

基于光子晶体光纤模间干涉的 折射率测量灵敏度分析*

侯建平 宁 韬 盖双龙 李 鹏 郝建苹 赵建林[†]

(西北工业大学理学院, 空间应用物理与化学教育部重点实验室, 陕西省光信息技术重点实验室, 西安 710072)

(2009 年 10 月 7 日收到; 2009 年 12 月 24 日收到修改稿)

通过理论分析和数值模拟, 研究了一种基于光子晶体光纤 (PCF) 模间干涉的干涉计的灵敏度. 根据光纤模间干涉理论, 结合光子晶体光纤的归一化频率, 分析了 PCF 干涉计测量气体折射率的原理, 得到一个可以衡量 PCF 干涉计灵敏度的参数 δn_e . 通过对该参数物理意义的分析可以得出, PCF 纤芯附近第一层气孔对灵敏度影响最大. 相比于常规气孔结构, 把 PCF 第一层气孔变为面积更大的圆与椭圆复合孔, 可显著提高传感灵敏度.

关键词: 光子晶体光纤, 模间干涉, 气体传感, 灵敏度

PACC: 4281D, 4281P

1. 引 言

光子晶体光纤^[1] (photonic crystal fiber, 简称 PCF) 具有不同于传统光纤的传输特性^[2-5], 从而使其在温度传感^[6,7]、压力传感^[8]、弯曲传感^[7]、荧光传感^[9]等方面具有很好的应用, 而它在结构上的多孔特点, 又使它在气体传感方面具有特殊的应用优势^[10-13]. 当光在 PCF 中传输时, 尽管其大部分能量都被约束在纤芯中传输, 但也有一部分会进入与纤芯相邻的包层孔中, 并与填充在孔中的气体或者液体发生相互作用. 当周围环境或这些填充物的浓度、成分发生变化时, 就会直接改变光的传输特性. 这种传感方式的机理主要有两种: 一是利用倏逝波气体吸收谱^[10,13], 二是利用模间干涉原理^[14]. 最近报道的一种 PCF 模间干涉计测量气体浓度时, 不需要加渗透性物质, 而且对填充气体的折射率变化具有很高的灵敏度, 因此可以应用于气体的高灵敏度传感^[15]. 但该文献主要对这种基于模间干涉的 PCF 干涉计进行了气体测量的实验研究, 未涉及 PCF 结构对干涉计灵敏度影响的研究. 本文旨在通过理论分析和数值模拟这种干涉计的工作原理、过程及其特性, 找到可以衡量该装置灵敏度的参数, 并给出提高装置灵敏度的方向.

2. 系统结构与原理理论分析

PCF 干涉计探头结构如图 1 所示, 图中 PCF 为二阶模截止波长为 1536 nm 的全内反射型光子晶体光纤, 将 PCF 与普通单模光纤 (SMF) 熔结^[16,17], 小黑点代表环境中以及扩散进光纤气孔的气体分子. 宽带光源发出的光通过 SMF 经熔结区到达 PCF, 在 PCF 末端的玻璃与气体界面处反射后再经熔结区进入 SMF 输出. PCF 中光的基模和二阶模的传播常数不同, 因而在输出端有相位差, 该相位差随光波长周期性变化, 因而输出光谱近似呈干涉条纹样的余弦状准周期分布, 其干涉周期 p 随波长、PCF 的物理长度 L 以及模间有效折射率差 Δn_{eff} 的不同而变化, 可表示为 $p \approx \lambda^2 / 2\Delta n_{\text{eff}} L$ ^[15].

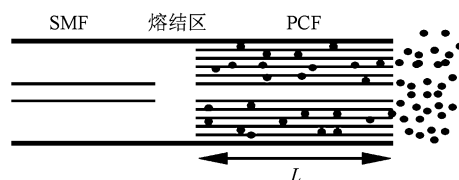


图 1 PCF 干涉计探头结构示意图

不同波长对应的各模式有效折射率及模间有

* 西北工业大学基础研究基金 (批准号: G9KY1018/09) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: jlzha@nwpu.edu.cn

效折射率差不同,因此有效折射率 n_{eff} 和有效折射率差 Δn_{eff} 都是波长 λ 的函数. 设基模和二阶模有效折射率分别为 $n_{\text{eff1}}(\lambda)$ 和 $n_{\text{eff2}}(\lambda)$, 则累积的相位差为

