

基于无芯-多模-无芯光纤结构的硫化氢 气体传感性质研究

刘敏¹, 冯德玖¹, 冯文林^{1,2*}

¹重庆理工大学理学院, 重庆 400054;

²绿色能源材料技术与系统重庆市重点实验室, 重庆 400054

摘要 提出一种基于无芯-多模-无芯光纤(NMN)结构的硫化氢(H₂S)气体传感器。该传感器将两个无芯光纤(NCF)熔接在多模光纤(MMF)的两端,构建 NMN 的结构。光从单模光纤(SMF)进入 NCF 中激发出不同高阶模式,进入 MMF 中时,激发出的高阶模与基模分别在 MMF 的包层和纤芯中传输从而产生相位差,形成模式干涉。同时,对不同长度 NCF 和 MMF 的传输特性进行了优化。采用浸渍提拉法在 NCF 的外表面形成二氧化钛薄膜,利用薄膜对 H₂S 气体的吸附,实现对 H₂S 的快速响应。随着 H₂S 浓度的增加,干涉谱出现红移,在 H₂S 气体体积分数为 0~3×10⁻⁵ 的范围内,得到了 7.36 pm/10⁻⁶ 的灵敏度和良好的线性度。此外,二氧化钛对 H₂S 具有良好的选择性,响应和恢复时间分别约为 50 s 和 65 s。该传感器具有结构简单、灵敏度高、制造方便等优点,在低浓度 H₂S 气体的安全监测领域有潜在的应用价值。

关键词 光纤光学; 光纤传感; 模式干涉; 二氧化钛; 硫化氢

中图分类号 TN201; TN202

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1006007

Properties of Hydrogen Sulfide Gas Sensor Based on No-Core-Multimode-No-Core Fiber Structure

Liu Min¹, Feng Dejiu¹, Feng Wenlin^{1,2*}

¹ College of Science, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

² Chongqing Key Laboratory of Green Energy Materials Technology and Systems, Chongqing 400054, China

Abstract We present a hydrogen sulfide (H₂S) gas sensor based on a no-core-multimode-no-core (NMN) fiber structure. The sensor is fabricated by using two no-core fibers (NCF) which are spliced at both the ends of a multimode fiber (MMF), and the NMN structure is constructed. Different high-order modes can be excited when light travels from a single-mode fiber (SMF) to NCF. When light enters MMF, the high-order modes and fundamental mode transmit in the cladding and core of MMF, respectively, resulting in phase difference and mode interference. Simultaneously, the transmission characteristics of NCF and MMF having different lengths are optimized. The outside surface of NCF is coated with a thin titanium dioxide film by the dip-coating method; thus, a rapid response to H₂S gas can be achieved when the film absorbs the gas. With an increase in the H₂S concentration, the interference spectra denote a red shift. A sensitivity of 7.36 pm/10⁻⁶ and good linear relation are obtained in the H₂S volume fraction range of 0-3×10⁻⁵. In addition, titanium dioxide exhibits good selectivity to H₂S, and the response and recovery time of the sensor are approximately 50 s and 65 s. The sensor has advantages of simple structure, high sensitivity, and easy manufacturability, and it can be applied in the field of safety monitoring of the low-concentration H₂S gas.

Key words fiber optics; fiber sensing; mode interference; titanium dioxide; hydrogen sulfide

OCIS codes 060.2370; 070.4790; 260.3160

收稿日期: 2019-05-30; 修回日期: 2019-06-14; 录用日期: 2019-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(51574054)、重庆市高校创新团队项目(CXTDX201601030)、重庆市科技局社会事业与民生保障科技创新专项(cstc2017shmsA20017)、重庆市科技创新领军人才项目(CSTCCXLJRC201905)

* E-mail: wenlinfeng@126.com

1 引 言

硫化氢(H_2S)是一种高刺激性气体,具有强烈的恶臭。同时它也是一种强烈的神经毒气,严重威胁人身安全,还会对环境造成严重污染,对金属设备产生严重腐蚀^[1-2]。2006年,韩志英等^[3]选取接触硫化氢的作业工人,分析硫化氢对作业工人健康状况的影响。结果显示,长期接触低浓度 H_2S 对作业人群的影响主要表现为上呼吸道损伤。因此,对低浓度 H_2S 气体检测的研发显得极为重要,在检测手段中也有多种类型的光纤传感器被提出并被应用于气体测量^[4-6]。

