_1 - 2\sqrt{R_{\text{II}} R_{\text{III}}}\cos\delta_2 + 2\sqrt{R_I R_{\text{III}}}\cos(\delta_1 + \delta_2)] I_i & (n \leq n_1), \\ (R_I + R_{\text{II}} + R_{\text{III}}) + [-2\sqrt{R_I R_{\text{II}}}\cos\delta_1 + 2\sqrt{R_{\text{II}} R_{\text{III}}}\cos\delta_2 - 2\sqrt{R_I R_{\text{III}}}\cos(\delta_1 + \delta_2)] I_i & (n > n_1), \end{cases} \quad (1)$$

其中, $R_I, R_{\text{II}}, R_{\text{III}}$ 分别为三束反射光在复合 F-P 腔中的等效反射率, 其值不仅取决于光纤反射面的反射率, 还与反射面的透射率有关; I_i 为入射光强; δ_1 是光线在反射面 1 和反射面 2 之间一个来回的光程, $\delta_1 = 4\pi n_0 L_1/\lambda$; δ_2 是光线在反射面 1 和反射面 2 之间一个来回的光程, $\delta_2 = 4\pi n_1 L_2/\lambda$.

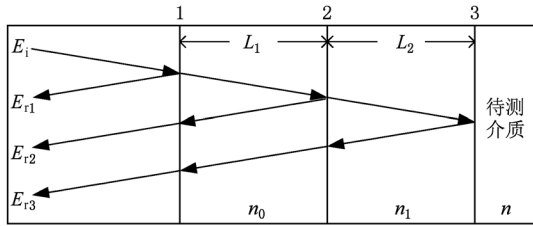


图 1 光纤 F-P 复合结构传感器的三光束干涉模型

本文重点分析 $n < n_1$ 的情况, $n > n_1$ 情况与此类似. 由于在实际情况中 δ_2 远远大于 δ_1 , 因此即使 $\cos \delta_2$ 取遍一个周期内的所有值, $\cos \delta_1$ 也只发生很小变化, 可以近似看作一个常量. 所以, 根据 (1) 式, 令 $dI_r/d(\cos\delta_2) = 0$, 可以求得

当 $\cos\delta_2 = \frac{\cos\delta_1 \sqrt{R_I} - \sqrt{R_{\text{II}}}}{\sqrt{R_I + R_{\text{II}}} - 2\sqrt{R_I R_{\text{II}}}\cos\delta_1}$ 时, 三光束干涉的光强 $I_{r\text{III}}$ 取得最大值

$$\begin{aligned} \frac{I_{r\text{III}}^{\max}}{I_i} &= (R_I + R_{\text{II}} + R_{\text{III}}) - 2\sqrt{R_I R_{\text{II}}}\cos\delta_1 \\ &\quad + 2\sqrt{R_{\text{III}}(R_I + R_{\text{II}} - 2\sqrt{R_I R_{\text{II}}}\cos\delta_1)} \\ &= \left(\sqrt{\frac{I_{r\text{II}}}{I_i}} + \sqrt{R_{\text{III}}}\right)^2; \end{aligned} \quad (2)$$

当 $\cos\delta_2 = \frac{\sqrt{R_{\text{II}}} - \cos\delta_1 \sqrt{R_I}}{\sqrt{R_I + R_{\text{II}}} - 2\sqrt{R_I R_{\text{II}}}\cos\delta_1}$ 时, 三光束干涉的光强 $I_{r\text{III}}$ 取得最小值

$$\begin{aligned} \frac{I_{r\text{III}}^{\min}}{I_i} &= (R_I + R_{\text{II}} + R_{\text{III}}) - 2\sqrt{R_I R_{\text{II}}}\cos\delta_1 \\ &\quad - 2\sqrt{R_{\text{III}}(R_I + R_{\text{II}} - 2\sqrt{R_I R_{\text{II}}}\cos\delta_1)} \\ &= \left(\sqrt{\frac{I_{r\text{II}}}{I_i}} - \sqrt{R_{\text{III}}}\right)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

