

新型的分段结构光纤倏逝波传感器

楼俊 许宏志 黄杰 李本冲 沈为民

(中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 提出一种基于倏逝波吸收原理的分段结构光纤倏逝波传感器。运用光束传播法(BPM)对分段和直形波导模型进行数值模拟,分段波导中高阶模在每次分段的第一个界面上被反复地激发。分析不同结构、纤芯直径和溶液浓度对传感器灵敏度的影响,通过化学腐蚀方法制备出不同结构参数的倏逝波传感器,并用不同浓度亚甲基蓝溶液对传感器的灵敏度特性进行实验验证。实验结果表明,在传感直径相同的条件下,传感长度为 5 cm 分段结构光纤倏逝波传感器的灵敏度为 0.0135 L/mmol,优于传感长度为 6 cm 的传统的单一直形传感器的灵敏度 0.0102 L/mmol。分段结构光纤倏逝波传感器能有效地激发光纤中低阶模到高阶模的转变,从而提高传感器的灵敏度。实验结果与模拟和理论结果相符。因此,分段结构光纤倏逝波传感器相对于传统的单一的直形传感器不仅具有较高的灵敏度,且机械强度较高,在物质光谱检测方面有着潜在的应用。

关键词 光纤光学; 分段结构; 光纤传感器; 倏逝波; 激发模式; 光束传播法

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.1105006

Novel Segmented Structure Optic Fiber Evanescent Wave Sensor

Lou Jun Xu Hongzhi Huang Jie Li Benchong Shen Weimin

(Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract Based on evanescent wave absorbed theory, a segmented structure optic fiber sensor is proposed. The waveguide models of the segmented structure and straight are simulated and analyzed by using beam propagation method (BPM), which shows the high-order modes are excited repeatedly at the first transition of the each segmented region in the segmented structure. The effects of the different structures, core diameters and concentrations of solution on the sensitivity of the sensors are investigated, and the sensitivity is tested by using the different concentrations of the methylene blue solutions. The experimental results show that, with the fixed core diameters, the sensing region length of segmented structure sensors is 5 cm, which is shorter than that of the conventional single straight sensor 6 cm. However, the sensitivity of segmented structure sensors is 0.0135 L/mmol, which is higher than that of conventional single straight sensor 0.0102 L/mmol. The segmented structure evanescent wave sensor can effectively stimulate the fiber low-order modes to the high-order modes, and than the sensitivity is enhanced. The results are consistent with theoretical models and simulation analysis. The proposed sensor not only has a high sensitivity, but it is robust due to the larger core diameters and shorter length of the segmented region, which is suitable for materials spectrum measurements.

Key words fiber optics; segmented structure; optic fiber sensor; evanescent wave; excited modes; beam propagation method

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.2400; 230.7370

1 引言

光纤倏逝波传感器是 20 世纪 80 年代发展起来的传感技术,该传感器具有灵敏度高、结构简单、易制备、成本低、抗电磁干扰等优点。现已经成功地运

用到固体或者液体表面对一些有害物质的检测,该传感器能实现快速、实时实地、远程和安全的检测。因而在医学检测、环境水质、大气监测等领域^[1-12]受到广泛关注,成为当前研究的热点。目前,国内外

收稿日期: 2014-04-18; **收到修改稿日期:** 2014-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(61007051)、浙江省钱江人才项目基金(QJD1302016)、浙江省科技厅公益性计划项目(2011c23037)

作者简介: 楼俊(1979—),男,博士,副教授,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: loujun@cjlu.edu.cn

广泛研究的倏逝波传感器的结构主要有以下几种：直形传感光纤、D形传感光纤、锥形传感光纤、S形传感光纤、U形传感光纤。对于直形传感光纤^[13]结构简单,易制备,易操作,但目前的制作工艺制约了光纤传感区的长度和直径,限制了传感器的性能;D形^[14-15]结构和锥形^[16]结构传感光纤的灵敏度相对于直形传感光纤都有所提高;而S形^[17-18]和U形^[19]结构传感光纤的灵敏度与弯曲半径有关,弯曲半径越小,传感器的灵敏度越高,但弯曲半径越小,传感器越易被折断。