自Allision等^[7]在1994年发现光纤中的多模干涉(MMI)效应后,国内外学者开始对MMI进行广泛而深入的研究。这些研究将MMI应用于折射率及温度测量,例如,2007年,Frazão等^[8]提出一种基于MMI和长周期光纤光栅(LPG)相结合的马赫-曾德尔干涉仪,这种新型结构被证明是一种弯曲传感器。2015年,Fu等^[9]研究基于薄芯光纤-多模光纤-薄芯光纤(TCF-MMF-TCF)结构的折射率测量系统。通过实验研究了传感器的透射光谱随周围折射率(SRI)的变化规律,灵敏度为 130.00 nm/RIU (RIU为折射率单元)。同年,Luo等^[10]研究基于增强MMI的多参数光纤传感器,构建了无芯光纤-多模光纤-无芯光纤(NMN)结构,利用一段多模光纤(MMF)作为模式耦合器,增强了MMI。但至今为止MMI在气体传感方面的研究还是相对较少。

在敏感材料中,二氧化钛(TiO_2)是一种重要的半导体材料,因其具有优良的气敏、光学等光电性质,并且化学性质稳定,近几十年来成为国内外

科学家的研究热点^[11]。因 TiO_2 对 H_2S 有强吸附性能^[12],本文提出一种成本低、结构简单、制作容易的低浓度 H_2S 气体传感器,将一段MMF熔接在两个NCF中间,在NCF表面涂覆一层纳米 TiO_2 敏感膜,使干涉仪对 H_2S 敏感,通过检测干涉波谷的移动来检测 H_2S 浓度。由于中间MMF中的功率分布受NCF长度的影响,本文还对该结构的干涉谱与NCF长度之间的关系进行了优化研究。

2 基本原理

2.1 NMN 中的多模干涉

图1为NMN干涉仪的结构装置示意图。在NMN结构中引入放大自发辐射(ASE)光源,波长范围为 $1440 \sim 1640 \text{ nm}$,中心波长为 1550 nm 。将传感结构置于玻璃气室中,通入 H_2S 气体。采用光谱分析仪(OSA, AQ6370D, 横河, 日本)对干涉谱进行测量。光源发出的光通过SMF传输到传感区域,然后通过光谱仪进行信号采集和分析。该结构是通过熔接机(古河, S178C, 日本)将MMF熔接在NCF中间,将SMF熔接在两段NCF的两端, TiO_2 包覆于NCFs外侧。光从输入端SMF进入,在经过NCF1时,激发出高阶模式,以高阶模式传输,在经过MMF时,激发出的高阶模与纤芯基模同时在包层和纤芯中传输,当不同模式的光传播到NCF2与SMF的熔接点时,重新耦合到SMF纤芯内部,相位差的存在使不同模式的光产生干涉,得到干涉光谱。SMF和NCF为无偏心熔接,由于输入场具有角向对称性且光纤具有中心对称结构,所以NCF中只有高阶本征模式 LP_{0m} 被激发^[13]。

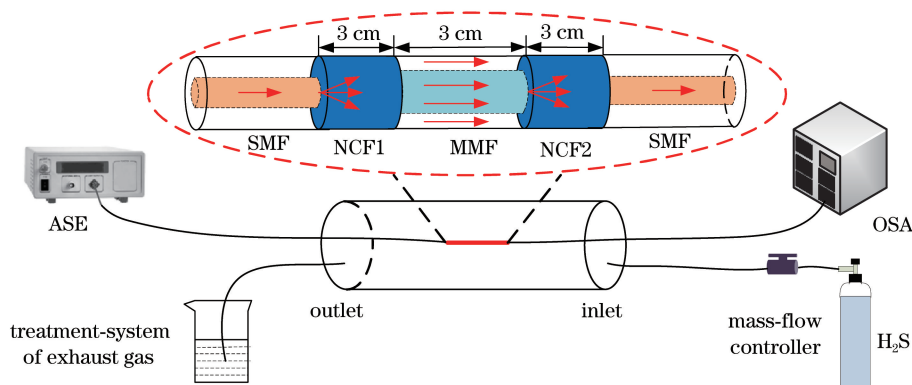


图1 NMN的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of NMN

设从 SMF 输入的光场为 $E(r, 0)$, NCF 中的第 m 阶模式的光场为 $F_m(r)$, 在输入端 SMF 和 NCF1 连接处有^[14]

$$E(r, 0) = \sum_{m=1}^N c_m F_m(r), \quad (1)$$

式中: N 为 NCF 中存在的总的模式数目, c_m 为第 m 阶模式的光场激发系数。 c_m 可表示为

$$c_m = \frac{\int_0^{\infty} E(r, 0) F_m(r) r dr}{\int_0^{\infty} F_m(r) F_m(r) r dr}. \quad (2)$$

当光传播 z 距离后, NCF 纤芯部分的光场可以表示为^[14-15]

$$E(r, z) = \sum_{m=1}^M c_m F_m(r) \exp(i\beta_m z), \quad (3)$$

式中: β_m 为第 m 阶模式的纵向传播常数^[16]。在 NCF1 与未包覆 MMF 的熔接点处, 部分第 m 阶模的光进入未包覆 MMF 的纤芯, 另一部分耦合到未包覆 MMF 的包层。未包覆 MMF 中第 n 层包层模式的耦合系数 d_n 与(2)式类似, 可表示为^[17]

$$d_n = \frac{\int_0^{\infty} \sum_{m=1}^M c_m F_m(r) \exp(i\beta_m L_N) f_n(r) r dr}{\int_0^{\infty} f_n(r) f_n(r) r dr}, \quad (4)$$

式中: L_N 为 NCF 长度, $E(r, L_N)$ 为传输 L_N 距离的场分布, $f_n(r)$ 为未镀膜 MMF 的场分布。由(4)式可知, 未包覆 MMF 中第 n 阶模的激励依赖于 NCF 中传导的第 m 阶模的相位。也就是说, 未包覆 MMF 中的场分布和 NMN 光纤结构的传输光谱受 NCF1 长度的影响。

未镀膜 MMF 截面的场分布可表示为

$$f(r, l) = \sum_{n=1}^N d_n f_n(r) \exp(-j\beta_n l), \quad (5)$$

式中: l 为 MMF 长度, 在 MMF 与 NCF2 的熔接点处, 部分 MMF 耦合的包层模式与 NCF 中的高阶模相结合。因此, 在 NCF2 截面上, MMF 的基模与高阶模之间存在模式干涉。

为研究基于 NMN 光纤结构的传输光谱, 确定 NCF 的最佳长度, 模拟光在 NCF 中的传播, 光在 NCF 内部传输的过程中, 被激发出的高阶模式间发生干涉, 并产生与其波长相位、幅值相对应的周期性光焦点。即随着光信号在多模波导中传输长度的不同, 光场分布会出现周期性的再现现象, 这种现象即

自映像效应。在自映像处, 光场的能量与入射光场相同, 所以此处的光场强度最大, 耦合到输出端 SMF 的光能量也就越大。图 2 为仿真光沿 NCF 传播的场分布, X 轴表示光纤的半径方向, Z 轴表示光纤纵向, 即光传播距离。在仿真中, SMF 纤芯折射率为 1.467, 直径为 $8.2 \mu\text{m}$; NCF 折射率为 1.444, 直径为 $125 \mu\text{m}$; 入射光波长为 1550 nm , 背景折射率为 1。

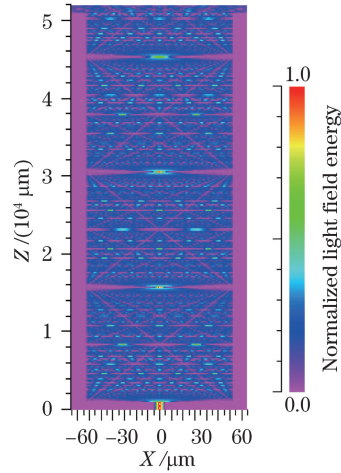


图 2 光沿 NCF 传播场分布图

Fig. 2 Field distribution of light propagation in NCF

由图 2 可知, 在大约 15 mm 、 30 mm 和 45 mm 的 z 位置处, NCF 的自映像点是明显的。为研究 NCF 长度对干涉光谱的影响, 选取长度为 15 mm 、 30 mm 和 45 mm 进行实验研究, 构建 NMN 结构, 如图 3 所示。模拟与实验结果表明选择 30 mm 长的 NCF, 干涉效果最优。

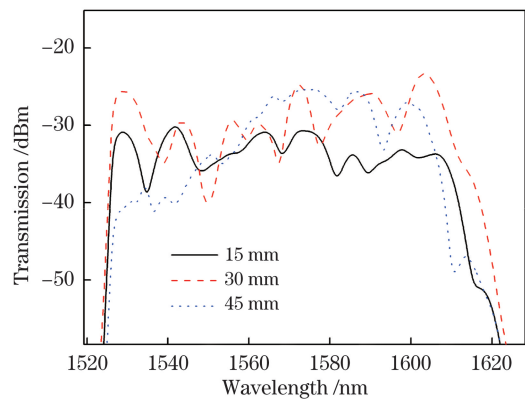


图 3 NCF 长度为 15, 30, 45 mm 的 NMN 结构的透射谱

Fig. 3 Transmission spectra of NMN structures with NCF lengths of 15, 30, and 45 mm

2.2 NMN 结构的公式分析

当两种不同模式的光传播到 NCF2 与 SMF 的

熔接点时,重新耦合到 SMF 纤芯内部,相位差的存在使不同模式的光产生干涉,得到干涉光谱。干涉光强可表示为^[18-19]

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi, \quad (6)$$

$$\varphi = 2\pi(n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{high}})l/\lambda_m = 2\pi\Delta n_{\text{eff}}l/\lambda_m, \quad (7)$$

式中: I 为总输出光强; I_1 和 I_2 分别为基模和高阶模中传输的光强; φ 为相位差; l 为发生干涉的长度; λ_m 为第 m 阶高阶模的干涉波长; Δn_{eff} 为基模有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 和高阶模有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{high}}$ 的差值。

NCF 表面涂覆 TiO_2 敏感膜吸附气体,会导致 NCF 中高阶模式的有效折射率($n_{\text{eff}}^{\text{high}}$)变化,并最终使干涉条纹中心波长的位置随着折射率的变化而变化,其第 m 阶干涉条纹中心波长漂移量($\Delta\lambda_m$)表示

为^[20]

$$\Delta\lambda_m = \frac{(\Delta n_{\text{eff}} + \Delta n)l}{m} - \frac{\Delta n_{\text{eff}}l}{m} = \frac{\Delta n l}{m}, \quad (8)$$

式中: Δn 为高阶模有效折射率变化引起的折射率差值的变化量。从(8)式可以看出,波长漂移量受到干涉长度 l 和折射率差值 Δn 变化的影响。在干涉长度 l 一定时,干涉条纹中心波长的漂移量随着高阶模有效折射率的变化而线性变化。因此,可以通过检测中心波长的漂移量来测量外界环境的折射率变化。

考虑到 MMF 长度对于干涉结构的影响,研究了 MMF 长度分别为 10 mm、30 mm 和 50 mm 时的透射光谱,如图 4 所示,结果表明选择 30 mm 的 MMF,干涉效果最优。

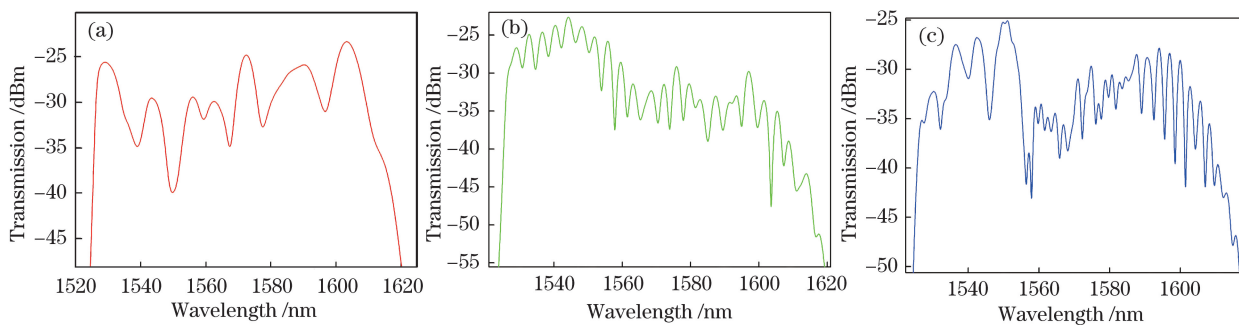


图 4 含有不同长度的 MMF 的 NMN 结构透射光谱。(a) 10 mm; (b) 30 mm; (c) 50 mm

Fig. 4 Transmission spectra of NMN structures with different MMF lengths. (a) 10 mm; (b) 30 mm; (c) 50 mm

3 结果与讨论

将 0.02 g 聚乙二醇溶于 40 ml 去离子水,连续搅拌至完全溶解,配成 0.5% 的水溶液,加入 0.1 g 的纳米 TiO_2 ,采用磁力搅拌器连续搅拌 30 min,使纳米 TiO_2 在聚乙二醇水溶液中分散均匀。将配好的纳米 TiO_2 放入离心管中,将剥除好的两段光纤浸泡其中,然后匀速提拉,150 °C 下干燥 5 min,重复上述步骤 5 次后,放入真空干燥箱中,150 °C 下干燥 5 h。

实验检测气体为 H_2S ,使用 H_2S 浓度标定器确定 H_2S 浓度,配制了体积分数为 $0\sim 3\times 10^{-5}$ 范围的 H_2S 气体。实验中使用铝箔采样袋存放气体,用注射器通入气室进行测量,对不同浓度的 H_2S 进行测量。需说明的是,本实验的所有测试均在室温 (300 K) 下进行。

H_2S 与膜作用的敏感机理如图 5 所示, e 表示电子,在通入一定浓度的 H_2S 气体后, H_2S 气体分

子和敏感膜相互作用,在室温下,敏感膜的表面被认为有少量的电子转移。当 H_2S 气体分子接触敏感膜时,它很容易失去电子给敏感膜,这会影 NCF 中高阶模的有效折射率,最终使干涉条纹中心波长发生变化。而 H_2S 气体分子在离开敏感膜时,会从敏感膜获得电子。以上 2 个过程,分别对应气体与膜作用的响应和恢复过程。

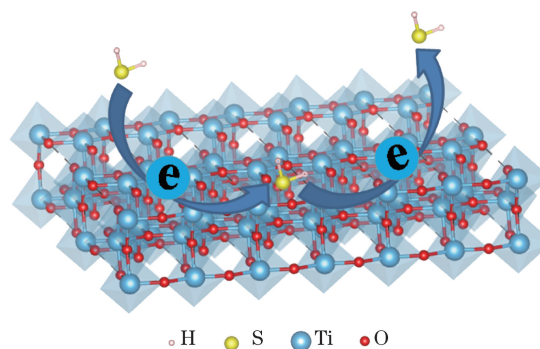


图 5 敏感机理图

Fig. 5 Schematic of sensing mechanism

选取输出光谱在 1603 nm 左右的波谷进行监测,观察 H₂S 气体体积分数为 0~3×10⁻⁵ 范围内波谷的偏移。由图 6 可知,随着通入 H₂S 气体浓度的增大,输出光谱发生明显的红移。传感区域的敏感膜吸附了 H₂S 气体分子,导致 Δn 的增加从而使中心波长发生了红移,这与(7)和(8)式的分析一致,实验结果与理论分析具有较好的一致性。在 H₂S 气体体积分数为 0~3×10⁻⁵ 范围内对 1603 nm 波长附近偏移量与所测气体浓度进行线性拟合,发现对应的偏移量的线性拟合度 R²=0.98462,其灵敏度为 7.36 pm/10⁻⁶,即具有良好的线性度和灵敏度。图 7 为该传感器的气体选择性图,相比相同浓度 CO、Ar、O₂、CO₂、NH₃ 和 SO₂,该装置对 H₂S 有很高的选择性。由于 H₂S 气体分子是极性分子,所以相对于 CO、Ar、O₂ 和 CO₂ 这些非极性分子,TiO₂ 敏感膜对 H₂S 气体分子的吸附能力更强,而相对于极性分子 NH₃ 和 SO₂,敏感膜对 H₂S 气体分子的吸附能力也很强,MG 是混了 H₂S、NH₃ 和 N₂ 的混合气体,在存在多种气体混合的情况下,敏感膜对 H₂S 气体分子的吸附能力也很强,结果表明该传感器对 H₂S 有很高的选择性。图 8 为该传感器的恢复-响应曲线,其响应时间 t_r 大约为 50 s,恢复时间 t_f 大约为 65 s。

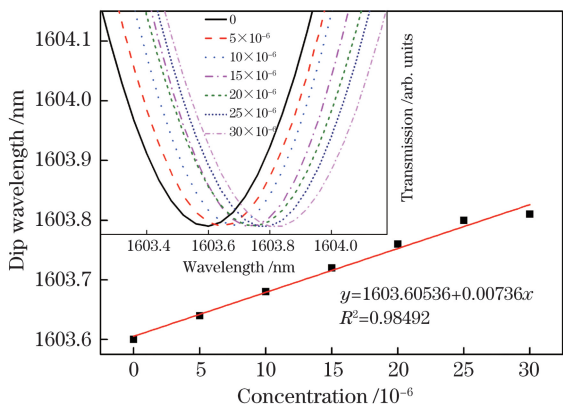


图 6 波长随 H₂S 浓度的变化,插图显示了传感器在不同 H₂S 浓度下的光谱响应

Fig. 6 Wavelength as a function of concentration of H₂S.

Inset shows spectral responses of sensor under various concentrations of H₂S

4 结 论

提出一种低浓度 H₂S 气体检测的光纤传感器。将两段无芯光纤熔接在多模光纤两端,利用熔接点两侧光纤支持模式的模场不匹配而发生模式干涉的条件,构建了一种新型 H₂S 气体传感器。因无芯光

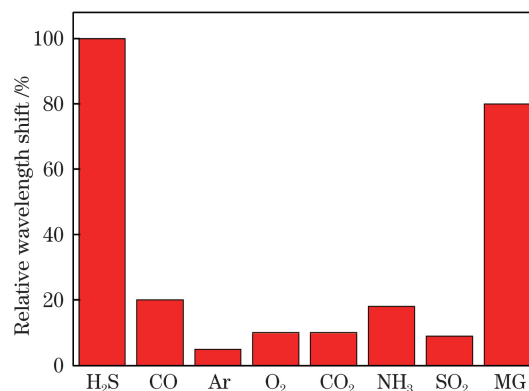


图 7 H₂S 传感器的气体选择性

Fig. 7 Gas selectivity of H₂S sensor

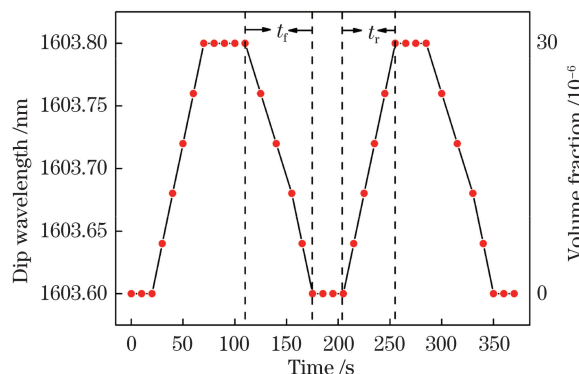


图 8 H₂S 传感器的响应-恢复曲线

Fig. 8 Response-recovery curve of H₂S sensor

纤外表面所镀的二氧化钛薄膜对 H₂S 气体的吸附作用,能改变无芯光纤的有效折射率,使干涉光谱发生改变,从而达到检测 H₂S 气体浓度的目的。对 H₂S 气体的实验表明当 H₂S 气体体积分数在 0~3×10⁻⁵ 范围内时,随着 H₂S 浓度的增大,干涉波谷发生红移,其灵敏度为 7.36 pm/10⁻⁶,响应和恢复时间分别约为 50 s 和 65 s,H₂S 浓度与波长偏移之间存在良好的线性关系和选择性。该传感器的体积小、结构简单、制备方便,对低浓度 H₂S 气体测量具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Deng D S, Qin X, Huang G J, *et al.* Design and application of copper deposited tungsten disulfide film coated thin-core optical fiber gas sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1106002.
邓大申, 秦祥, 黄国家, 等. 铜沉积二硫化钨膜包覆薄芯光纤气体传感器的设计与应用[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1106002.
- [2] Zhang L L, Liu J X, Zhu Z Z, *et al.* Study on detection of trace sulfur dioxide gas based on quartz enhanced photoacoustic spectroscopy [J/OL]. Laser