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta n_{\text{eff}}(\lambda)L}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 $\Delta n_{\text{eff}}(\lambda) = n_{\text{eff1}}(\lambda) - n_{\text{eff2}}(\lambda)$, 反射谱极大值对应的波长应满足关系式

$$\frac{4\pi\Delta n_{\text{eff}}(\lambda)L}{\lambda} = 2m\pi, \quad (2)$$

式中 m 是整数. 因此, 相长干涉的波长条件为

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}(\lambda_m)L}{m}. \quad (3)$$

选取由 Centro de Investigaciones en Optica A. C. 公司生产的 PCF 为样品, 其结构如图 2(a) 所示, 包层结构由 5 层按六角晶格排列的空气孔组成, 导光机理为全内反射. 空气孔直径平均为 $2.25 \mu\text{m}$, 孔间距平均为 $4.5 \mu\text{m}$, 光纤中心处缺失 1 个空气孔, 由二氧化硅形成实心纤芯, 纤芯和包层直径分别为

9.4 和 $125 \mu\text{m}$, 二氧化硅折射率为 1.45 , 气体折射率随其成分和浓度不同而变化. 为适应传感原理, 选取的 PCF 结构在工作波长范围内只有基模和二阶模两种模式. 根据文献给出的光子晶体光纤归一化频率 V 的经验公式^[18], 可以计算出该结构二阶模截止波长为 1536 nm , 因此将工作波长选择在 $1.3 \mu\text{m}$ 附近, 利用有限元方法分析得到其基模、二阶模模场分布, 分别如图 2(b) 和 (c) 所示. 对应的有效折射率分别为 $n_{\text{eff1}} = 1.44454 - 1.827543 \times 10^{-16}i$ 和 $n_{\text{eff2}} = 1.437101 - 1.033101 \times 10^{-7}i$, 其中灰度条表示横向电场强度 E_x . 从图 2 可以看出, 基模和二阶模的模场均主要分布在纤芯内部, 但也有少部分分布在包层中, 同时二阶模的模场在包层中部分的比例明显大于基模, 场分布沿径向递减. 选择 25 mm 长 PCF, 根据两个模式的有效折射率, 可以计算出干涉周期为 $p \approx 4.54 \text{ nm}$, 文献[15]的实验结果为 $p \approx 4.38$, 二者符合较好.

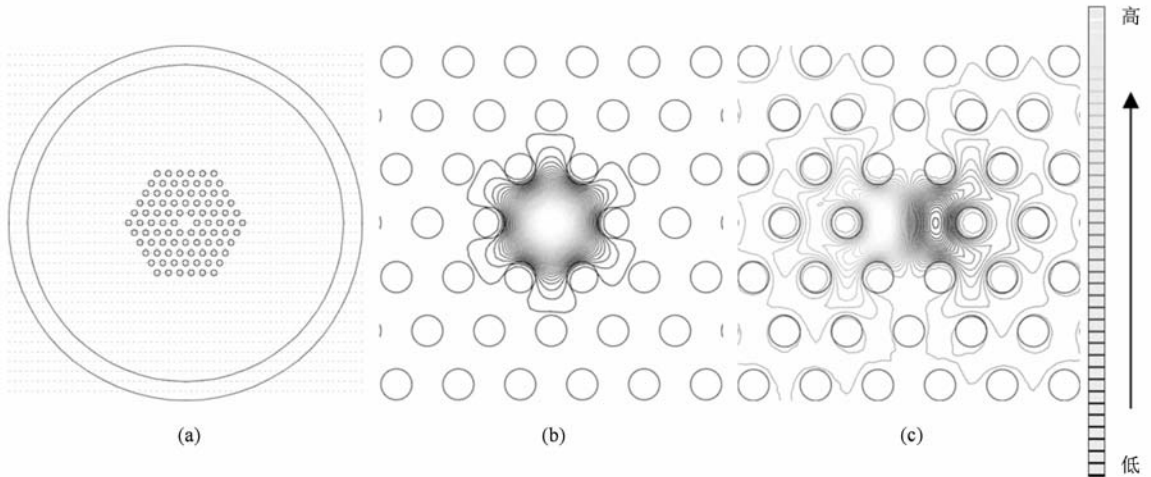


图 2 PCF 结构及模场分布 (a) PCF 结构, (b) 基模模场, (c) 二阶模模场

3. 灵敏度分析与结构优化

当 PCF 干涉计探头处填充气体的折射率发生变化 (如气体浓度或成分变化) 时, 包层等效折射率以及各模式有效折射率都发生变化, 从而引起整个输出光谱发生移动. 系统的灵敏度是指当填充气体的折射率发生一定量的变化时, 输出光谱移动量的大小. 影响装置灵敏度的因素有 PCF 的格子类型、长度 L 、气孔直径、孔间距 Λ 或占空比 $q = \frac{\pi a^2}{2\sqrt{3}\Lambda^2}$ 等

