

文章编号:1004-4213(2010)08-1413-5

一种基于模间干涉的亚波长直径 光纤气体折射率传感*

侯建平, 盖双龙, 宁韬, 郝建苹, 李鹏, 赵建林[†]

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

摘要:设计了一种基于模间干涉的亚波长直径光纤气体折射率传感方案,并分析了其测量灵敏度.将标准单模光纤和一段仅传输基模与二阶模的无包层亚波长直径光纤结合形成传感头,通过分析传感头外气体折射率的变化对两个模式干涉谱峰值移动的影响,研究了这种传感器的折射率测量灵敏度.结果表明,这种传感器的灵敏度高于利用折射率引导型光子晶体光纤的基于模间干涉的折射率传感器.因为没有气体向微孔扩散的过程,这种基于模间干涉的亚波长直径光纤折射率传感器可用于实时探测.

关键词:光纤光学;折射率传感器;亚波长直径光纤;模间干涉;灵敏度

中图分类号:TN253;TP212.14

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103908.1413

0 引言

光纤气体传感器具有电绝缘性好、抗电磁干扰能力强、可远距离长期在线测量、易于组网等优点.功能型的光纤气体传感主要利用 D-型光纤^[1]、镀膜束腰光纤^[2-3]、裸芯光纤^[4]、光纤失配^[5-6]等通过倏逝波的变化探测气体.光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)出现后又得到进一步发展^[7-10]. Villatoro 等于 2009 年报道了一种基于折射率引导型光子晶体光纤模间干涉^[11]的高灵敏度无气室气体传感系统^[12],但不足之处是响应速度较慢.童利民等于 2003 年在 Nature 上报道了一种直径在波长以下的亚波长直径光纤(Subwavelength Diameter Fiber, SDF)^[13],该光纤具有很强的倏逝波^[14].结合模间干涉原理和 SDF 倏逝波强又没有气孔的特点,本文提出一种新的气体折射率传感方案,其灵敏度高、响应速度快、受光源强度和频率稳定性影响小.

1 亚波长直径光纤的模式间干涉

SDF 是一种直径小于其所传输光波波长的光纤,具有尺寸小、柔韧性高、倏逝波场强等特性,可以显著提高基于倏逝波探测的光纤传感器灵敏度^[15].基于模间干涉的气体折射率传感是通过外界气体折射率的变化对干涉谱强度峰值位置的影响来进行探测

的,若光纤中传输的模式较多,则模式间干涉的情况将很复杂,不利于稳定传感.为此,用作探头的 SDF 一般要求仅有基模和二阶模在其内稳定传输.

1.1 模式与模场

与普通的弱导光纤类似, SDF 也仅按一定条件支持特定模式的光在光纤中传播.所支持模式数的多少与光纤直径、介质折射率和传输波长有关.本文以石英玻璃光纤为例,设传输波长为常规波段的 $1.55 \mu\text{m}$,且光纤无额外介质包层而直接裸露在空气中.此时,可以将空气看作足够厚的包层,因此光纤的导模数量完全由 SDF 的直径决定.在上述条件下,利用有限元法进行数值求解,可以得到光纤各阶导模关于光纤直径的截止条件.改变光纤直径,计算其导模数量,二者关系如图 1.

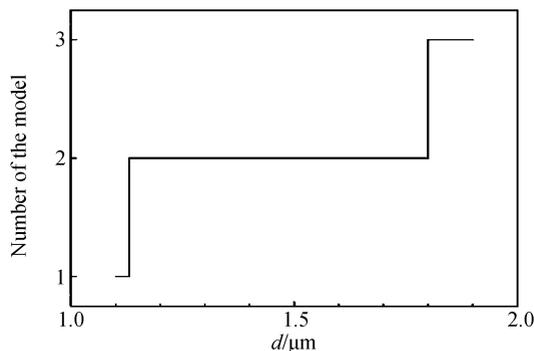


图 1 模式数量与光纤直径的关系

Fig. 1 Relationship between the number of mode and the diameter of SDF

由图 1 可以看出,传输波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时, SDF 能保持两个传输模的直径范围大约在 $1.13 \mu\text{m} \sim$

* 西北工业大学基础研究基金(G9KY1018/09)资助

[†] Tel: 029-88431663

Email: jlzao@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2010-05-13

修回日期: 2010-07-12

1.81 μm . 其中二阶模的截止直径为 1.134 μm , 与文献[16]相符.

在前述条件下取光纤直径为 1.6 μm 时, 计算 SDF 的基模和二阶模模场分布, 结果如图 2.