(2) 和 (3) 式表明, 当 $I_{r\text{II}}$ 取最大值 $I_{r\text{II}}^{\max}$ 时, 即 $\cos\delta_1$

$= -1$ 时, 三光束干涉的光强 $I_{r\text{III}}$ 取最大值; 当 $\frac{I_{r\text{II}}}{I_i} =$

R_{III} 时, 即 $\cos\delta_1 = \frac{R_I + R_{\text{II}} - R_{\text{III}}}{2\sqrt{R_I R_{\text{II}}}}$ 时, 三光束干涉的

光强 $I_{r\text{III}}$ 取最小值 ($I_{r\text{III}} = 0$). 然而, 由于余弦函数的有界性, 并非任何情况下都可以取 $I_{r\text{III}}^{\min} = 0$. 取 $I_{r\text{III}}^{\min} = 0$ 时要满足

$$-1 \leq \cos\delta_1 = \frac{R_I + R_{\text{II}} - R_{\text{III}}}{2\sqrt{R_I R_{\text{II}}}} \leq 1. \quad (4)$$

上述分析表明, 三反射面的 F-P 复合结构获得高的条纹对比度的条件比一般 F-P 结构的条件宽松得多. 根据最小光强对应的波长位置不同, 其反射光谱可大致分为 3 种形式. 为了更加直观地理解这 3 种形式, 本文给出 3 种情况下的反射光谱的仿真结果, 如图 2 所示.

考虑 R_{III} 与传感头外部介质折射率 n 的关系, 令 $R_{\text{III}} = g(n_1 - n)^2/(n_1 + n)^2$. 其中 g 主要由传感器各反射面的透射率决定, 其值一般小于 1. 条纹对比度与折射率的关系为

$$\begin{aligned} V_r(\text{dB}) &= 10\lg \left(\frac{\sqrt{\frac{I_{r\text{II}}}{I_i}} + \sqrt{R_{\text{III}}}}{\sqrt{\frac{I_{r\text{II}}}{I_i}} - \sqrt{R_{\text{III}}}} \right)^2 \\ &= 10\lg \left(\frac{\sqrt{gI_i} + \frac{n_1 - n}{n_1 + n}}{\sqrt{gI_i} - \frac{n_1 - n}{n_1 + n}} \right)^2. \end{aligned} \quad (5)$$

对应于图 2 中每一个细条纹, 都可以作出一条 V - n 曲线. 理论上, 每一条曲线都与横坐标交于同一点, 该点的折射率值为光纤传感器端面的折射率 n_1 , 如图 3 所示.

对 (5) 式左右两边同时求 n 的导数, 可以得到反射光谱在任意波长处的折射率灵敏度 κ ,

$$\kappa = \frac{dV_r(\text{dB})}{dn} \approx \frac{-34.744 \sqrt{\frac{I_{r\text{II}}}{gI_i}}}{\frac{(n_1 + n)^2 I_{r\text{II}}}{n_1} - \frac{(n_1 - n)^2}{n_1}}. \quad (6)$$