结构参数. 整个输出光谱条纹移动量大小可以用其中任意 m 峰的运动表示 (m 为满足 (2) 式的整数), 假设气体折射率从 n_{gas1} 变化为 n_{gas2} , 且气体折射率为 n_{gas1} 时, 基模、二阶模对应的有效折射率差为 $\Delta n_{s1}(\lambda)$, 则输出光谱的 m 峰位置为

$$\lambda_{m1} = \frac{2\Delta n_{s1}(\lambda_m)L}{m}. \quad (4)$$

当气体折射率为 n_{gas2} 时, 基模、二阶模对应的有效折射率差为 $\Delta n_{s2}(\lambda)$, 则 m 峰的位置变化为

$$\lambda_{m2} = \frac{2\Delta n_{s2}(\lambda_m)L}{m}, \quad (5)$$

m 峰的移动量为

$$S_m = \lambda_{m2} - \lambda_{m1} = \frac{2L}{m} [\Delta n_{s2}(\lambda_m) - \Delta n_{s1}(\lambda_m)], \quad (6)$$

即移动量与 $\Delta n_{s2}(\lambda_m) - \Delta n_{s1}(\lambda_m)$ 成正比. 为简单起见, 令 $\delta n_s = \Delta n_{s2}(\lambda_m) - \Delta n_{s1}(\lambda_m)$, 其物理意义为待测气体折射率发生变化时对应的基模和二阶模有效折射率差的差值, 于是(6)式可以简写为

$$S_m = \frac{2\delta n_s L}{m}, \quad (7)$$

对应的单位折射率变化条纹移动量为

$$s = \frac{S_m}{n_{\text{gas1}} - n_{\text{gas2}}} = \frac{2\delta n_s L}{m(n_{\text{gas1}} - n_{\text{gas2}})}. \quad (8)$$

当 n_{gas2} 趋近于 n_{gas1} 时, (8) 式即表示装置灵敏度. 由此可见, 该装置的灵敏度与 PCF 长度 L 成正比, 与 δn_s 成正比. 当光纤长度选定后, 光纤的其他任何参数变化对灵敏度产生影响时都将通过其对 δn_s 的影响来体现, 因此可以用 δn_s 作为衡量该干涉计灵敏度大小及其变化的参数. 下面利用 δn_s 来分析 PCF 的重要结构参数占空比 q 与干涉计灵敏度的关系.

3.1. 模式有效折射率差

占空比 q 对干涉计装置灵敏度的影响, 首先表现为它对 PCF 各导模间有效模式折射率差 Δn_{eff} 的影响. 选择图 2(a) 所示类型的 PCF 结构, 固定孔间距 $\Lambda = 4.5 \mu\text{m}$, 光纤材料和环境气体折射率不变, 只改变气孔大小, 计算光源波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 时不同包层占空比 q 条件下的 Δn_{eff} , 结果如图 3 所示.

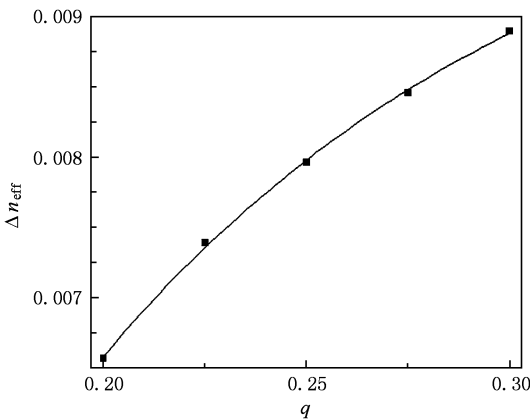


图 3 不同占空比 q 与对应的两个模式的有效折射率差 Δn_{eff} 的关系

从图 3 中可以看出, Δn_{eff} 随 q 的增加而增大. 分析其原因, 首先全内反射 (TIR) 型 PCF 包层中低折

射率气孔的存在降低了包层等效折射率, 使各阶导模的有效折射率均下降. 同时, 由于高阶模场相比于基模有更高比例处于包层气孔中, 当占空比 q 增加时, 其有效折射率下降比基模快, 因此不同模式间的有效折射率差 Δn_{eff} 将随 q 增加而增加.