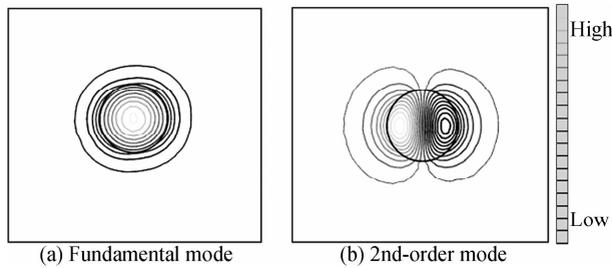


图 2 SDF 中的模场
Fig. 2 Mode-fields of SDF

由图 2 可以看出, SDF 的基模大部分被约束在石英介质内, 但也有一部分强度较小的场处于纤芯之外的空气包层中. 二阶模的模场尽管也主要分布在纤芯内, 但其分布在纤芯外空气中的场则比基模要多. 因此当光纤外的气体折射率发生变化时, 二阶模受到的影响将比基模要大.

1.2 模间干涉

当光纤中有多个导模存在时, 由于各阶导模的有效折射率不同, 其传播常数也不同, 因而在光纤中传输一定距离后, 将产生相位差, 通过耦合再相遇时, 将产生干涉.

如前文所述, 本文讨论 SDF 中只有基模和二阶模的情形. 设有一定带宽的光源发出的光在 SDF 中仅激发出基模和二阶模并稳定传播, 之后两个模式被耦合进入单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF) 传输, 则单模光纤的输出光谱将呈现近似余弦状周期变化的干涉谱^[12], 其周期随传输光波长、光纤几何长度以及两个模式之间的有效折射率差的不同而变化. 注意到与文献[12]的情形相比, 这里不考虑光的返回, 则周期的表达式为

$$p \approx \lambda^2 / \Delta n_{\text{eff}} L \quad (1)$$

式中, λ 为波长, L 为光纤几何长度, Δn_{eff} 为两个模式间的有效折射率差. 由于模式有效折射率 n_{eff} 与波长有关, 因此模间有效折射率差 Δn_{eff} 为波长 λ 的函数. 通过与文献[12]类似的推导可以得到相长干涉的波长条件为

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

式中 $\Delta n_{\text{eff}}(\lambda) = n_{\text{eff}_1}(\lambda) - n_{\text{eff}_2}(\lambda)$, 其中 $n_{\text{eff}_1}(\lambda)$ 为基模有效折射率, $n_{\text{eff}_2}(\lambda)$ 为二阶模有效折射率, m 是整数.

2 纳米光纤模间干涉测量气体折射率

由于 SDF 很难直接与光源高效耦合, 并且其传

输损耗较大, 因此, 只能截取一小段 SDF 用作传感头, 而光源的传送和反馈信号的传输需要使用低损耗的标准单模光纤.

2.1 传感头结构及传感原理

将一根普通单模光纤很小的一段腐蚀去包层, 再通过继续腐蚀或高温拉伸形成一种双锥束腰形裸芯光纤, 其中束腰部分为无包层亚波长直径光纤, 形成如图 3 所示的结构. 通过控制 SDF 的直径使其只支持基模和二阶模传输. 为了提高耦合效率, 图中 SDF 和 SMF I 之间的过渡区 (Transition I) 应设计为凸形, 而 SDF 和 SMF II 之间的过渡区 (Transition II) 应设计为凹形^[17].

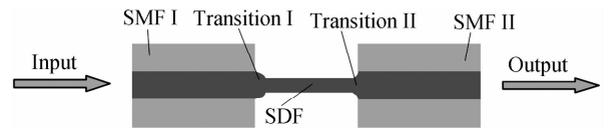


图 3 探头结构示意图
Fig. 3 Sketch of the probe

以图 3 所示结构作为探头, 对气体折射率传感的基本过程是: 宽带光源发出的光从探头左端进入 SMF I, 在 Transition I 中模式展宽进入 SDF, 并以其基模和二阶模传输, 这两个模式的光在 SDF 的末端经 Transition II 耦合后进入 SMF II. 当 SDF 的基模和二阶模在 SDF 中传输时, 由于模场的一部分处于探头外的气体中, 其模式有效折射率将受到外界气体折射率变化的调制. 由式 (2) 可以看出, 满足相长干涉条件的波长也将发生变化, 也就是说输出光谱中的峰值位置将发生移动, 从而可以通过干涉峰的移动量来测量外界气体折射率的变化. 由于探测过程中气体不需要通过扩散去填充像 PCF 中那样的微孔, 因此响应速度很快.

仅从公式上看, 如果光源带宽足够宽, 那么式 (2) 中给出的符合条件的峰值波长可以有无穷多个. 但是不可能, 也不必要去考虑所有峰值, 这里不妨先考虑宽带光源中心波长处的峰值位置. 仍取 SDF 的几何长度为 L , 则根据式 (2) 可以得到中心波长处附近的峰值所对应取值 m_0 为

$$m_0 \approx \Delta n_{\text{eff}}(\lambda_0) L / \lambda_0 \quad (3)$$

式中, λ_0 为入射光的中心波长. 探测过程中, 分析该 m_0 峰值位置的变化, 就可实现对外界气体折射率变化的探测.

2.2 传感头灵敏度分析

该传感头的灵敏度可以定义为, 输出端干涉光谱峰值波长移动量的大小与外界气体折射率变化的比值, 即单位气体折射率变化引起的条纹移动量. 影响灵敏度的主要因素有 SDF 介质折射率、长度、直径、光源波长范围等参量.

设气体折射率从 n_{g_1} 变化为 n_{g_2} , 当气体折射率为 n_{g_1} 时, 分别计算出基模、二阶模的有效折射率 n_{g_1, eff_1} 和 n_{g_1, eff_2} , 则输出光谱的 m_0 峰位置为

$$\lambda_{m_{01}} = \Delta n_{g_{e_1}}(\lambda)L/m_0 \quad (4)$$

式中, $\Delta n_{g_{e_1}}(\lambda)$ 为气体折射率为 n_{g_1} 时两个模式的有效折射率差 $n_{g_1, \text{eff}_1} - n_{g_1, \text{eff}_2}$. 当气体折射率为 n_{g_2} 时, 则 m_0 峰的位置变为

$$\lambda_{m_{02}} = \Delta n_{g_{e_2}}(\lambda)L/m_0 \quad (5)$$

式中, $\Delta n_{g_{e_2}}(\lambda)$ 为气体折射率为 n_{g_2} 时两个模式的有效折射率差 $n_{g_2, \text{eff}_1} - n_{g_2, \text{eff}_2}$, m_0 峰的移动量为

$$S_{m_0} = \lambda_{m_{02}} - \lambda_{m_{01}} = (L/m_0)[\Delta n_{g_{e_2}}(\lambda) - \Delta n_{g_{e_1}}(\lambda)] \quad (6)$$

对应的单位折射率变化条纹移动量为

$$s = \frac{S_{m_0}}{n_{g_2} - n_{g_1}} = \frac{\lambda_{m_{02}} - \lambda_{m_{01}}}{n_{g_2} - n_{g_1}} = \frac{L[\Delta n_{g_{e_2}}(\lambda) - \Delta n_{g_{e_1}}(\lambda)]}{m_0(n_{g_2} - n_{g_1})} \quad (7)$$

当 n_{g_2} 趋近于 n_{g_1} 时, 式(7)即表示传感头的灵敏度. 由此可见, 该传感头的灵敏度与 SDF 长度 L 成正比, 与 $\Delta n_{g_{e_2}}(\lambda) - \Delta n_{g_{e_1}}(\lambda)$ 成正比. 因此, 当光纤长度选定后, 其他任何参量变化对灵敏度的影响都将通过它对 $\Delta n_{g_{e_2}}(\lambda) - \Delta n_{g_{e_1}}(\lambda)$ 的影响来体现. 另外, 从式(7)中也可以看出, m_0 越小灵敏度越高, 因此从获得较高灵敏度的角度来说选光源中心波长处的峰值并不是最佳选择, 而应当选波长更长处的峰值.

选取 SDF 直径 $d=1.6 \mu\text{m}$, 长度 $L=20 \text{ mm}$, 入射光中心波长 $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$, 改变外界环境中气体折射率大小, 分别计算相应模式的有效折射率 and 对应差值, 可以得到上述中心波长附近干涉峰的位置与气体折射率大小的关系. 在 $1.000 \sim 1.010$ 范围内选择 5 个点, 其模拟结果如图 4. 可以看出, 随着气体折射率的增大, 干涉峰向短波方向移动, 变化趋势的线性性很好. 图中拟合直线的斜率即为灵敏度, 因此传感头的灵敏度不随气体折射率变化而变化. 根据模拟数据计算, 可得该直线斜率为 $r=1.014 \mu\text{m}$,

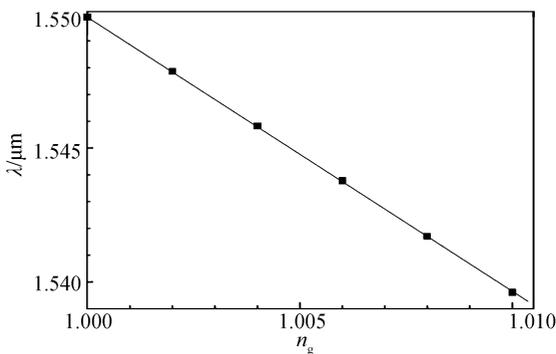


图 4 干涉峰位置与气体折射率的关系

Fig. 4 Relationship between the peak wavelength and the refractive index of the gas

也即当外界气体的折射率每变化 1 时, 干涉峰将向短波方向移动 $1.014 \mu\text{m}$.