从 (5) 和 (6) 式可以看出, 存在一个折射率转折

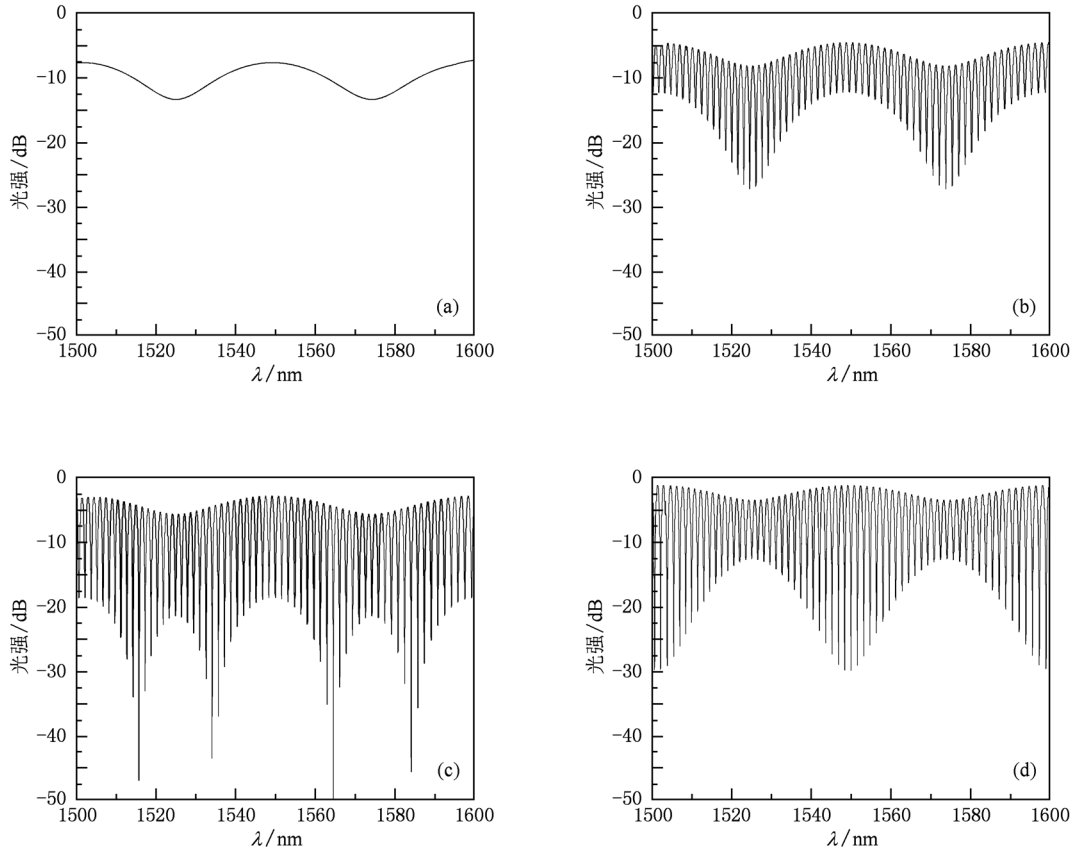


图2 F-P复合结构的反射光谱的3种形式 (a) $I_{r\parallel}$, (b) $R_{\text{III}} \leq I_{r\parallel}^{\text{min}}/I_i = R_I + R_{\text{II}} - 2\sqrt{R_I R_{\text{II}}}$, (c) $I_{r\parallel}^{\text{min}}/I_i < R_{\text{III}} < I_{r\parallel}^{\text{max}}/I_i$, (d) $R_{\text{III}} \geq I_{r\parallel}^{\text{max}}/I_i = R_I + R_{\text{II}} + 2\sqrt{R_I R_{\text{II}}}$

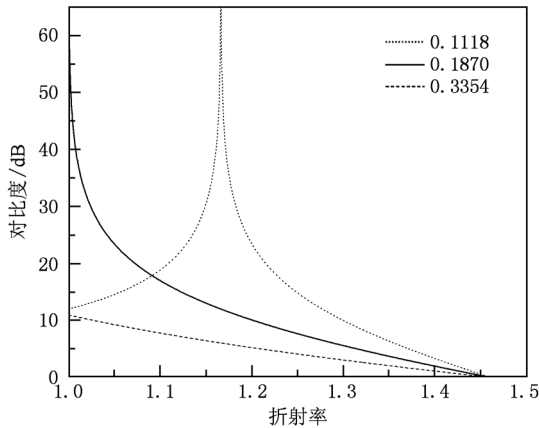


图3 不同的 $\sqrt{I_{r\parallel}/gI_i}$ 值对应的折射率-对比度曲线

点 n_Ω 为

$$n_\Omega = n_1 \left(1 - \sqrt{\frac{I_{r\parallel}}{gI_i}} \right) / \left(1 + \sqrt{\frac{I_{r\parallel}}{gI_i}} \right). \quad (7)$$

当 $n > n_\Omega$ 时, $\kappa < 0$, 条纹对比度随待测折射率 n 的增大而减小; 当 $n < n_\Omega$ 时, $\kappa > 0$, 条纹对比度随待

测折射率 n 的增大而增大; 当 $n = n_\Omega$ 时, 理论上 $V_r(\text{dB}) \rightarrow \infty, \kappa \rightarrow \infty$.

由于传感器的老化, 传感器的 g 值会下降. g 值的下降与 $I_{r\parallel}/I_i$ 的增大对灵敏度的影响是一样的, 它们共同引起 $\sqrt{I_{r\parallel}/gI_i}$ 值增大, 从而导致 $V-n$ 曲线中折射率转折点 n_Ω 的左移. 图3给出了传感器在不同的 $\sqrt{I_{r\parallel}/gI_i}$ 值下所对应的 $V-n$ 曲线. $R_I, R_{\text{II}}, n_1, g$ 由传感器自身结构决定. 图4为 $\sqrt{I_{r\parallel}/gI_i} = 0.1118$ 时的 $\kappa-n$ 曲线. 实际上, 对比度和灵敏度受限于噪声的影响和有限的光谱分辨率.

对于特定的共振波长, 传感器的 n_1 和 g 越大, n_Ω 越大; 对于确定的传感器结构, 观测点的 $I_{r\parallel}/I_i$ 越小, n_Ω 越大. 而所测折射率值越靠近 n_Ω , 灵敏度越高. 因此, 通过光纤材料的选取和制作方法的改进, 可以获得 n_1 和 g 值更大的传感器, 从而增大 n_Ω , 使得传感器测量液体折射率的灵敏度大大提高.

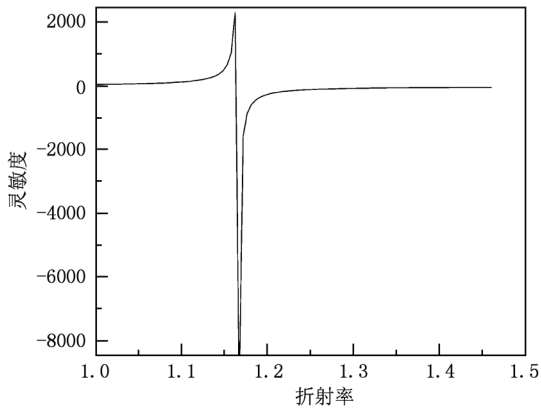


图4 $\sqrt{I_{r\parallel}}/gI_i = 0.1118$ 时的折射率-灵敏度曲线

3. 实验结果与分析

实验采用化学腐蚀渐变折射率多模光纤的方法,制作出了高性能、低成本的光纤 F-P 复合结构折射率传感器. 首先,将渐变折射率多模光纤在 40% 的 HF 溶液中腐蚀约 4 min,在其端面形成微孔. 将腐蚀过的多模光纤与普通单模光纤熔接形成空气腔,其腔长约为 32 μm . 再对多模光纤进行切割,形成光纤 F-P 复合结构传感器. 显微镜测得渐变折射率多模光纤的长度为 515 μm . 当渐变折射率多模光纤长度等于 1/4 节距的整数倍时,光经多模光纤端面反射后再次耦合进单模光纤时的效率非常高. 实验所用多模光纤的纤芯折射率约为 1.48,传感器的显微像如图 5 所示. 实验使用型号为 Sm125 的光谱仪测量传感器的反射条纹,折射率的定标采用的是阿贝折射计.

图 6(a) 为空气腔和光纤 F-P 复合结构传感器在空气中的反射光谱. 传感器在空气中的条纹对比

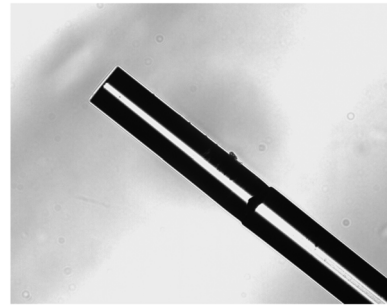


图5 传感头显微像

度高达 32 dB. 图 6(b) 为传感器在纯水中的反射光谱. 采用该传感器测量了不同浓度的蔗糖溶液在 15°C 时的折射率,折射率在 1.3329—1.4670 范围内变化.

在 1521, 1545 和 1569 nm 附近的实验数据中,选取折射率为 1.3329 和 1.4670 两个点,根据(6)式作出 $V-n$ 曲线,如图 7(a) 所示. 图 7(b) 为曲线在实验数据范围内的局部放大图. 在 1.3329—1.4670 的折射率范围内,拟合曲线近似为直线,与实验数据符合很好. 根据拟合曲线计算得到反射光谱在空气中的对比度与比实验值略有偏差,这种偏差主要来源于阿贝折射计对液体折射率的标定误差.

根据(7)式,该传感头在外界折射率约为 1.1105 时,反射光谱在 1569 nm 附近的条纹对比度达到最大. 根据(7)式可以求得传感头在 1569 nm 附近测量折射率为 1.3329 和 1.4670 介质时的灵敏度分别为 52.65 dB/RIU 和 41.57 dB/RIU. 线性拟合法求得的平均灵敏度为 45.82 dB/RIU,介于两者之间. 通过制作工艺的改进,可以使传感器的 g 值更高, n_Ω 值更大. 实验中我们观察到这种结构的光纤 F-P 传感器在外界折射率为 1.33 时的灵敏度可高

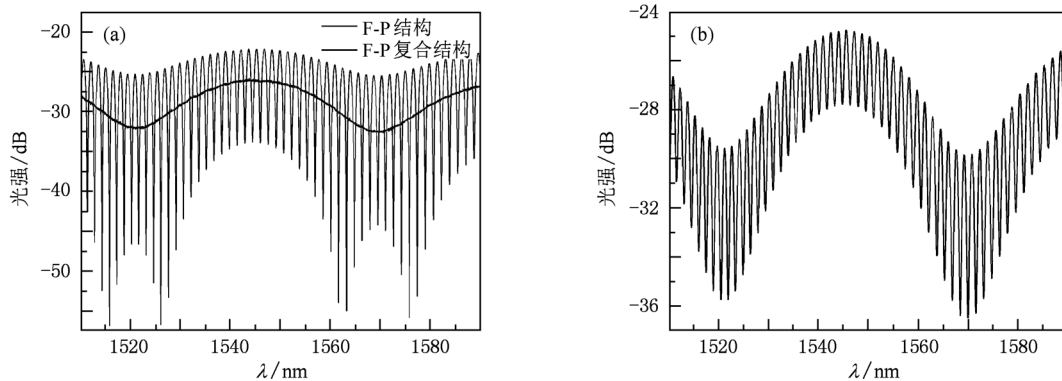


图6 传感器的反射光谱图 (a) 空气中的反射光谱, (b) 纯水中的反射光谱

达 160 dB/RIU, 对应的 n_{Ω} 为 1.31. 通过实验优化,

该传感器性能可以进一步提高.