3.2. PCF 干涉计测量气体折射率装置的灵敏度

下面以上述 PCF 结构为基础, 选用 $1.3 \mu\text{m}$ 波长光源, 固定孔间距 $\Lambda = 4.5 \mu\text{m}$ 和光纤材料折射率不变, 只改变气孔大小, 计算在气体折射率变化区间 (1.00—1.01) 上不同包层占空比 q 条件下 δn_s 的值. 根据文献 [10] 和 [13], 对于吸收型 PCF 气体传感, 占空比 q 值越大, 灵敏度越高. 但本装置的传感原理基于模间干涉, 要求 PCF 中只能传导基模和二阶模, 其他高阶模应不存在或其损耗很大 (传播距离不超过 $2L$), 因此 PCF 的占空比不能太大. 在文献 [15] 所用参数附近选取占空比 q 区间 (0.2—0.3) 进行分析, 结果如图 4 所示. 可以看出, 随着占空比的增加, δn_s 呈指数关系趋势下降, 即装置灵敏度随着占空比的增加而迅速减小.

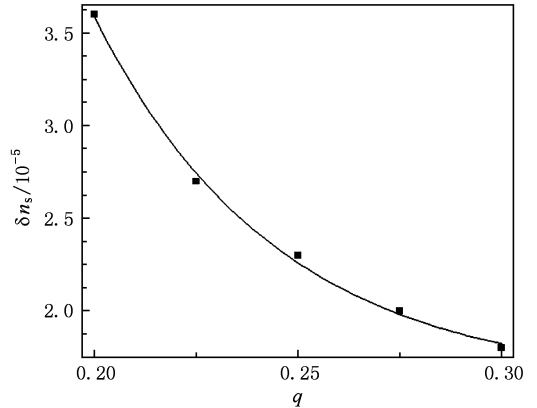


图 4 δn_s 随 q 的变化

分析其原因, 在上述 q 值范围内, 基模场很好地被约束在纤芯内, 气体折射率变化对基模的有效折射率影响很小, 因此 δn_s 可以用气体折射率变化前后的二阶模有效折射率差表示. 同时, 当 q 越小时, 结构参数越靠近无截止单模条件, 二阶模场越发散, 分别取 $q = 0.2$ 和 $q = 0.3$, 其二阶模场场如图 5 所示. 由图 5 可以看出, q 较小时, 气体与二阶模场场的重叠率较高, 因此当气体折射率变化时, 二阶模的有效折射率变化更大, 相应的 δn_s 变化较大.