2.3 与光子晶体光纤模间干涉计的比较

选取文献[12]中所用 PCF 的结构参量, 即 PCF 的包层结构由 5 层按六角晶格排列的空气孔组成, 空气孔平均直径 $2.25 \mu\text{m}$, 孔间距平均 $4.5 \mu\text{m}$, 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 $9.4 \mu\text{m}$ 和 $125 \mu\text{m}$, 二氧化硅的折射率为 1.45, 入射光中心波长为 $1.550 \mu\text{m}$, 为与 SDF 对比, 长度取 10 mm , 分析干涉峰值位置与外界气体折射率的关系, 结果如图 5 所示. 由模拟数据可得该装置的灵敏度大小, 即图中拟合直线的斜率 $r=0.526 \mu\text{m}$, 比前述结果小一些.

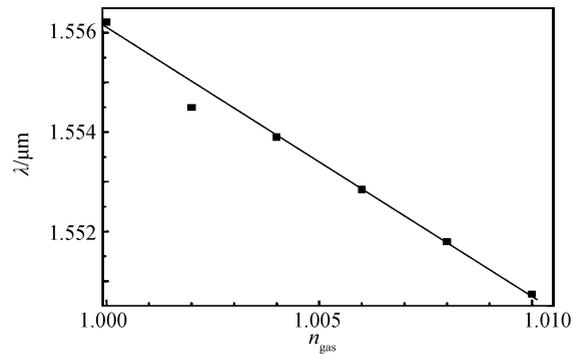


图 5 PCF 中干涉峰位置与气体折射率的关系

Fig. 5 Relationship between the peak wavelength and the refractive index of the gas in PCF

2.4 光纤直径对灵敏度的影响

仍然取 SDF 的长度 $L=20 \text{ mm}$, 入射光的中心波长 $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$, 纤芯直径在 $1.2 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 范围内取 4 个点, 计算气体折射率从 1.000 变化到 1.002 过程中干涉峰的移动量和灵敏度, 结果如图 6. 可以看出, 灵敏度随纤芯直径减小而增大. 因此, 为了获得相对高一些的灵敏度, 可以在保证 SDF 模式要求的条件下采用相对小一些的纤芯直径.

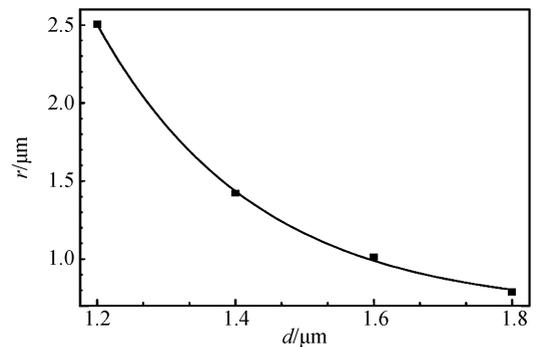


图 6 灵敏度与纤芯直径的关系

Fig. 6 Relationship between sensitivity and the diameter of SDF

3 结论

结合亚波长直径光纤与标准单模光纤构成了一种基于模间干涉且无需气室的气体折射率传感头. 通过分析这种传感头的测量原理和传感过程, 得到了其传感灵敏度的表达式. 由于采用干涉峰移动量的比较测量, 因此光源的强度和频率稳定性对传感影响很小. 此外, 这种探头结构不需要气体向微气孔扩散的过程, 因此响应速度更快, 基本可以实现实时探测.