本文运用多模光纤(60 μm/125 μm)采用分段剥除腐蚀的方法制备分段结构光纤倏逝波传感器,通过理论分析,运用光束传播法(BPM)对分段和直形波导模型进行数值模拟,分析不同结构、纤芯直径和溶液浓度对传感器灵敏度的影响。采用宽带光谱光源和光纤光谱仪构建光谱分析检测系统,并用不同浓度的亚甲基蓝溶液对不同结构参数条件下倏逝

波传感器进行实验验证。实验结果表明,在传感直径相同的条件下,传感长度为5 cm的传统的单一的直形传感器的灵敏度低于传感长度为6 cm的传统的单一的直形传感器的灵敏度,而传感长度为5 cm分段结构光纤倏逝波传感器的灵敏度优于传感长度为6 cm的传统的单一的直形传感器的灵敏度。且实验结果与理论模型和数值模拟结果一致。

2 理论原理

光在光纤中传播是基于全反射原理,在全反射时有部分光波透过纤芯-包层界面进入到包层大约一个波长量级处,并沿着界面流过波长量级距离后重新返回纤芯,沿包层表面流动的光波称为倏逝波^[20]。分段结构光纤倏逝波传感器在传感区将溶液、气体等待测物质作为包层,待测物的吸收会使倏逝波能量衰减,可以通过检测传输能量及光谱的变化来得到待测物的相关信息。其结构原理如图1所示。

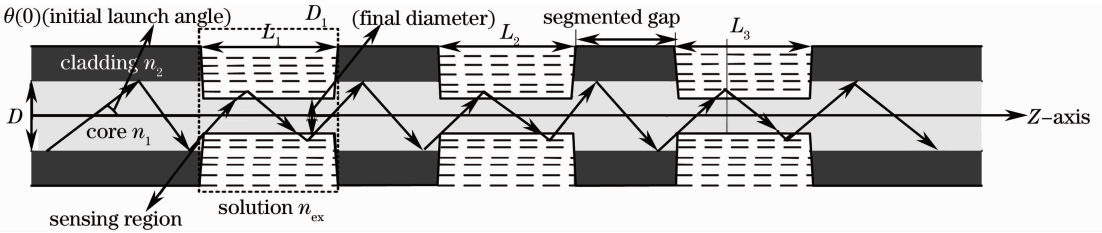


图1 分段结构光纤倏逝波传感器的结构图

Fig.1 Structure of the segmented optical fiber evanescent wave sensor

光纤本征吸收损耗后能量传输关系可以表示为^[21]

$$P_{out} = \sum_{j=1}^N r_j P_i \exp(-\alpha \eta_j L), \quad \alpha = \epsilon C / \lg e, \quad (1)$$

式中 P_{out} 为输出光功率, P_i 为入射光功率, r_j 是第 j 个模式中传播的能量占总能量的百分比, 在使用非相干光源时, 每个模式传播的能量占总能量的百分

比近似相等^[21], α 是被测物质的消光系数, ϵ 和 C 分别表示被测物质的摩尔吸收系数和摩尔浓度, η_j 是第 j 个模式中包层功率占总功率的百分比, $L = L_1 + L_2 + L_3$ 为传感长度。

对于多模光纤, η_j 可以表示为^[22]

$$\eta_j = \frac{\int_0^{\theta_u(z)} \int_0^{\pi/2} \frac{\lambda n_{ex} \sin^3 \theta \sin^2 \varphi}{\pi D_1 n_1^2 \sin^2 \theta_c (\sin^2 \theta_c - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi)^{1/2}} d\theta d\varphi}{\int_0^{\theta_u(z)} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta \sin^2 \varphi d\theta d\varphi}, \quad (2)$$

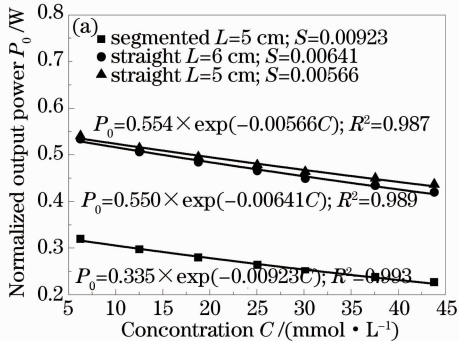
式中 λ 为入射的波长, n_1 为纤芯的折射率, n_{ex} 是溶液的折射率, 通常小于包层的折射率 n_2 , θ 为子午光线的入射角, φ 为斜光线的入射角, $\theta_c = \arccos(n_{ex}/n_1)$ 是纤芯与溶液临界角的补角, D_1 为分段区的直径. $\theta_u(z)$ 为子午光线的入射角的上限

$$\theta_u(z) = \arcsin\left(\frac{D}{D_1} \sin \theta_t\right), \quad (3)$$

式中 $\theta_t = \arccos(n_2/n_1)$ 是纤芯与包层临界角的补角, D 是光纤原始的纤芯的直径。如果光线以斜光线入射, 不同模式的包层功率占总功率的百分比会进一步增大, 传感器的灵敏度将会进一步提高^[22]。

由(1)式可以得出, 传感器的灵敏度 $S = -1/P_{out} (dP_{out}/dC)$ ^[19], 从而影响传感器灵敏度的参数有 α , η_j 和 L . α 由被测物本身的特征吸收谱线决

定,因而为固定值; L 越长,其物理强度越差,后续增加的单位长度的传感光纤对传感器灵敏度的贡献越来越小^[13]; η_j 是第 j 个模式的包层功率占总功率的百分比,传感器灵敏度与之密切相关。从(2)和(3)式可以推出,减小传感区的纤芯直径,不仅可以增大 η_j ,且光纤的入射角会随着传感区纤芯直径的减小而增大,从而增大倏逝波的透射深度,增强物质的吸收,使传感器的灵敏度得到进一步提高。由于光纤中高阶模在每次分段的第一个界面上被反复地激发,所以分段结构光纤倏逝波传感器能有效地激发光纤中低阶模到高阶模的转变,高阶模式的 η_j 比较大,从而有效增大 η_j ,提高传感器的灵敏度。当传感器的分段数增加时,纤芯中会有更多的高阶模式被激发,从而进一步提高传感器的灵敏度^[23]。



3 模拟与分析

采用 BeamPROP 模块的时域有限差分光束传播法(FD-BPM)算法,通过建立光纤传感器模型,设定初始参数,模拟出不同情况下光纤光场传输特点以及传输功率的情况。模拟参数设定:波导建模为三维(3D)模型,虚部折射率设定为 $0.00044C$,输出光功率为归一化输出功率。光纤为 $60 \mu\text{m}/125 \mu\text{m}$ 阶跃多模石英光纤,纤芯折射率为 1.4735 ,包层折射率为 1.4575 ,溶液折射率为 1.3333 ,入射波长为 632.8 nm ,直形传感长度 L 为 5 cm 和 6 cm ,分段传感长度 $L=2 \text{ cm}+1 \text{ cm}+2 \text{ cm}=5 \text{ cm}$,分段间距为 1 cm 。图 2 为模拟输出结果图。

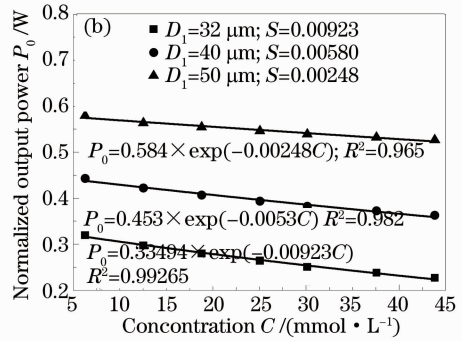


图 2 (a) 归一化输出光功率与不同结构溶液浓度关系曲线; (b) 归一化输出光功率与不同直径溶液浓度关系曲线

Fig. 2 (a) Relationship between P_0 and C with different structures; (b) relationship between P_0 and C with different core diameters

图 2(a)反映的是传感长度为 5 cm , 6 cm 和分段长度为 5 cm (即 $2 \text{ cm}+1 \text{ cm}+2 \text{ cm}$),在纤芯直径为 $32 \mu\text{m}$ 的条件下传感器的归一化输出光功率与摩尔浓度的关系曲线,从图中可以看出,分段结构的 P_0 远远小于直形的 P_0 ,传感器的灵敏度 $S = -1/P_0(dP_0/dC)$, P_0 越小,介质吸收的越多,传感器的灵敏度越高。从图 2(a)中可以得出:直形 $L=5 \text{ cm}$ 的传感器的灵敏度为 $0.0566 \text{ L}/\text{mmol}$,小于直形 $L=6 \text{ cm}$ 的传感器灵敏度为 $0.00641 \text{ L}/\text{mmol}$,而分段结构 $L=5 \text{ cm}$ 的传感器灵敏度为 $0.0923 \text{ L}/\text{mmol}$,远远优于直形 $L=6 \text{ cm}$ 传感器的灵敏度,由于光纤中高阶模在每次分段的第一个界面上被反复地激发,所以分段结构光纤倏逝波传感器能有效地激发光纤中低阶模到高阶模的转变,高阶模式的 η_j 比较大,从而有效增大 η_j ,提高传感器的灵敏度。图 2(b)反映的是分段 5 cm ($L=2 \text{ cm}+1 \text{ cm}+2 \text{ cm}$)在不同直径条件下传感器的归一化输

出光功率与摩尔浓度的关系曲线,从图中可以看出,传感区纤芯直径越小,传感器的灵敏度越高。减小传感区的纤芯直径,不仅可以增大 η_j ,且光纤的入射角会随着传感区纤芯直径的减小而增大,从而增大倏逝波的透射深度、增强物质的吸收,进而提高传感器的灵敏度。该模拟结果与理论结果相符。

4 实验和实验结果分析

4.1 实验系统

实验系统结构图如图 3 所示,卤钨灯(LS-1-LL, 6.5 W , 12 V , 波长: $360 \sim 2000 \text{ nm}$)光源发出的光经标准的光纤接头耦合进入多模光纤($60 \mu\text{m}/125 \mu\text{m}$, $n_1=1.4735$, $n_2=1.4575$)传输,光通过经过传感器后再由标准的光纤接头将传输光耦合到光纤光谱仪(海洋光学 USB4000)中,数据经电脑进行显示和存取。

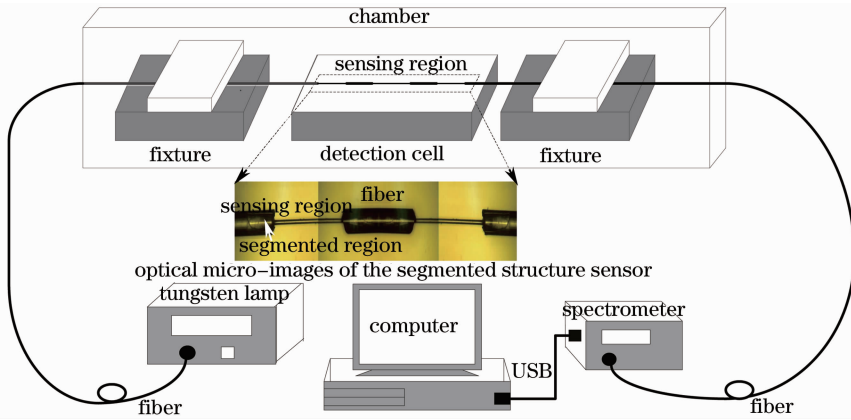


图 3 实验装置图和显微镜下传感器实物图

Fig. 3 Experimental setup and the optical microscopic images of the segmented structure sensor

4.2 传感器的制备

采用的传感器光纤为长飞 SI-60/125 的阶跃型多模石英光纤,包层折射率为 1.4575,芯层折射率为 1.4735。采用分段剥除腐蚀的方法分别制备直形和分段数为三段光纤倏逝波传感器。具体工艺流程为:1) 使用游标卡尺测量每段的长度,(直形传感器分别测量两段,即 5 cm 和 6 cm;分段传感器间隔测量两段 2 cm 和一段 1 cm,间隔长度为 1 cm),用笔记好每段的长度;2) 使用光纤剥线钳剥去分段光纤的涂覆层;3) 使用光纤熔接机(日本藤仓公司 F60S)将传感器熔接到带有标准 SMA905 接头(接宽带光源和光谱仪)的光纤跳线;4) 将传感器放在密闭的腐蚀池中,腐蚀池放在升降台上,两端分别有固定光纤的夹具,通过输出光功率的变化和时间来监测传感器的腐蚀进度,图 4 为传感器腐蚀深度监测图。

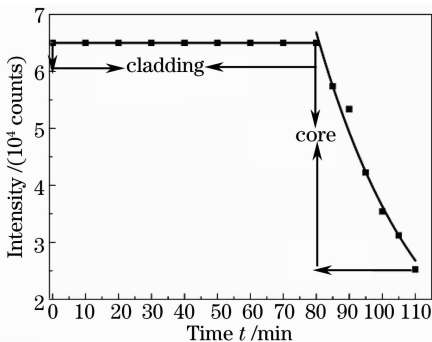


图 4 腐蚀深度监测图

Fig. 4 Corrosion depth monitoring graph

由图 4 可以看出腐蚀约 82 min 时,光源的输出光功率突然减小并以 e 指数的形式衰减,此时可以确定腐蚀到光纤的纤芯;实验中按照具体要求,确定腐蚀时间和光功率的变化,制备出所要特定参数的光纤倏逝波传感器。其中实验用光纤包层腐蚀液主

要成分为 HF(体积分数为 30%), NH_4F (分析纯), H_2O (去离子),三者体积比分别为 1:2:3,在室温(25 °C)条件下腐蚀液的平均腐蚀速度约为 $0.88 \mu\text{m}/\text{min}$ 。

4.3 实验方法及结果分析

通过化学剥除腐蚀的方法^[24]可以制备出多根不同参数和结构光纤倏逝波传感器;配制亚甲基蓝溶液摩尔浓度分别为 6.26~43.82 mmol/L,将传感器首先侵入去离子水中采样并记录参考光谱,用吸管吸干去离子水注入不同浓度的亚甲基蓝溶液,采样并记录不同浓度的亚甲基蓝的吸收光谱。图 5 为去离子水的参考光谱和亚甲基蓝溶液的吸收光谱。

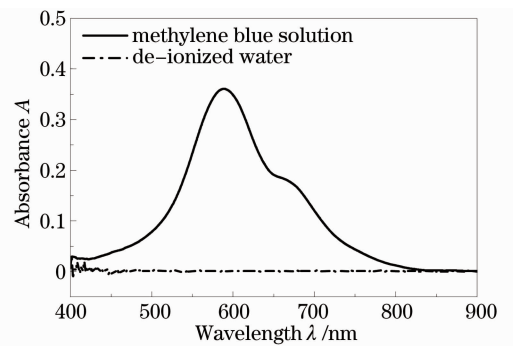


图 5 溶液的参考光谱与吸收光谱图

Fig. 5 De-ionized water reference spectrum and the absorbance of methylene blue solution

不同浓度、相同直径的分段结构传感器实验上测得的吸收光谱如图 6(a)所示,图 6(b)为相同直径、不同结构和传感长度下亚甲基蓝溶液的浓度与吸光度的拟合曲线图。

由图 6(a)可以看出亚甲基蓝溶液的吸收峰在波长 588 nm 和 664 nm 处有强吸收,且吸光度 A 随着溶液浓度的增加而增大;从图 6(b)可以看出,对于纤芯直径 $D_1 = 32 \mu\text{m}$,直形传感长度 $L = 6 \text{ cm}$

($S=0.0102\text{ L}/\text{mmol}$)的传感器的灵敏度优于 $L=5\text{ cm}$ 的灵敏度($S=0.00756\text{ L}/\text{mmol}$),而小于分段结构传感长度 $L=5\text{ cm}$ 的传感器的灵敏度($S=0.0135\text{ L}/\text{mmol}$),当传感器的传感长度增加到一定范围时,会使后续增加的传感光纤对传感器灵敏度的贡献越来越小^[13]。而分段结构光纤倏逝波传感器每段传感长度较短时,可以充分提高传感器的灵

敏度,且光纤中高阶模在每次分段的第一个界面上被反复地激发,所以分段结构光纤倏逝波传感器能有效地激发光纤中低阶模到高阶模的转变,由于高阶模式的 η_j 比较大,所以有效增大 η_j ,提高传感器的灵敏度^[23]。实验中分段结构传感器灵敏度优于直形传感器的灵敏度,这点与理论模拟结果相符。

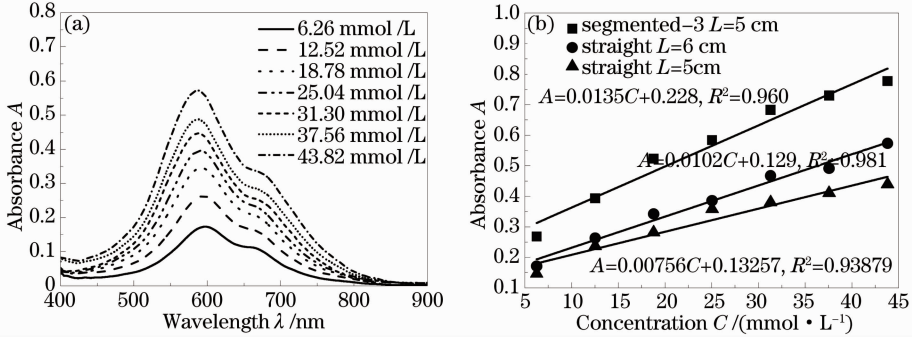


图 6 (a) 分段结构不同浓度对应吸光度的光谱图; (b) 不同结构和传感长度对应浓度与吸光度的关系曲线
Fig. 6 (a) Methylene blue solution absorbance under different concentrations for segmented structure; (b) relationship between A and C with different structures and sensing lengths

图 7(a)为分段结构传感长度为 5 cm,溶液浓度为 25.04 mmol/L 的不同直径传感器的光谱图,传感器的吸光度随着纤芯直径的减小而增大,纤芯直径越小,吸光度越大,灵敏度越高。从图 7(b)可以看出,分段结构光纤倏逝波传感器的灵敏度随着纤芯直径的减小而增大,从(2)和(3)式可以推出,减小传感区的纤芯直径,不仅可以增大 η_j ,且光纤的入射角会随着传感区纤芯直径的减小而增大,从而增大倏逝波的透射深度,增强物质的吸收,使传感器的灵

敏度得到进一步提高;实验结果与模拟结果一致。由图 6(b)和图 7(b)可以看出,在传感长度(5 cm)相同的情况下,分段结构纤芯直径为 51 μm 的传感器的灵敏度是 0.0103 L/mmol,优于直形纤芯直径为 32 μm 的传感器的灵敏度 0.00756 L/mmol。因此,分段结构光纤倏逝波传感器相对于传统的单一的直形光纤倏逝波传感器不仅具有较高的灵敏度,且具有较大的机械强度。

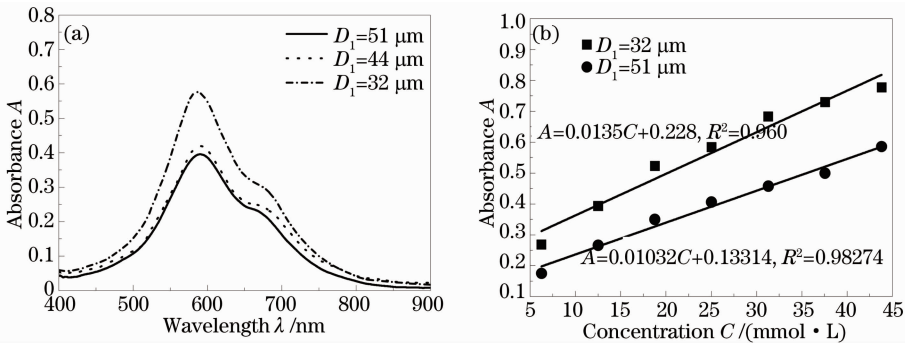


图 7 (a) 分段结构不同直径对应的吸光度的光谱图; (b) 分段结构不同直径对应浓度与吸光度的关系曲线
Fig. 7 (a) Absorbance under different core diameters for segmented structure; (b) relationship between A and C with different core diameters

5 结 论

针对传统光纤倏逝波传感器的不足,设计了一种分段结构光纤倏逝波传感器,通过化学腐蚀方法

制备出不同结构参数的光纤倏逝波传感器,并进行详细的实验验证,实验结果和模拟及分析结果相符。实验结果表明,传感长度为 5 cm 分段结构光纤倏逝波传感器的灵敏度为 0.0135 L/mmol,优于传感长

度为 6 cm 的传统的单一的直形传感器的灵敏度 0.0102 L/mmol;且纤芯直径越小,分段数越多,纤芯中传播的高阶模越多,包层功率占有率越大,其灵敏度越高。实验证明该传感器相对于传统的单一的直形光纤倏逝波传感器不仅具有更好的机械强度,且灵敏度有较大的提高,从而可以很好地克服传统的单一的直形光纤倏逝波传感器因纤芯较细、传感器易折断、寿命短等缺点,使其在液体、气体探测监测领域具有广泛的应用前景。

另外实验还表明:1)光纤表面腐蚀的不均匀会对实验结果造成影响;2)在实际测量光谱存在模式间干涉和噪声干扰,这与分段数、传感器表面的均匀程度、环境(温度、湿度)等有关,会对传感器输出稳定性有负面影响;3)分段结构光纤倏逝波传感器灵敏度的提高,部分程度上改变了传感器检测范围,对检测系统设备性能(尤其光源和光谱仪)提出了更高的要求。为此,可考虑在合理有效分段和合适环境的基础上采用大功率的宽带光源和高分辨率、高带宽的光谱仪,进一步优化工艺并改进光谱信号处理过程等措施。

参 考 文 献

- 1 Raikar U S, Kulkarni V K, Lalasangi A S, *et al.*. Evanescent field absorption sensor for detection of copper (II) in water using multimode optical fiber[J]. *Optoelectronics Letters*, 2009, 5(3): 224-226.
- 2 Liao Guozhen, Zhang Jun, Cai Xiang, *et al.*. All-fiber temperature sensor based on graphene[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706004.
廖国珍, 张 军, 蔡 祥, 等. 基于石墨烯的全光纤温度传感器的研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706004.
- 3 Bai Chunhe, Luo Yunhan, Chen Zhe, *et al.*. Characteristics of side-polished fiber in refractive index sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 42(10): 1182-1186.
白春河, 罗云瀚, 陈 哲, 等. 基于侧边抛磨光纤倏逝场的折射率传感特性[J]. *光子学报*, 2013, 42(10): 1182-1186.
- 4 Xiong Y, Zhu D, Duan C, *et al.*. Small-volume fiber-optic evanescent-wave absorption sensor for nitrite determination[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2010, 396(2): 943-948.
- 5 Cao Y, Jin W, Ho L H, *et al.*. Evanescent-wave photoacoustic spectroscopy with optical micro/nano fibers[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(2): 214-216.
- 6 Chu Fenghong, Wang Jiyuan. Glucose evanescence absorption sensor by using plastic optical fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0505002.
初凤红, 王计元. 基于倏逝波吸收的塑料光纤葡萄糖传感特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0505002.
- 7 Lu P, Harris J, Wang X, *et al.*. Tapered-fiber-based refractive index sensor at an air/solution interface[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(30): 7368-7373.
- 8 Li Ying, Hu Yanjun. Position designated delivery of

- microparticles using a submicron fiber decorated with gold nanorods[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(7): 070602.
- 李 英, 胡艳军. 用金纳米棒修饰的亚微米光纤定点输送微颗粒的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(7): 070602.
- 9 Chen Yaofei, Han Qun, He Yang, *et al.*. Study of single mode-multimode-single mode refractive index sensor based on no core fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0905001.
陈耀飞, 韩 群, 何 洋, 等. 基于无芯光纤的单模-多模-单模折射率传感器的研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0905001.
- 10 Scorsone E, Christie S, Persaud K C, *et al.*. Fibre-optic evanescent sensing of gaseous ammonia with two forms of a new near-infrared dye in comparison to phenol red[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2003, 90(1-3): 37-45.
- 11 Maraldo D, Shankar P M, Mutharasan R. Measuring bacterial growth by tapered fiber and changes in evanescent field[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2006, 21(7): 1339-1344.
- 12 Wang Zhenzhen, Zhou Jingtao, Wang Chunxia, *et al.*. Measurement of phosphate anion based on optical fiber evanescent wave sensor[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(11): 1683-1687.
王真真, 周静涛, 王春霞, 等. 基于光纤倏逝波传感器的磷酸根离子检测[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(11): 1683-1687.
- 13 Wu Y, Deng X, Li F, *et al.*. Less-mode optic fiber evanescent wave absorbing sensor: Parameter design for high sensitivity liquid detection[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, 122(1): 127-133.
- 14 Zhuang Xuye, Wu Yihui, Wang Shurong, *et al.*. Optical fiber evanescent field sensor based on new type D-shaped fiber[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(10): 1936-1940.
庄须叶, 吴一辉, 王淑荣, 等. 新结构 D 形光纤倏逝场传感器[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10): 1936-1940.
- 15 Markos D J, Ipson B L, Smith K H, *et al.*. Controlled core removal from a D-shaped optical fiber[J]. *Appl Opt*, 2003, 42(36): 7121-7125.
- 16 Villatoro J, Monzón-Hernández D, Luna-Moreno D. In-line optical fiber sensors based on cladded multimode tapered fibers[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(32): 5933-5938.
- 17 Matějč V, Chomat M, Pospíšilová M, *et al.*. Optical fiber with novel geometry for evanescent-wave sensing[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1995, 29(1): 416-422.
- 18 Matějč V, Chomat M, Hayer M, *et al.*. Improvement of the sectorial fiber for evanescent-wave sensing[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1997, 39(1): 334-338.
- 19 Gupta B D, Dodeja H, Tomar A K. Fibre-optic evanescent field absorption sensor based on a U-shaped probe[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1996, 28(11): 1629-1639.
- 20 A N Chester. *Optical Fiber Sensors*[M]. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1987.
- 21 Gloge D. Weakly guiding fibers[J]. *Appl Opt*, 1971, 10(10): 2252-2258.
- 22 Grazia A, Riccardo M, Ciaccheri F L. Evanescent wave absorption spectroscopy by means of bi-tapered multimode optical fibers[J]. *Appl Spectro*, 1998, 52(4): 546-551.
- 23 Ruddy V, Shaw G. Mode coupling in large-diameter polymer-clad silica fibers[J]. *Appl Opt*, 1995, 34(6): 1003-1006.
- 24 Jiao L Z, Dong D M, Zheng W G, *et al.*. Research on fiber-optic etching method for evanescent wave sensors[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(8): 740-743.

栏目编辑:王晓琰