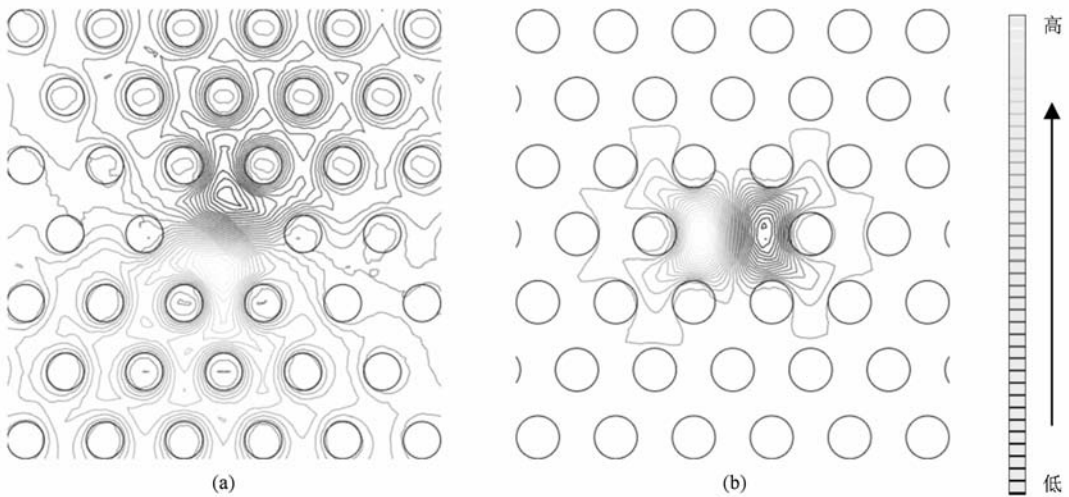


图5 不同 q 对应的二阶模场分布 (a) $q=0.2$, (b) $q=0.3$

3.3. 干涉计 PCF 结构优化

由上述结论可知,为提高装置灵敏度,应减小 PCF 占空比 q ,但占空比太小时二阶模损耗较大,将不利于条纹探测,同时包层气孔也太小,不利于气体快速扩散进入光纤.由 δn_s 的物理意义来看,影响其大小的只有基模和二阶模,而这两个模式主要集中在纤芯及纤芯附近区域,因此在保持光纤占空比 q 和光纤模式数不变的情况下,第一层气孔的大小和形状应该对装置灵敏度有很大影响.固定包层气孔占空比 $q=0.3$ 及其他参数不变,图6给出只改变第一层气孔半径(1.3—1.8 μm)时所对应的灵敏度参数 δn_s .可以看出, δn_s 随着第一层气孔半径的增加而增加.这是因为第一层气孔半径增加时,气体与二阶模的重叠比例增加,气体变化对二阶模模式有效折射率的影响增大.

另一方面,第一层气孔越靠近纤芯,气体的变化越容易改变导模,对应的装置灵敏度也越高.因此,为了进一步提高灵敏度,可以在增加第一层孔面积的同时改变其形状,使其一部分更靠近纤芯.作为一个例子,这里考虑选择如图7所示的一种第一层气孔为圆和椭圆复合的 PCF 结构进行分析.

该结构第一层气孔的形状如图7(a)所示,圆半径是 1.83 μm ,外接一个长轴半径为 2.40 μm ,短轴半径等于内接圆半径的椭圆,实心线围成的图案是第一圈气孔形状,凸出的部分靠近纤芯,整体结构如图7(b)所示.与改变形状之前相比,气体折射率从 1.00 变化到 1.01,复合孔结构 $q=0.3$ 时 $\delta n_s = 0.000045$,比只增大第一层孔面积但不改变形状的

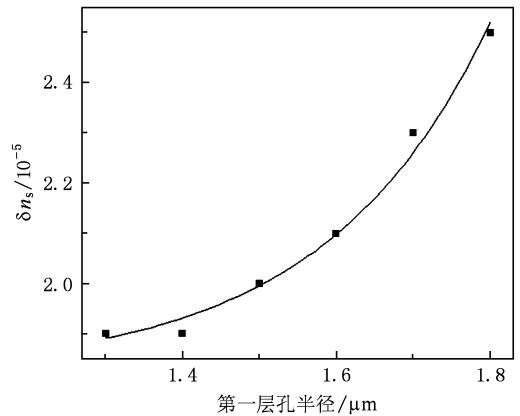


图6 不同第一层气孔半径对应的 PCF 干涉计灵敏度对比

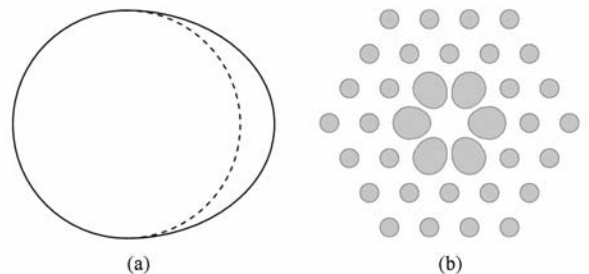


图7 修改形状后 PCF 的第一层单个气孔孔形状和整体结构示意图 (a) 第一层孔形状, (b) PCF 结构

$q=0.3$ 时对应的 $\delta n_s = 0.000025$ 要高出约 80%, 比增加气孔面积前 $q=0.3$ 时对应的 $\delta n_s = 0.000018$ 要高出约 150%. 根据灵敏度公式(8)可知复合孔结构比原结构灵敏度提高约 150%.

4. 结 论

在考虑波长对模间有效折射率差影响的条件下,给出了模间干涉的相长干涉条件. 利用有限元方法分析了 PCF 中存在的模式和模间干涉周期,与文献中给出的实验结果相符. 理论分析了模间干涉折射率测量原理并得出 PCF 干涉计测量气体折射

率的灵敏度和 $\delta n_s = \Delta n_{s2}(\lambda_m) - \Delta n_{s1}(\lambda_m)$ 成正比. 模拟分析不同占空比 q , 不同第一层气孔大小、形状所对应的 δn_s , 结果表明, 在保持模式要求的条件下, 减小占空比或增加第一层气孔横截面积都可以达到提高灵敏度的效果, 但在增大第一层气孔的同时改变其形状使之更接近纤芯则灵敏度提高更为显著.