参考文献

- [1] MUHAMMAD F A, STEWART G. Polarised finite difference analysis of D-fiber and applications for chemical sensing[J]. *Int J Optoelectron*, 1992, **7**(6): 705-721.
- [2] ESPADA L I, SHADAREM M, ROBILLARD J. Ferrocenylenesilylene polymers as coatings for tapered optical-fiber gas sensors[J]. *J Inorg Organomet Polym*, 2000, **10**(4): 169-176.
- [3] VILLATORO J, ANTONIO D, JOSE L C, *et al*. In-line highly sensitive hydrogen sensor based on palladium-coated single-mode tapered fibers[J]. *IEEE Sens J*, 2003(4): 533-537.
- [4] BENOUNIS M, RENAULT N J, DUTASTA J P, *et al*. Study of a new evanescent wave optical fibre sensor for methane detection based on cryptophane molecules[J]. *Sens Actuators B*, 2005, **107**(1): 32-39.
- [5] VILLATORO J, MONZON H D. Low cost optical fiber refractive index sensor based on core diameter mismatch[J]. *J Lightwave Tech*, 2006, **24**(3): 1409-1413.
- [6] DONATO L M, DAVID M H, VILLATORO J, *et al*. Optical fiber hydrogen sensor based on core diameter mismatch and annealed Pd-Au thin films[J]. *Sens Actuators B: Chem*, 2007, **125**(1): 66-71.
- [7] ZHANG Zhi-guo, ZHANG Fang-di, ZHANG Min, *et al*. Gas sensing properties of index-guided PCF with air-core[J]. *Opt Laser Technol*, 2008, **40**(1): 167-174.
- [8] RITARI T, TUOMINEN J, LUDVIGSEN H, *et al*. Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers[J]. *Opt Express*, 2004, **12**(17): 4080-4087.
- [9] GU Wen-wen, ZHAO Jian-lin, CUI Li, *et al*. Analyzing the sensitivity of a novel gas sensor based on photonic crystal fiber using Finite-difference method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 94-98.
顾雯雯, 赵建林, 崔莉等. 光子晶体光纤气体传感灵敏度的有限差分法分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(1): 94-98.
- [10] ZHOU Xue-wu, HOU Jian-ping, ZHAO Jian-lin. A new gas sensor head without gas chamber by hollow core PBF[C]. *SPIE*, 2007, **6150**: 174-179.
- [11] KACIK D, TUREK I, MARTINCEK I, *et al*. Intermodal interference in a photonic crystal fibre[J]. *Opt Express*, 2004(12): 3465-3470.
- [12] VILLATORO J, KREUZER M P, JHA R, *et al*. Photonic crystal fiber interferometer for chemical vapor detection with high sensitivity[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(3): 1447-1453.
- [13] TONG Li-min, GATTASS R R, ASHCOM J B, *et al*. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. *Nature*, 2003, **426**: 816-819.
- [14] TONG Li-min, PAN Xin-yun. Subwavelength-diameter optical fibers: wave guiding properties and photonic applications[J]. *Physics*, 2007, **36**(8): 626-630.
童利民, 潘欣云. 亚波长直径光纤的光学传输特性及其应用[J]. *物理*, 2007, **36**(8): 626-630.
- [15] LOU Jing-yi, TONG Li-min, YE Zhi-zhen. Modeling of silica nanowires for optical sensing[J]. *Opt Express*, 2005, **13**(6): 2135-2140.
- [16] TONG Li-min. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides[J]. *Opt Express*, 2004, **12**(6): 1025-1035.
- [17] WU Ji-jiang, SHI Bang-ren, KONG Mei. BPM analysis of tapered transitional waveguide [J]. *Semiconductors Optoelectronics*, 2005, **26**(5): 386-389.
武继江, 石邦任, 孔梅. 锥形过渡波导的光束传播法分析[J]. *半导体光电*, 2005, **26**(5): 386-389.

Gas Refractive Index Sensing Using Subwavelength Diameter Optical Fiber Based on Intermodal Interference

HOU Jian-ping, GAI Shuang-long, NING Tao, HAO Jian-ping, LI Peng, ZHAO Jian-lin

(a. School of Science; b. Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology;

c. Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A gas refractive index sensor with subwavelength-diameter fiber (SDF) based on intermodal interference is designed and its sensitivity is analyzed. The sensor head is formed by splicing a standard single-mode fiber with a stub of SDF without cladding, which only supports the fundamental mode and the 2nd-order mode. The sensor's sensitivity is analyzed according to the peaks shift of the interference spectrum, which is caused by the refractive index change of the gas outside the sensor head. It is found that the sensitivity of this sensor is higher than the one based on intermodal interference using index-guided photonic crystal fiber (PCF). Since there is no process of gas diffusing into the micro-holes compared with the PCF, therefore this sensor can be used for real-time detecting.

Key words: Fiber optics; Refractive index sensor; Subwavelength-diameter fiber (SDF); Intermodal interference; Sensitivity



HOU Jian-ping was born in 1970. He is pursuing his Ph. D. degree at Northwestern Polytechnical University and his current research interests focus on micro/nano optical fibers and optical fiber sensors.



ZHAO Jian-lin is a professor and Doctoral Supervisor. His main research interests focus on the optical information processing.