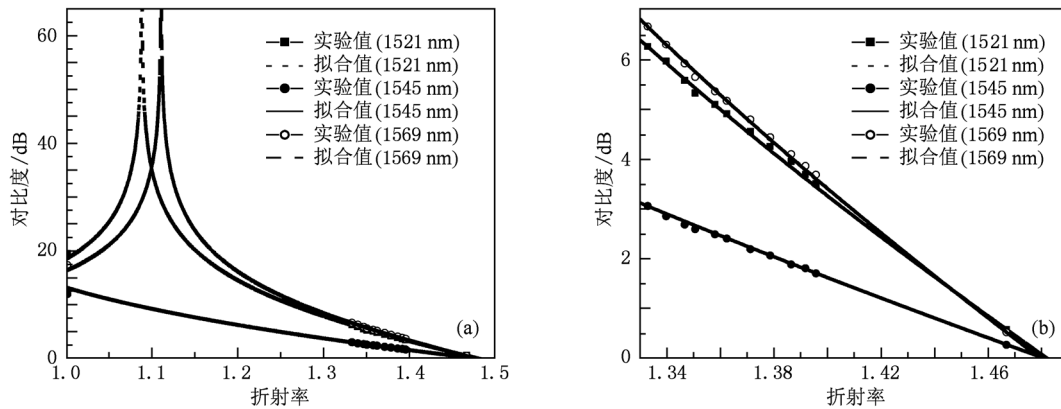


图7 实验结果及拟合曲线 (a)反射光谱在1521,1545和1569 nm附近的折射率-对比度曲线,(b)局部放大图

4. 结 论

从理论上得出了三反射面光纤 F-P 复合结构传感器的反射光谱条纹对比度与外界介质折射率

的关系,分析了影响传感器灵敏度的主要因素,为优化传感器结构提供了理论依据.通过折射率实验验证了传感器在3个波长处的对比度与折射率的关系,实验数据与理论拟合曲线符合很好.

- [1] Guo W G, Yang X F, Luo S J, Li Y N, Tu C H, Lü F Y, Wang H J, Li E B, Lü C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 308 (in Chinese) [郭文刚、杨秀峰、罗绍均、李勇男、涂成厚、吕福云、王宏杰、李恩邦、吕超 2007 物理学报 **56** 308]
- [2] Zhou X J, Du D, Gong J J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2106 (in Chinese) [周晓军、杜东、龚俊杰 2005 物理学报 **54** 2106]
- [3] Jiang J, Rao Y J, Zhou C X, Zhu T 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2221 (in Chinese) [江建、饶云江、周昌学、朱涛 2004 物理学报 **53** 2221]
- [4] Zhu T, Rao Y J, Mo Q J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 249 (in Chinese) [朱涛、饶云江、莫秋菊 2006 物理学报 **55** 249]
- [5] Sharma A K, Jha R, Gupta B D 2007 *IEEE Sens. J.* **7** 1118
- [6] Liang W, Huang Y Y, Xu Y, Lee R K, Yariv A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 151
- [7] Wang Y P, Rao Y J, Ran Z L, Zhu T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1432 (in Chinese) [王义平、饶云江、冉曾令、朱涛 2003 物理学报 **52** 1432]
- [8] Ng M N, Chen Z H, Chiang K S 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 361
- [9] Deng C L, Gu Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3230 (in Chinese) [邓传鲁、顾铮 2009 物理学报 **58** 3230]
- [10] Jiang D S, Wei R X 2004 *Chin. J. Lasers* **31** 8211 (in Chinese) [姜德生、魏仁选 2004 中国激光 **31** 8211]
- [11] Wei T, Han Y K, Li Y J, Tsai H L, Xiao H 2008 *Opt. Express* **16** 5764
- [12] Rao Y J, Deng M, Duan D W 2008 *Sens. Actuat. A* **148** 33
- [13] Ran Z L, Rao Y J, Liu W J, Liao X, Chiang K S 2008 *Opt. Express* **16** 2252
- [14] Gong Y, Zhao T, Rao Y J, Wu Y, Guo Y 2010 *Opt. Express* **18** 15844

Sensitivity analysis of hybrid fiber Fabry-Pérot refractive-index sensor^{*}

Gong Yuan Guo Yu Rao Yun-Jiang[†] Zhao Tian Wu Yu Ran Zeng-Ling

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications of Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

(Received 2 August 2010; revised manuscript received 4 August 2010)

Abstract

Theoretical expressions for analyzing the refractive-index sensitivity of the hybrid optical fiber Fabry-Pérot sensor is developed. Influence of the experimental parameters on the measurement sensitivity is discussed. Hybrid optical fiber Fabry-Pérot sensor is fabricated by chemically etching a graded-index multimode fiber (GI-MMF), fusion splicing it into a single mode fiber, and cleaving the GI-MMF. The fringe contrast exceeds 30 dB and the corresponding measurement sensitivity of refractive index is about 45 dB per refraction index unit. Experimental results are in good agreement with the theoretical ones. It is indicated by the numerical simulations that the performance of this kind of sensor can be further improved.

Keywords: optical fiber sensors, hybrid Fabry-Pérot, refractive-index measurement, sensitivity

PACS: 42.81.Pa, 07.60.Ly, 07.60.Hv

^{*} Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60537040) and the Foundation of State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, China.

[†] Corresponding author. E-mail: yjrao@uestc.edu.cn