

文章编号 1004-924X(2008)10-1936-06

新结构 D 形光纤消逝场传感器

庄须叶^{1,2}, 吴一辉¹, 王淑荣¹, 宣明¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为提高 D 形光纤消逝场传感器的灵敏度并改进制作工艺,对 D 形光纤的结构和制作方法进行了研究。通过加大 D 形光纤的研磨深度,增大了传感器的有效探测面积,并使消逝场能量可以直接与被测物质作用,避免了能量耦合的损耗,提高了传感器的灵敏度。提出了采用机械研磨制作 D 形光纤的新方法,降低了制作成本。改进结构后,D 形光纤消逝场传感器的灵敏度比旧结构传感器的灵敏度提高了 3 个数量级,是具有相同光程长度的直接光探测方法的 1.2 倍。测量亚甲基蓝时的灵敏度达到 0.043 5,最低测量浓度在 10^{-7} mol/L 数量级,传感器的响应速度快,适合实时检测。结果表明,改进结构的 D 形光纤传感器灵敏度高,可以实时地反映被测物的浓度变化。

关键词: D 形光纤; 光纤消逝场传感器; 高灵敏度

中图分类号: TN253; TP212.2 **文献标识码:** A

Optical fiber evanescent field sensor based on new type D-shaped fiber

ZHUANG Xu-ye^{1,2}, WU Yi-hui¹, WANG Shu-rong¹, XUAN Ming¹

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: In order to improve the sensitivity of D-shaped optical fiber evanescent field sensor, the construction and manufacturing methods of the sensor were studied and the construction of sensing fiber was improved. By increasing the grinding depth for D-shaped optical fiber, enlarging the effective detecting area of sensing fiber and letting the energy of evanescent wave field interact with the analyzed substance directly, the sensitivity of the sensor was improved greatly. D-shaped fiber was fabricated by a new machine grinding method, so that the quality of fiber surface was improved and the produce cost was reduced. Experimental results show that the sensitivity of new sensor has improved by three order of magnitude as compared with that of original D-shaped fiber sensor, and is about 1.2 times that of the open-path cell sensing with the same optical paths length. The sensor's sensitivity is 0.043 5 when detecting methylene blue solutions, the lowest concentration can be sensed to the order 10^{-7} mol/L. It proves that the new sensor has a higher sensitivity and can be used in real-time detection.

Key words: D-shaped fiber; optic-fiber evanescent wave sensor; high sensitivity

收稿日期: 2008-05-12; 修订日期: 2008-07-09.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2006AA04Z358); 国家自然科学基金资助项目 (No. 60574089)

1 引言

光纤传感器与传统的传感器相比有着灵敏度高,抗电磁干扰、抗氧化腐蚀能力强,使用过程中不会产生电火花,易集成化,可以进行远距离、分布式的适时监控等优点^[1-6]。自上世纪 80 年代以来,人们相继研制了各种类型的光纤消逝场传感器^[3]。2006 年,本实验室提出了少模光纤消逝场传感器的设计方法^[1],研制出了可探测亚甲基蓝至 3.0×10^{-7} mol/L 的高灵敏度光纤消逝场传感器。但由于传感器传感光纤直径太小,传感器的强度较弱、易损,从而对传感器的操作要求十分严格。

D 形光纤传感器由于直径较大,便于封装,具有较高的强度,但灵敏度较低,据 B. Culshaw、G. Stewart 等人报道,使用该种传感器探测甲烷时,在相同光程长度条件下,其灵敏度仅仅相当于直接探测的千分之一^[7-8]。为提高传感器的灵敏度,许多学者采用长周期光纤和布拉格光栅光纤制作 D 形光纤传感器^[9-10],此方法虽然提高了传感器的灵敏度,但增加了制作成本,使 D 形光纤传感器的应用受到了限制。

本实验室对 D 形光纤消逝场传感器的结构进行了改进,设计出了一种新结构的 D 形光纤消逝场传感器,大大提高了传感器的灵敏度。提出了一种全新的 D 形光纤制作方法,该方法基于机械研磨,降低了制作成本,灵活方便。

2 基本原理

光在光纤中传播时,会在芯层和包层的界面上形成消逝场^[11]。光纤中由于包层为非吸收介质,不会引起光纤中传输能量的减少。当把光纤研磨成 D 形后,光纤上面的包层被除掉,消逝场会与待测物质发生作用而引起能量的吸收,反映为光纤输出光强的减少。通过检测光纤输出光强的大小就可以反推出被测物质溶液浓度的大小,这就是传感器的作用机理。

光纤消逝场场强的大小可以表示为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp(-z/dp), \quad (1)$$

式中: \mathbf{E}_0 是消逝场在界面处的能量强度;

z 是场点到界面的距离;

dp 是消逝场的穿透深度,定义为当能量场的强度下降到 $\frac{1}{e}\mathbf{E}_0$ 时,场点到界面的距离。公式表达如下:

$$dp = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}}. \quad (2)$$

式中: λ 是光在真空中传播时的波长;

n_1 为光纤纤芯的折射率;

n_2 为被测物溶液的折射率;

θ 为光线的入射角。

B. Culshaw、G. Stewart 等人制作的传感器预留了很薄的一部分包层,厚度 dz 要求小于消逝场的穿透深度,消逝场能量可以穿过这部分残留的光纤包层与被测物质接触引起能量的吸收,进而实现传感器的探测。因许多物质的测量都是在其水溶液中进行的,其折射率一般较光纤纤芯折射率小很多,特别是当该物质的浓度很低的时候更是明显,造成被测溶液与纤芯的折射率差 Δn 很大。通过预留一层光纤包层可以达到折射率的匹配,形成弱导条件,降低光纤中的波导模式的数量,激发出更多的消逝场能量,并提高消逝场能量的穿透深度^[12]。但当能量在穿透包层待测物质渗透时,会发生波导间能量的耦合,有一部分能量会被限制在光纤包层中^[13]。分析证明传感器的灵敏度与 dz 的大小密切相关, dz 越小灵敏度越高^[14]。

本实验室设计的传感器如图 1(b)所示,以前的 D 形光纤传感器如图 1(a)所示。改进后的传感器的研磨深度达到光纤纤芯直径的一半。这样虽然增多了光纤中波导模式的数量,降低了激发的消逝场能量,但消逝场能量可以直接作用于被测物质,且大大增加了传感器的作用面积,使得更大范围内的消逝场可以参与作用。

现取 $dz=0$,据公式(2)画出两种传感器的消逝场穿透到待测物质中的深度大小如图 2 所示。取光纤外径 $R_2=125 \mu\text{m}$,芯径 $R_1=62.5 \mu\text{m}$,纤芯折射率 $n_o=1.4682$,包层折射率 $n_{cl}=1.4646$,被测物质的折射率 $n_c=1.3334$,光线的入射角 $\theta=4.8^\circ$ 。

从图 2 可以看出改进结构的光纤传感器的有效作用范围远远大于改进前的。取光纤的传感长度为 12 mm,则改进前 D 形传感器的有效作用面积是, $12 \text{ mm} \times 2 \times 14.6 \mu\text{m} = 3.50 \times 10^5 \mu\text{m}^2$,而

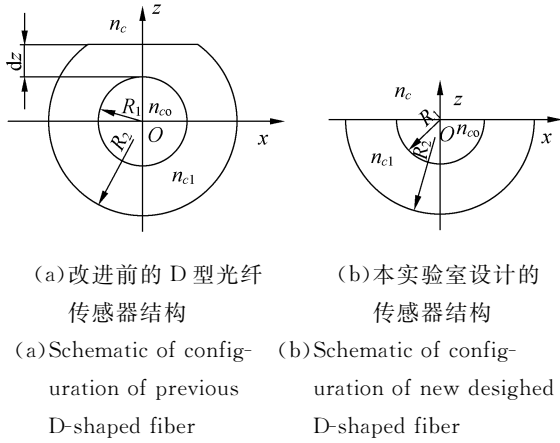


图 1 两种类型 D 形光纤的结构图

Fig. 1 Schematic of configurations of two kinds of D-shaped fibers

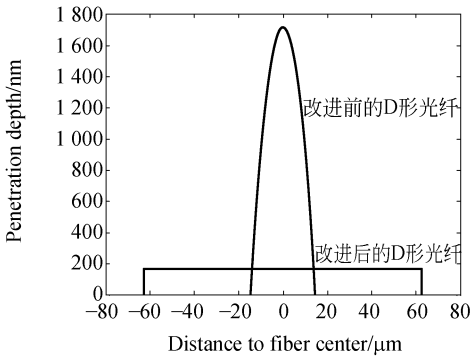


图 2 两类 D 形光纤的消逝场穿透深度

Fig. 2 Penetration depths of evanescent fields of two types D-shaped fibers

改进后的传感器的有效作用面积为 $12 \text{ mm} \times 2 \times 62.5 \text{ } \mu\text{m} = 1.50 \times 10^6 \text{ } \mu\text{m}^2$, 比改进前的多 $1.15 \times 10^6 \text{ } \mu\text{m}^2$ 。

3 实验和实验结果

3.1 D 形光纤的制作

以往制作 D 形光纤, 多先加工出 D 形结构的光纤预制棒, 然后通过光纤拉丝机拉制成纤细的 D 形光纤, 也有部分学者使用氢氟酸腐蚀光纤制作 D 形光纤^[15]。这里采用了一种基于机械研磨的新型加工办法, 将光纤洗净, 晾干, 如图 3 所示, 固定到研磨夹具上, 粘牢后进行研磨。用此法制得的 D 形光纤表面质量可控, 方便易行。

为快速精确地研磨 D 形光纤, 可先用粗金刚石微粉将光纤粗磨掉 $60 \text{ } \mu\text{m}$ 左右, 接着用细金刚石微粉将其精磨至光纤直径的一半, 然后再根据表面的要求进行抛光。研磨好的 D 形光纤如图 4 所示。图 5 是反色显示的 D 形光纤通光的图片。图 6 为 D 形光纤的端面图。图 7 是用氧化铈抛光后的光纤平面的原子力显微镜图。

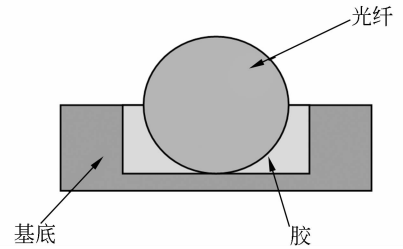


图 3 固定在研磨夹具上的光纤断面图

Fig. 3 Cross-section of the fiber glued on clamp

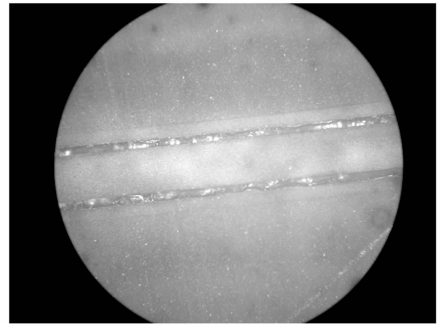


图 4 研磨好的 D 形光纤

Fig. 4 Finished D-shaped fiber

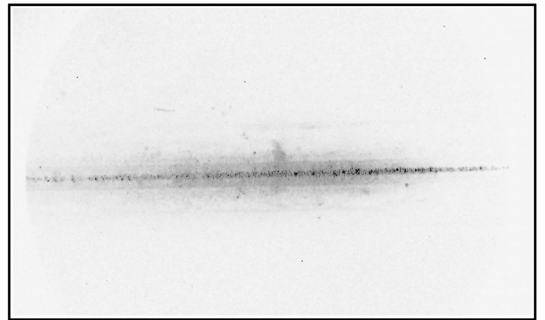


图 5 D 形光纤通光图

Fig. 5 Schematic of D-shaped fiber with light on

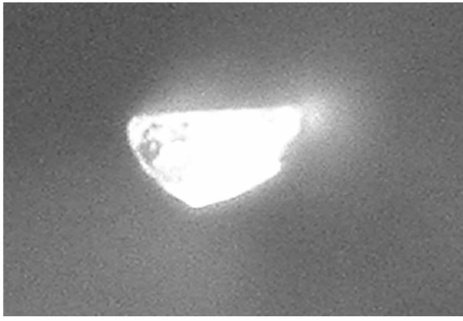


图 6 D 形光纤端面图

Fig. 6 Schematic of end face of D-shaped optic fiber

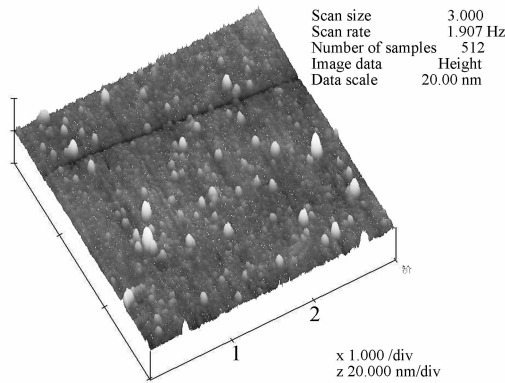


图 7 抛光后传感器的表面原子力显微镜图

Fig. 7 RFM photo of polished sensor surface

3.2 实验系统的搭建

实验系统的搭建如图 8 所示。

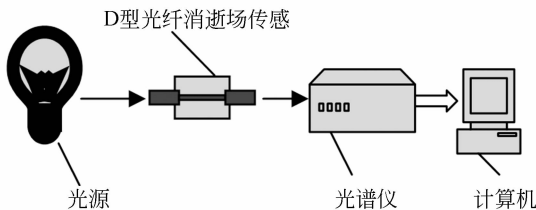


图 8 实验系统简图

Fig. 8 Sketch of experiment set-up

试验所用的光源为氩氦激光器,波长 632.8 nm,光谱仪是本实验室自己开发研制的微型光谱仪,波长范围为 400~800 nm。

3.3 实验结果

用有效传感长度为 12 mm,研磨深度 62.5 μm 的 D 形消逝场光纤传感器测量不同浓度的亚甲基蓝溶液得到的吸光度曲线如图 9 所示。抛光

前是指光纤平面用直径 2.5 μm 的金刚石微粉直接研磨所得的 D 形平面,抛光后是指用氧化铈对传感器的 D 形平面进行抛光后所得的平面。抛光前的传感器在亚甲基蓝的浓度为 9×10^{-7} mol/L 时,吸光度大小为 0.061,线性相关度为 0.983 01。定义传感器的浓度灵敏度 $S = \frac{dA}{dC}$,表示单位浓度变化引起的传感器吸光度的变化,则可以得到传感器测量亚甲基蓝时的灵敏度为 0.0435。把光纤用氧化铈抛光后,测量亚甲基蓝 9×10^{-7} mol/L 时,得到的吸光度大小为 0.058 9,线性相关度为 0.983 67,灵敏度为 0.022 9,大约是抛光前的一半。

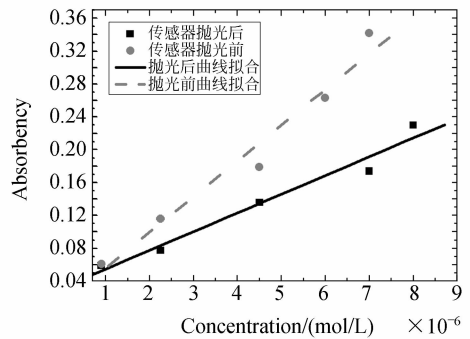


图 9 亚甲基蓝的吸光度与浓度曲线图

Fig. 9 Absorbencies of methylene blue against concentrations

通过比较可见,当光纤表面较粗糙时,传感器的灵敏度较高,线性度低。这是因为水溶液中的石英光纤表面存在着一层高浓度的一OH⁻离子,这些离子的存在加强了溶液中的亚甲基蓝分子固着到传感器光纤表面的趋势,而固着到光纤上的亚甲基蓝分子会引起传感器吸光度的增加和非线性的加强^[16]。传感器光纤表面粗糙度大,有效表面积就大,亚甲基蓝分子就越容易固着到传感器上,引起较大的吸光度和非线性,因此未抛光的 D 形光纤消逝场传感器灵敏度较大,线性度较小。另一个重要影响是光纤表面的瑞利散射,根据瑞利准则光在光纤平面发生散射时,散射损耗随 $K^2 \cos^2 \theta$ 变化, K^2 表征表面的粗糙度, θ 是入射角^[12]。粗糙度越大,由散射引起的损耗就大,线性度差。

为测试检测亚甲基蓝时,传感器随时间的响应情况,用红光 LED 作光源,用实验室自制的光电转换器和安杰伦采集器(34970A)采集数据,得

到的传感器随时间的响应曲线如图 10 所示。因光电转换器采用了反相放大,所以图中电压值越高,相对应的光强越弱。在亚甲基蓝为 1×10^{-6} mol/L 时,需要约 900 s 的时间达到平衡,在 1×10^{-5} mol/L 这个时间降低到 600 秒。注意这是亚甲基蓝分子在光纤表面达到吸附和解析平衡时所需要的时间,并不是器件本身的上升时间。图中传感器可以实时反映待测溶液中平衡关系建立的动态过程。从空气到注水再到抽水时的电压响应曲线,可以看出传感器本身的响应时间很短,可以认为是瞬时的,能够满足实时检测的要求。

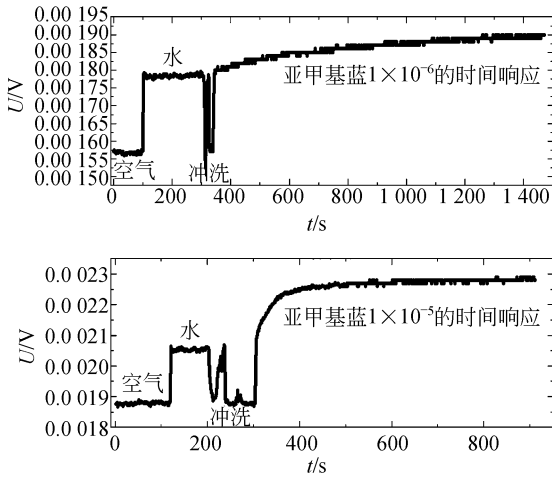


图 10 传感器的时间响应曲线

Fig. 10 Response time of sensor

用红光 LED 作光源时,得到的不同浓度的亚甲基蓝光谱曲线如图 11 所示。

取光程 10 mm,用 $\lambda 850$ 测量浓度为 1×10^{-6} mol/L 的亚甲基蓝溶液在波长 632.8 nm 时的吸光度值为 0.042 5,根据朗贝尔定律将光程换算成 12 mm 时吸光度为 0.0510。新型 D 形光

纤消逝场传感器的吸光度大约是直接测量的 1.2 倍,经计算可知其灵敏度比 B. Culshaw、G. Stewart 等人制作的 D 形光纤消逝场传感器要高 3 个数量级。

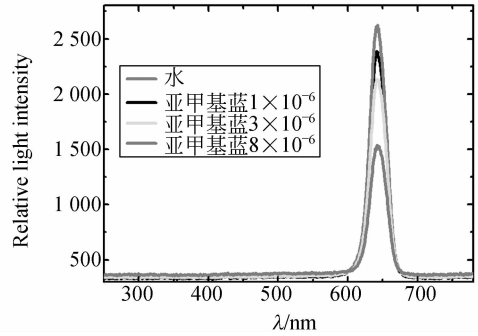


图 11 不同浓度的亚甲基蓝溶液光谱图

Fig. 11 Original spectra obtained with different methylene blue concentrations

4 结 论

用机械研磨的方法制作了 D 形光纤,降低了成本,安全可靠,且制得的 D 形光纤表面质量可控、强度高、抗冲击能力强。新结构的 D 形光纤消逝场传感器,使消逝场能量直接与被测物质作用,并增大了传感光纤的有效面积,在相同的光程条件下此传感器的灵敏度是直接吸收的 1.2 倍,较 B. Culshaw、G. Stewart 等人报道的 D 形光纤消逝场传感器的灵敏度提高了 3 个数量级。该传感器反应时间快,灵敏度高,适合于实时监测,在环境监控、医疗及制药等领域有着良好的应用前景。

参考文献:

- [1] WU Y H, DENG X H, ZHUANG X Y, *et al.*. Less-mode optic fiber evanescent wave absorbing sensor; Parameter design for high sensitivity liquid detection[J]. *Sensors and Actuators B*, 2007, 122(1): 127 - 133.
- [2] 赵明富, 廖强, 陈艳, 等. 光纤生物量浓度在线检测传感器[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(4): 478-485. ZHAO M F, LIAO Q, CHEN Y, *et al.*. Fiber sensor for biomass' online testing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 478 - 485. (in Chinese)
- [3] ANGELA L, SHANKAR P M, MUTHARASAN R. A review of fiber-optic biosensors[J]. *Sensors and Actuators B*, 2007, 125(2): 688-703.
- [4] 桑新柱, 余重秀, 等. 基于光纤布拉格光栅的化学传感器[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(5): 771-774. SANG X ZH, YU CH X, *et al.*. Chemical sensor based on a fiber Bragg grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,

- 14(5):771-774. (in Chinese)
- [5] 唐炜,史仪凯. Bragg 光纤传感技术研究[J]. 光学精密工程,2002,10(1):79-83.
TANG W, SHI Y K. Optical fiber Bragg sensing technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(1):79-83. (in Chinese)
- [6] HONG S, HADDOCK. Fabrication of biconical tapered optical fibers using hydrofluoric acid[J]. *Materials Science and Engineering B*,2003,97: 87-93.
- [7] CULSHAW B, MUHAMMAD F. Evanescent wave methane detection using optical fibers[J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(24):2232-2234.
- [8] STEWARTA G, JINB W,CULSHAW B. Prospects for fibre-optic evanescent-field gas sensors using absorption in the near-infrared [J]. *Sensors and Actuators B*,1997,38: 42-47.
- [9] ALLSOP T,DOBB H,MEZENTSEV V, *et al.*. The spectral sensitivity of long period gratings fabricated in elliptical core D-shaped optical fibre[J]. *Optics Communications*, 2006, 259: 537-544.
- [10] ZHOU J L,DONG X P,SHI ZH D. Tunable chirped fiber Bragg grating based on the D-shaped fiber[J]. *Optics Communications*, 2008, 281: 2077 - 2082.
- [11] CULSHAW B, DAKIN J. 光纤传感器[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1997.
CULSHAW B, DAKIN J. *Optical Fiber Sensors* [M]. Wuhan: HUST Press, 1997. (in Chinese)
- [12] GLOGE D. Weakly guiding fibers[J]. *Appl. Opt.*, 1971, 10:2252-2258.
- [13] TIEN P K. Integrated optics and new wave phenomena in optical waveguides[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1997,49:361-420.
- [14] WU G,WANG Z Y. Propagation characteristics of multi-coating D-shaped optical fibres[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*,2006,8: 450 - 453.
- [15] SELFRIDGE R H, PUGMIRE. In-situ monitoring of D-type fiber etching[J]. *SPIE*, 1989, 1168:314-322.
- [16] RUDDY V, MACCRAIT B D. Evanescent wave absorption spectroscopy using multimode fibers[J]. *J. Appl. Phys.*,1990, 67 (10):6070-6074.

作者简介:庄须叶(1981—),男,山东日照人,博士研究生,主要研究方向为光纤消逝场传感器技术。E-mail: zxye8888@hotmail.com

吴一辉(1965—),女,内蒙古呼和浩特人,博士,研究员,主要从事 MOEMS 技术、微流体、光探测技术和卫星姿态控制飞轮等方面的研究。E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn

通讯作者:宣明(1956—),男,江苏常州人,研究员,博士生导师,主要从事 MOEMS 技术方面的研究。