- &. Optoelectronics Progress, 2019, 56(21): 213001 [2019-05-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20190508.1151.058.html>.
- 张蕾蕾, 刘家祥, 朱之贞, 等. 基于石英增强光声光谱的 H₂S 痕量气体检测研究[J/OL]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(21): 213001[2019-05-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20190508.1151.058.html>.
- [3] Han Z Y, Jin S X, Chen Y Q. Effect of low concentration exposure of hydrogen sulfide on workers' health[J]. Chinese Journal of Industrial Medicine, 2006, 19(6): 362-363.
韩志英, 金沈雄, 陈玉清. 接触低浓度硫化氢对工人健康的影响[J]. 中国工业医学杂志, 2006, 19(6): 362-363.
- [4] Xu N, Dai M. Design of distributed optical fiber sensor for temperature and pressure measurement[J]. Chinese Optics, 2015, 8(4): 629-635.
徐宁, 戴明. 分布式光纤温度压力传感器设计[J]. 中国光学, 2015, 8(4): 629-635.
- [5] Cheng J, Yang M H, Wang M, *et al.* Mach-Zehnder interference hydrogen sensor based on femtosecond laser processing[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0706001.
成洁, 杨明红, 王闵, 等. 基于飞秒激光加工的马赫-曾德尔干涉氢气传感器[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0706001.
- [6] Markov A, Guo Y, Chang T Y, *et al.* Application of fiber Bragg gratings in the measurements of acoustic properties of ice[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1106001.
马科夫·阿列克谢, 郭耀, 常天英, 等. 光纤布拉格光栅在冰声学性能测量中的应用[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1106001.
- [7] Allison S W, Gillies G T. Observations of and applications for self-imaging in optical fibers[J]. Applied Optics, 1994, 33(10): 1802-1805.
- [8] Frazão O, Viegas J, Caldas P, *et al.* All-fiber Mach-Zehnder curvature sensor based on multimode interference combined with a long-period grating[J]. Optics Letters, 2007, 32(21): 3074-3076.
- [9] Fu H W, Li H D, Shao M, *et al.* TCF-MMF-TCF fiber structure based interferometer for refractive index sensing[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 69: 58-61.
- [10] Luo Y Y, Xia L, Yu C, *et al.* Multi-parameter optical fiber sensor based on enhanced multimode interference[J]. Optics Communications, 2015, 344: 120-124.
- [11] Yang Y, He H, Li Q S, *et al.* TiO₂ nanowire array based interferometric sensor[J]. Chinese Optics, 2014, 7(3): 421-427.
杨洋, 何皓, 李秋顺, 等. TiO₂ 纳米线阵列干涉传感器[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 421-427.
- [12] Chaudhari G N, Bambole D R, Bodade A B, *et al.* Characterization of nanosized TiO₂ based H₂S gas sensor[J]. Journal of Materials Science, 2006, 41(15): 4860-4864.
- [13] Zhang R X, Zhang J F, Zhao Y J, *et al.* Study of temperature characteristics of singlemode-multimode-singlemode fiber structure[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2018, 29(9): 925-932.
张荣香, 张建飞, 赵亚军, 等. 单模-多模-单模光纤结构的温度特性研究[J]. 光电子·激光, 2018, 29(9): 925-932.
- [14] Wu Q, Semenova Y, Wang P F, *et al.* High sensitivity SMS fiber structure based refractometer-analysis and experiment[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 7937-7944.
- [15] Li E B. Sensitivity-enhanced fiber-optic strain sensor based on interference of higher order modes in circular fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(16): 1266-1268.
- [16] Pu S L, Tang J L, Liu Z H, *et al.* Magnetic field sensing based on magnetic-fluid-clad no-core single-mode no-core fiber structure[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(12): 1206002.
卜胜利, 汤佳莉, 刘志恒, 等. 磁流体包覆的无芯-单模-无芯光纤结构的磁场传感特性[J]. 光子学报, 2015, 44(12): 1206002.
- [17] Yin B, Li Y, Liu Z B, *et al.* Investigation on a compact in-line multimode-single-mode-multimode fiber structure[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 80: 16-21.
- [18] Feng X, Yang X Z, Huang G J, *et al.* Hydrogen sulfide gas sensor based on Cu ion-deposited graphene-coated tapered photonic crystal fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(9): 0923002.
冯序, 杨晓占, 黄国家, 等. 基于铜离子沉积石墨烯涂层锥形光子晶体光纤的硫化氢传感器[J]. 光子学报, 2017, 46(9): 0923002.
- [19] Zhao X L, Zhang Y M, Song Y M, *et al.* Switchable multi-wavelength fiber laser based on non-core fiber combing with polarization maintaining fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0201005.
赵小丽, 张钰民, 宋言明, 等. 基于无芯光纤结合保偏光纤的可切换多波长光纤激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0201005.
- [20] Feng X, Feng W L, Tao C Y, *et al.* Hydrogen sulfide gas sensor based on graphene-coated tapered photonic crystal fiber interferometer[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 247: 540-545.