-
- [1] Knight J C, Birks T A, Russell P S J, Atkin D M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547
- [2] Li S G, Liu X D, Hou L T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2811 (in Chinese) [李曙光、刘晓东、侯蓝田 2003 物理学报 **52** 2811]
- [3] Zhang X J, Zhao J L, Hou J P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4668 (in Chinese) [张晓娟、赵建林、侯建平 2007 物理学报 **56** 4668]
- [4] Huang Y, Zhang W, Wang Y, Huang Y D, Peng J D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1731 (in Chinese) [黄 俨、张 巍、王 胤、黄 翊东、彭江得 2009 物理学报 **58** 1731]
- [5] Fang X H, Hu M L, Li Y F, Chai L, Wang Q Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2495 (in Chinese) [方晓惠、胡明列、栗岩锋、柴路、王清月 2009 物理学报 **58** 2495]
- [6] Ju J, Wang Z, Jin W, Demokan M S 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 2168
- [7] Dobb H, Kalli K, Webb D J 2006 *Opt. Commun.* **260** 184
- [8] Fu H Y, Tam H Y, Shao L Y, Dong X Y, Wai P K A, Lu C, Khijwania S K 2008 *Appl. Opt.* **47** 2835
- [9] Smolka S, Barth M, Benson O 2007 *Opt. Express* **15** 12783
- [10] Li S G, Liu S Y, Song Z Y, Han Y, Cheng T L, Zhou G Y, Hou L T 2007 *Appl. Opt.* **46** 5183
- [11] Gayraud N, Kornaszewski L W, Stone J M, Knight J C, Reid D T, Hand D P, Macpherson W N 2008 *Appl. Opt.* **47** 1269
- [12] Henningsen J, Hald J 2008 *Appl. Opt.* **47** 2790
- [13] Gu W W, Zhao J L, Cui L, Hou J P 2007 *Acta Photonica Sinica* **36** 94 (in Chinese) [顾雯雯、赵建林、崔 丽、侯建平 2007 光子学报 **36** 94]
- [14] Káčík D, Turek I, Martínček I, Canning J, Issa N A, Lyttikäinen K 2004 *Opt. Express* **12** 3465
- [15] Villatoro J, Kreuzer M P, Jha R, Minkovich V P, Finazzi V, Badenes G, Pruneri V 2009 *Opt. Express* **17** 1447
- [16] Bourliaguet B, Paré C, Émond F, Croteau A 2003 *Opt. Express* **11** 3412
- [17] Guo T Y, Lou S Q, Li H L, Yao L, Jian S S 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 511 (in Chinese) [郭铁英、娄淑琴、李宏雷、姚 磊、简水生 2009 光学学报 **29** 511]
- [18] Mortensen N A, Folkenberg J R 2003 *Opt. Lett.* **28** 1879

Sensitivity analysis of refractive index measurement based on intermodal interference in photonic crystal fiber^{*}

Hou Jian-Ping Ning Tao Gai Shuang-Long Li Peng Hao Jian-Ping Zhao Jian-Lin[†]

(Key Laboratory of Optical Information Technology of Shaanxi Province, Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry of Ministry of Education, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 7 October 2009; revised manuscript received 24 December 2009)

Abstract

The sensitivity of an interferometer based on intermodal interference in photonic crystal fiber (PCF) has been investigated theoretically and numerically. Using the intermodal interference theory and the normalized frequency of PCF, we have analyzed the principle of the method for measuring refractive index by PCF interferometer, and obtained a variation, δn_s , to show the sensitivity of the PCF interferometer. From the analysis of the underlying physics of δn_s , we find that air holes of the first layer play an important role on the sensitivity. Compared with the conventional PCF structure, the sensitivity can be improved remarkably via employing large air holes with the shape of a combination of half circle and half oval.

Keywords: photonic crystal fiber, intermodal interference, gas sensor, sensitivity

PACC: 4281D, 4281P

^{*} Project supported by the Basic Research Foundation of the Northwestern Polytechnical University, China (Grant No. G9KY1018/09).

[†] Corresponding author. E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn