

# 基于微加工工艺的光纤消逝场传感器 及其长度特性研究<sup>\*</sup>

庄须叶<sup>1)†</sup> 吴一辉<sup>1)†</sup> 王淑荣<sup>1)</sup> 张平<sup>1)</sup> 刘永顺<sup>1)</sup>

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, 长春 130033)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2008 年 3 月 30 日收到, 2008 年 6 月 23 日收到修改稿)

用硅光刻工艺和二氧化硅湿法腐蚀工艺制作了针状封装结构的光纤消逝场传感器. 该结构的传感器体积小、试剂消耗量少, 减轻了测量过程中光纤的变形, 密封的结构可以有效地防止传感器受到污染. 从理论和实验角度研究了不同长度的光纤消逝场传感器的测量结果, 分析了传感光纤长度对传感器吸光度的影响, 指出随着传感器传感光纤长度的继续增加, 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.

关键词: 硅光刻工艺, 针状封装, 光纤消逝场传感器, 传感光纤长度

PACC: 4281P, 0710, 4281D

## 1. 引言

光纤消逝场传感器与传统的传感器相比有成本低、灵敏度高、耐酸碱腐蚀、抗电磁干扰能力强等优点. 近几十年来得到了广泛的关注, 在环境监测、医疗卫生防疫、化学化工等行业有着广泛的应用<sup>[1-4]</sup>.

2007 年本实验室提出了少模光纤消逝场传感器的设计和制作方法<sup>[5]</sup>, 讨论了传感器主要参数如光纤直径、折射率、光线入射角等对其灵敏度的影响. 理论上, 光纤消逝场传感器的灵敏度会随其传感区直径的减小和传感光纤长度的增加而提高. 然而, 在实际制作过程中, 由于光纤传感区表面的光洁度并非很高, 特别是用化学腐蚀方法制作的表面粗糙度差, 很难达到常规的光学抛光程度. 同时, 在实际应用过程中人们发现, 现有的制作工艺条件约束了光纤传感区的长度, 且理论分析也表明随着传感长度的增加, 其后续增加的单位长度的传感光纤对传感器灵敏度的贡献也越来越小.

湿法腐蚀制作的消逝场传感光纤极细, 通常小于  $10\ \mu\text{m}$ , 强度小且易碎. 当传感器在一个开放的环境中使用时, 易受污染, 影响其测量结果, 会导致误差的产生.

本文在前期研究工作的基础上对传感器进行了针状封装优化, 提高了传感器的强度, 密闭的环境可以保护传感光纤不受灰尘等污染物的污染. 把理论计算结果和试验结果进行了比较, 分析了光纤传感长度对消逝场光纤传感器各性能的影响.

## 2. 基本理论

光在光纤中传播时, 因全反射会在光纤芯层和包层的边界上产生一个渗透到包层中的能量场, 能量在光纤包层中随距界面距离的增加而呈指数衰减, 该场称为消逝场<sup>[6]</sup>(图 1). 由于光纤的包层为非吸收介质, 不会引起光纤中传输能量的减少. 当去除包层, 以被测物质作为包层时, 消逝场会与被测物质发生作用引起能量的吸收, 表现为光纤输出光强的减少. 通过观察光纤输出光强的大小就可以反推出被测物溶液浓度的大小, 这就是消逝场光纤传感器的传感原理.

光纤消逝场场强可以表示为

$$E = E_0 \exp(-z/d_p), \quad (1)$$

其中  $E_0$  是消逝场在界面处的能量强度,  $z$  是场点距光纤包层和芯层界面的距离,  $d_p$  是消逝场的穿透深

<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划(批准号 2006AA04Z358)和国家自然科学基金(批准号 60574089)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn

度,定义为当能量场的强度下降到 $\frac{1}{e} E_0$ 时,场点到界面的距离.穿透深度 $d_p$ 的表达式如下:

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_{co}^2 \sin^2 \theta - n_{cl}^2}}, \quad (2)$$

其中 $\lambda$ 是光在真空中传播时的波长, $n_{co}$ 为光纤纤芯的折射率, $n_{cl}$ 为光纤包层的折射率(在光纤消逝场传感器中 $n_{cl}$ 表示为被测物溶液的折射率), $\theta$ 为光线的入射角.

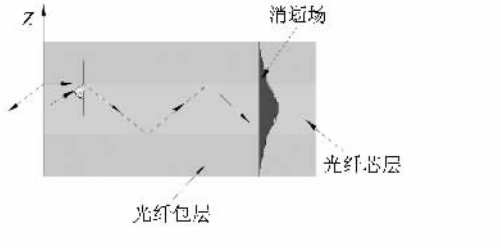


图 1 消逝场示意图

消逝场的穿透深度越大,被测物与消逝场的作用范围就越广,引起的能量损耗就越多,传感器的灵敏度相应就越高.

根据朗贝尔定律<sup>[4]</sup>,有

$$P_{out} = \sum_{j=1}^N \eta_j P_{in} \exp(-r_{fj} \alpha L). \quad (3)$$

这里 $P_{out}$ 为传感器的输出光强; $P_{in}$ 为传感器以非吸收介质作为包层时的输入光强这里作为传感器的输入光强; $\eta_j$ 为第 $j$ 个模式中传播的能量占总能量的比例; $\alpha$ 为被测物质的消光系数,表示为

$$\alpha = \frac{\epsilon c}{l g e}, \quad (4)$$

其中 $\epsilon, c$ 分别表示被测物质的摩尔吸收系数和浓度; $N$ 为光纤中光传播模式的数目,有

$$N = 4 \times V^2 / \pi^2, \quad (5)$$

其中

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2}$$

是光纤的归一化频率; $r_{fj}$ 为第 $j$ 个模式中包层功率占总功率的百分比,当归一化频率 $V > 20$ 时,可近似表示为<sup>[7]</sup>

$$r_{fj} = \frac{j}{N(2N - 2j)^2}. \quad (6)$$

吸光度 $A$ 可表示为

$$A = -\lg\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)$$

$$= -\lg\left(\sum_{j=1}^N \eta_j \exp(-r_{fj} \alpha L)\right). \quad (7)$$

光在光纤中传播,各模式经连续耦合,每个模式传播的能量占总能量的比例可以用平均分配近似代替<sup>[8]</sup>.因此,有

$$\eta_j \approx 1/N. \quad (8)$$

则(7)式可以简化为

$$A = -\lg\left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \exp(-\alpha r_{fj} l)\right). \quad (9)$$

当标准化频率 $V > 20$ 时(9)式可以写为

$$A = -\lg\left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \exp\left(-\alpha \frac{j}{N(2N - 2j)^2} l\right)\right). \quad (10)$$

由(10)式就可以从理论上推算出消逝场光纤传感器所能达到的灵敏度.

光纤消逝场传感器中消逝场的能量可以用光纤包层中传播的能量 $P_{cl}$ 表示, $P_{cl}$ 与芯层中传播的能量 $P_{co}$ 保持比例 $\frac{P_{cl}}{P_{cl} + P_{co}} = r_f$ .能量在光纤传感器中传播时,光纤传感区内任一截面上的 $r_f$ 始终保持不变.为研究传感器的灵敏度与光纤长度的关系,做如下假设:被测量吸收介质在单位长度内将包层中的能量 $P_{cl}$ 全部吸收,然后芯层 $P_{co}$ 再向包层 $P_{cl}$ 重新提供能量,维持二者的比例关系 $r_f$ 不变.

根据实验所用光纤的参数计算出第120模式和第200模式的包层能量占有率分别为 $r_{f_{120}} = 0.0643$ , $r_{f_{200}} = 0.1104$ .假设入射到两种模式中的能量各为1 W,且透漏到包层中的能量全部被吸收,则在14 mm长度的传感光纤内,包层能量的分布如图2所示.由图2可见,在14 mm处第120模式和第200模式的包层能量分别只有初始处的39.50%和19.47%,单位长度的传感光纤对传感器吸光度的贡

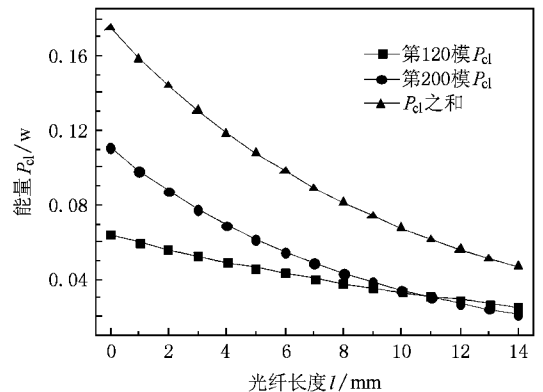


图 2 包层能量与光纤位置的关系

献随长度的增加越来越小,并逐渐趋于一个很小的常量.因此,光纤消逝场传感器传感光纤的长度没有必要很长.

另一个限定光纤消逝场传感长度的重要因素是实验工艺条件.在一定的工艺条件下,传感光纤长度越长越难加工.

考虑以上两点,实验中传感光纤最大长度取为 14 mm.

### 3. 光纤消逝场传感器的制备

传感器光纤为康宁 SMF-28e 型单模光纤,外径 125  $\mu\text{m}$ ,芯径 8.2  $\mu\text{m}$ ,涂层直径 245  $\mu\text{m}$ ,包层折射率为 1.4646,芯层折射率为 1.4682.为改进传感器的性能采用了针状封装结构,如图 3 所示.

样品池宽 1 mm,长 20 mm,包括顶盖和池底两部分.顶盖上有进液孔两个,是被测样品进入样品池和废液排出样品池的通道.池底包括光纤槽、进液区、导流区、样品区以及托台.光纤槽长 2.5 mm,宽 250  $\mu\text{m}$ ,深 150  $\mu\text{m}$ ,用作固定光纤.进液区是样品进入和排出样品区的通道.导流区具有传导液体进入样品区的作用.托台中间开一条宽 140  $\mu\text{m}$ ,深 100  $\mu\text{m}$ 的槽,与光纤槽有 50  $\mu\text{m}$ 的深度差,可以消除固定光纤时因涂敷层厚度引起的光纤翘起变形,槽宽起到约束光纤左右弯曲变形的作用.因消逝场的穿透深度只有入射光一个波长的数量级大小(实验所用光源波长为 632.58 nm),故样品区宽度取 200  $\mu\text{m}$ ,深 150  $\mu\text{m}$ ,这样既保证了消逝场可以充分与被测物质作用,又减少了试剂用量,当样品区长度为 7 mm 时,试剂消耗量为 0.21  $\mu\text{L}$ .

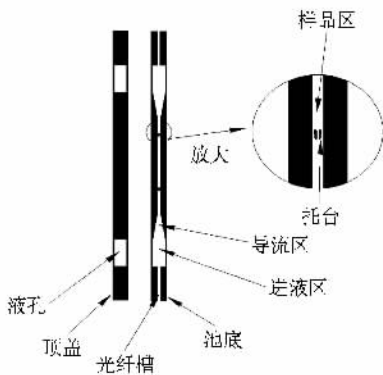


图 3 消逝场光纤传感器针状结构封装图

消逝场传感器样品池的制作采用硅光刻腐蚀技术.制好的消逝场光纤传感器如图 4 所示.

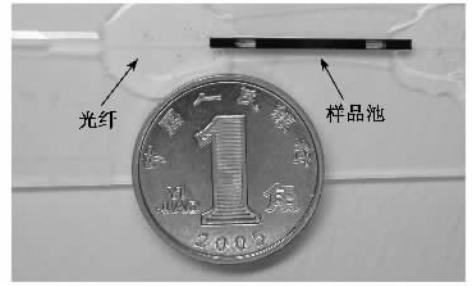
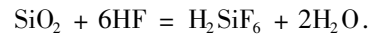
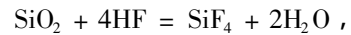


图 4 消逝场光纤传感器的结构

光纤包层腐蚀液中氢氟酸、醋酸、去离子水三者体积之比是 1:5:15.醋酸在腐蚀液中起氢离子提供者的作用,可以使腐蚀过程保持平稳,提高传感光纤的表面质量.反应方程式为



### 4. 试验及结果分析

#### 4.1. 系统的搭建

为消除光源噪声的影响,系统使用双光路,其结构如图 5 所示.

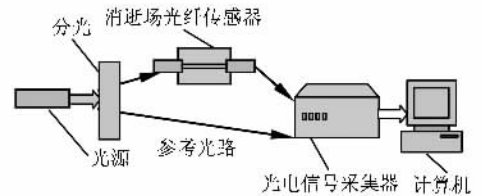


图 5 实验系统结构示意图

光源采用氦氖激光器,出射波长为 632.8 nm,分光后经一个数值孔径为 0.25 的显微镜物镜耦合进入传感器中.测量物质为亚甲基蓝溶液,传感光纤的长度分别取为 4, 7, 14 mm,芯径 8  $\mu\text{m}$ .光电信号采集器为实验室自制的硅光电池光电信号转换器和安杰伦 34970A 型信号采集器.

#### 4.2. 实验结果

实验结果和理论计算值的比较如图 6 所示.从图 6 可以看出,理论计算和实验结果存在偏差,实验值比计算值偏高.对此解释如下:实验中通过光电信号采集器得到的光强信号为表观光强,进而得到的吸光度也为表观吸光度  $A'$ .当光在传感器中传播时,光强除了因消逝场与外界物质作用引起的有效

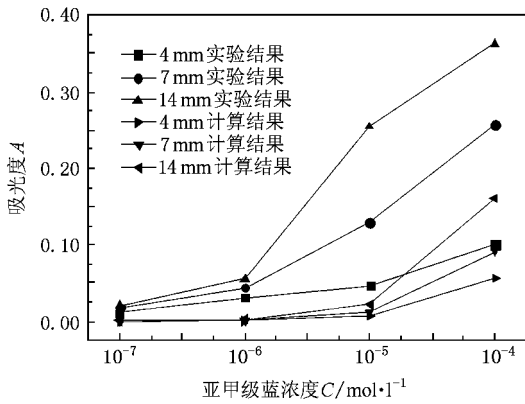


图6 传感光纤长度分别为4, 7和14 mm时传感器吸光度的理论值和实验值比较

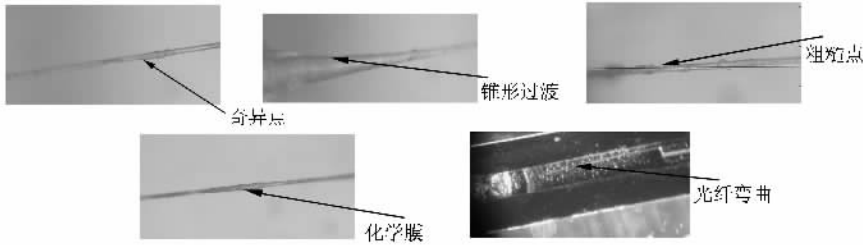


图7 光纤消逝场传感器中可能存在的缺陷

引起计算值与实验值存在偏差的另一个重要因素是亚甲基蓝分子在极性光纤表面的吸附作用. 光纤表面高浓度的 $\text{-OH}^-$ 离子会导致其上附着一层高浓度的亚甲基蓝分子, 因此引起消逝场能量吸收的增大, 提高了传感器的灵敏度<sup>[10]</sup>. 这部分能量的吸收是有效吸收, 既提高了传感器的实际灵敏度, 也引起了理论计算结果和实验值的偏差.

在理论计算中用到的许多近似假设, 也会导致理论计算和实验结果存在偏差.

由图8可以看出, 在低浓度时 $A'$ 与 $A$ 的差别较大, 在高浓度时较小. 亚甲基蓝浓度很低时 $P_{\text{eff}}$ 值较小, 在获得 $A'$ 时,  $P_{\text{nio}}$ 相对占有相当大的比重, 直接造成 $A'$ 与 $A$ 有很大差别. 另外, 因亚甲基蓝分子在光纤表面的富集而引起的吸光度在低浓度时相对较大, 也会导致理论计算值与实验值之间产生偏差. 高浓度时 $P_{\text{eff}}$ 较高,  $P_{\text{nio}}$ 的影响相对较小, 这种情况下,  $A'$ 与 $A$ 的符合程度高. 同一浓度下, 短光纤较长光纤的 $A'$ 与 $A$ 的值差别较大, 原因也可归结为 $P_{\text{eff}}$ 在长光纤时比 $P_{\text{nio}}$ 相对较大, 短光纤时相对较小.

吸收 $P_{\text{eff}}$ 外, 传感器还会因制作过程中产生的种种缺陷而产生非有效吸收 $P_{\text{nio}}$ . 因此, 表观吸光度 $A'$ 可以表示为

$$A' = -\lg \frac{P_{\text{in}} - P_{\text{eff}} - P_{\text{nio}}}{P_{\text{in}}} \quad (11)$$

$A'$ 与 $A$ 的关系取决于 $P_{\text{nio}}$ , 当 $P_{\text{nio}} \ll P_{\text{eff}}$ 时,  $A' \approx A$ , 实际中 $P_{\text{nio}}$ 的存在会导致 $A' > A$ .

光纤制作中可能存在的缺陷如图7所示, 各种缺陷都会造成非有效吸收的产生, 其中奇异点和粗糙点产生散射损耗, 化学膜会引起消逝场能量的吸收<sup>[9]</sup>, 锥形过渡和光纤的弯曲变形会造成光纤内部模式的不匹配引起模式泄漏. 而且, 传感器传输部分的归一化频率比传感部分的归一化频率小, 导致部分高阶模在从传感区到传输区的过渡中被截止.

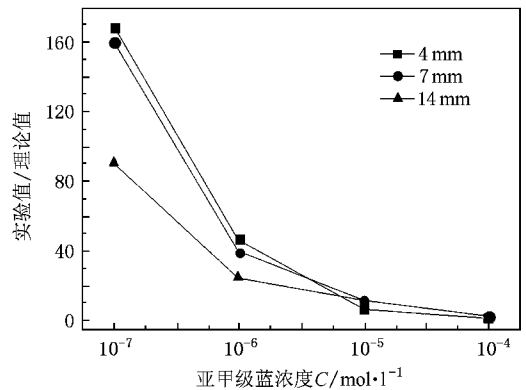


图8 不同传感长度的传感器吸光度的理论值与实验值随亚甲基蓝浓度的偏离关系

亚甲基蓝浓度为 $1 \times 10^{-6}$  mol/l时, 不同长度传感光纤的传感器吸光度的理论计算值、实验值以及Ruddy等<sup>[10]</sup>获得的结果如表1所列. 由表1可见, 实验值与理论值的比例关系较文献10的结果小一个数量级, 理论值与实验值的符合程度较文献10的结果要好很多.

表 1 亚甲基蓝浓度为  $1 \times 10^{-6}$  mol/L 时所得传感器的吸光度与文献 [10] 结果的比较

光纤长度	实验值	理论值	实验值/理论值
4 mm	0.0303	0.0006	47.11
7 mm	0.0440	0.0011	40.00
14 mm	0.0577	0.0022	26.23
文献 [10] 结果	0.2000	0.0010	200.00

因光纤消逝场传感器制作过程中的种种缺陷以及测量物质在光纤表面吸附现象的存在,都会造成理论值与实验值的偏差.这就需要改进传感器的制作工艺,提高传感光纤的质量,另一方面也要根据现有的工艺条件,设定合理的修正参数对理论结果进行适当的修正.

当亚甲基蓝的浓度为  $1 \times 10^{-4}$  mol/l 时,把传感光纤的长度从 7 mm 增加到 14 mm,长度是原来的两倍,而吸光度在理论上应是原来的 1.76 倍,实验中

却只是原来的 1.41 倍.这说明随着传感光纤长度的继续增加,后续增加的单位长度传感光纤对光纤消逝场传感器灵敏度的贡献也越来越小.

## 4. 结 论

本文用硅光刻工艺和二氧化硅湿法腐蚀工艺制作了针状封装结构的光纤消逝场传感器.该结构减小了样品池的体积,提高了光纤消逝场传感器的强度,减少了试剂用量,密封的结构有效避免了消逝场传感光纤受到外界污染.

通过用理论和实验相结合的方法研究了不同长度的光纤消逝场传感器的性能,分析了其对测量结果的影响.研究发现,随着传感光纤长度的继续增加,后续增加的单位长度对传感器吸光度的贡献越来越小.

- [ 1 ] Leung A , Shankar P M , Mutharasan R 2007 *Sensors Actuat . B* **125** 688
- [ 2 ] Ferreira A P , Wernick M M 2001 *Biosensor Bioelectron .* **16** 399
- [ 3 ] Lisa C S , Kristen A B , Paul T C , David W C , Joel P G , Frances S L 1995 *Anal . Chem .* **67** 2431
- [ 4 ] Guo W G , Yan X F , Luo S J , Li Y N , Tu C H , Li F Y , Wang H J , Li E B , Lü C 2007 *Acta Phys . Sin .* **56** 308 ( in Chinese ) [ 郭文刚、杨秀峰、罗绍均、李勇男、涂成厚、吕福云、王宏杰、李恩邦、吕超 2007 物理学报 **56** 308 ]
- [ 5 ] Wu Y H , Deng X H , Li F , Zhuang X Y 2007 *Sensor Actuat . B* **122**

127

- [ 6 ] Culshaw B , Dakin J 1997 *Optical Fiber Sensors* ( Wuhan : Huazhong University of Science and Technology Press ) p200 ( in Chinese ) [ Culshaw B , Dakin J 1997 光纤传感器( 中译本 ) 武汉:华中理工大学出版社 第 200 页 ]
- [ 7 ] Gloged D 1971 *Appl . Opt .* **10** 2252
- [ 8 ] Payne F P , Hale Z M 1993 *Int . J . Optoelectron .* **8** 743
- [ 9 ] Radislav A P , Steven E H , Gary M H 1998 *Anal . Chem .* **70** 1639
- [ 10 ] Ruddy V , Maccraith B D , Murphy J A 1990 *J . Appl . Phys .* **67** 6070

# Research on the fiber-optic evanescent field sensor based on microfabrication and the effect of fiber length on its properties<sup>\*</sup>

Zhuang Xu-Ye<sup>1,2)</sup> Wu Yi-Hui<sup>1)†</sup> Wang Shu-Rong<sup>1)</sup> Zhang Ping<sup>1)</sup> Liu Yong-Shun<sup>1)</sup>

<sup>1</sup> *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*

<sup>2</sup> *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

( Received 30 March 2008 ; revised manuscript received 23 June 2008 )

## Abstract

Evanescent wave fiber-optic sensors ( EWFS ) with acicular encapsulation were fabricated using silicon photolithography technology and silica wet-etching technology. This type of EWFS is small in size , consumes little reagent , suffers less from deformation during the detection process and also protects the sensors from pollution. The results obtained from the EWFS with different sensing fiber lengths were studied. The effect of the fiber length on the sensor's absorbance were analyzed theoretically and experimentally. It was shown that the properties of the EWFS could be improved greatly by choosing suitable length of the sensing fiber , and the contribution of unit length of sensing fiber to the absorbance becomes less as the sensor's total length becomes longer.

**Keywords :** silicon photolithography , acicular encapsulation , evanescent wave fiber-optic sensor , sensing fiber length

**PACC :** 4281P , 0710 , 4281D

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China ( Grant No. 2006AA04Z358 ) and the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60574089 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : yihuiwu@ciomp.ac.cn