

doi: 10.3788/gzxb20144302.0206007

# 基于光纤腔衰荡技术的液体挥发过程监测法

江维, 姜亚军, 姜碧强, 秦川, 赵建林

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

**摘 要:**提出一种基于光纤腔衰荡系统并以一小段包层腐蚀光纤作为传感头的液体挥发测量方法,同时搭建相应的实验装置进行了实验研究.从模式理论出发分析单模光纤传输模场的能量分布,并采用有限元法数值模拟光纤端面能量的分布,结果表明:包层越细的单模光纤对应越大的消光系数,即泄露出来的倏逝波能量越大,从而对外界环境更敏感,但是较细包层的单模光纤存在的损耗更大.综合分析得出腐蚀光纤的最佳直径应为  $26\ \mu\text{m}$ ,最佳腐蚀长度为  $1\ \text{cm}$ .通过实时监测衰荡谱的衰荡时间变化,得到了  $30\ ^\circ\text{C}$  恒温环境下,乙醇与丙三醇混合溶液中乙醇浓度随挥发时间的变化曲线.实验结果表明,混合溶液中乙醇的浓度随挥发时间呈单指数规律衰减,该变化规律与理论分析相符.由于液体浓度与其折射率成正比,随着乙醇的挥发,混合溶液的折射率逐渐接近光纤包层的折射率,使其对腐蚀光纤纤芯中泄漏的倏逝波能量的吸收程度逐渐增大,环腔的衰荡时间也相应逐渐减小.此外,该监测方法在常温下具有较低的温度交叉敏感性.

**关键词:**光纤环腔衰荡技术;腐蚀光纤;倏逝波;液体挥发

中图分类号:O433

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)02-0206007-7

## Measurement of Liquid Volatilization Based on Fiber Loop Ring-down Technique

JIANG Wei, JIANG Ya-jun, JIANG Bi-qiang, QIN Chuan, ZHAO Jian-lin

(Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education;  
Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science,  
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A method for measuring liquid volatilization by using fiber loop ring-down technique incorporating an etched fiber was analyzed and experimentally demonstrated. The transmissivity of the single mode fiber were deduced according to the coupled-mode theory; the energy distribution over the cross section of the fiber was numerically analyzed by using the finite element method. The results showed that, thinner the diameter of the single mode fiber, larger would be the extinction coefficient, thus leading to more energy loss in the fiber core. The etched fiber with length of  $1\ \text{cm}$  and diameter of  $26\ \mu\text{m}$  was chosen through analyzing. Through the relationship between ring-down time and concentration of ethanol, the changement of ethanol's concentration in ethanol-glycerol solution was obtained during volatilization at  $30\ ^\circ\text{C}$ . The experimental results show that the concentration of ethanol decreases exponentially with the time which is in good agreement with the theoretical derivation. Since the refractive index of liquid which varies linearly with the concentration increases with the volatilization of ethanol, leading to stronger evanescent wave absorption, as a result, the ring-down time decreases. In addition, this method has very low temperature cross-sensitivity.

**Key words:** Fiber loop ring-down technique; Etched fiber; Evanescent wave; Liquid volatilization

**OCIS:** 060.2370; 060.2430; 280.4788

基金项目:国家自然科学基金(No.10477016)资助

第一作者:江维(1987-),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术. Email:380992975@qq.com

导师(通讯作者):赵建林(1958-),男,教授,博士,主要研究方向为光信息技术及应用. Email:jlzhao@nwpu.edu.cn

收稿日期:2013-04-19;录用日期:2013-10-10

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

对于低分子量或高饱和蒸汽压的化学物质,挥发是其在液态环境中主要的迁移转化途径,因而液体挥发的测量被广泛应用在环境保护及化工、制药等领域.目前测量液体挥发过程主要基于化学方法,即每隔一定时间提取定量的样品溶液,或在溶液中加入惰性示踪剂,然后用紫外光谱或气相色谱法来检测分析溶液中某成分的浓度<sup>[1-2]</sup>;或者将氧气通入溶液中作为参考,由于溶质和氧气的扩散系数之比为常数,采用溶解氧分析器分析氧的浓度即可得到溶质的挥发情况<sup>[3]</sup>.然而,利用化学手段测量液体的挥发操作过程复杂,不便于实时和远程监测.

随着光纤技术的发展,光纤类传感器以其抗腐蚀、抗电磁干扰、结构紧凑等优点而得到越来越广泛的应用.其中近年来发展起来的光纤腔衰荡(Fiber Loop Ring-Down, FLRD)技术,因其只需测量光强度的相对比值,且测量过程相对简单,可实现高灵敏度和绝对测量等,已成为弱吸收测量的一种新的有效手段.现有的光纤腔主要分为环形和线形两类. Brown等<sup>[4]</sup>利用光纤耦合器将一段光纤首尾相接构成一个光纤环,并基于倏逝波原理将光脉冲信号从光纤弯曲处耦合进/出环形腔.虽然该方法的光谱测量范围很大,但也给输出信号带来较大的噪声. M. Andachi等<sup>[5]</sup>通过在一段光纤中写入两个具有相同中心波长的光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)作为反射镜,构成一种线形全光纤衰荡腔,实现了对外界介质折射率的检测.该种腔结构简单,易与光源和探测器等连接,但其高反射率区域非常窄,且易受外界环境的影响. G. Stewart等<sup>[6]</sup>首先利用两个大分光比(99:1)熔融拉锥型光纤耦合器构成光纤环腔,该结构易实现,且增大了耦合进光腔内的能量,同时使连接损耗达到最小.根据FLRD技术的工作原理,若将某种因环境介质变化而引起光损耗的器件如腐蚀光纤、光纤光栅等无缝嵌入光纤环腔内,则其可用来测量环境介质(如溶液)的折射率、压力、温度等参量<sup>[6-15]</sup>.

本文提出一种利用FLRD技术监测液体挥发过程的方法.以乙醇和丙三醇混合溶液中乙醇的挥发过程测量为例,采用一小段部分包层被腐蚀的单模光纤作为传感单元接入FLRD中,通过测量环形腔的衰荡时间,得到给定环境温度下混合溶液中乙醇的挥发随时间的变化规律.

## 1 测量原理

液体的挥发可理解为气液相之间的物质传递过程,通常可用传质理论描述<sup>[16]</sup>.该理论认为,当气液两相接触时,两相主体之间有一个相界面,如图1所示,

在相界面两侧分别存在着液膜和气膜,液相主体内的溶质必须以分子扩散的形式连续地通过这两个膜层.浓度梯度的存在是物质扩散的动力.对于有机溶液,双膜理论假定有机物的物质通量在相边界层与相界面处相等,一般认为有机物的挥发为稳态扩散,是一级反应过程,其挥发速率可表示为<sup>[3]</sup>

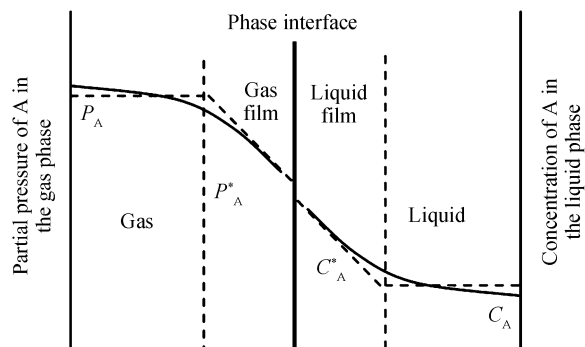


图1 液体挥发的双膜理论模型

Fig. 1 The two-film theoretical mode of liquid volatilization

$$R_V = -\frac{d[C_A]}{dt} = K_V [C_A] \quad (1)$$

式中,  $[C_A]$  为有机物的浓度,  $K_V$  为挥发速率常数. 通过对式(1)积分, 可得溶液中溶质的浓度随时间呈单指数规律衰减, 即

$$[C_A] \propto \exp(-K_V t) \quad (2)$$

根据混合溶液与折射率的关系可得<sup>[17]</sup>

$$\frac{n_{\text{mix}}^2 - 1}{n_{\text{mix}}^2 + 2} = q_a \frac{n_a^2 - 1}{n_a^2 + 2} + q_b \frac{n_b^2 - 1}{n_b^2 + 2} \quad (3)$$

式中,  $n_{\text{mix}}$  为混合溶液的折射率,  $n_a$ 、 $n_b$  和  $q_a$ 、 $q_b$  分别对应于组分 a、b 的折射率和体积分数. 于是, 通过监测溶质挥发过程中混合溶液折射率的变化, 可以得到溶液中溶质的浓度.

对光场有吸收作用的介质其折射率通常用复数形式表示, 即

$$\tilde{n} = n(1 + i\kappa) \quad (4)$$

式中,  $\kappa$  表示吸收介质的消光系数, 其与介质的吸收系数  $\alpha$  的关系为

$$\alpha = 2k_0 n\kappa = 4\pi n\kappa/\lambda \quad (5)$$

假设光纤环腔的长度为  $L$ , 环腔内吸收区域长度为  $l$ , 则光纤环腔的衰荡时间可表示为<sup>[18]</sup>

$$\tau = \frac{L}{v(A + \alpha l)} = \frac{t_r}{A + \alpha l} \quad (6)$$

式中,  $v$  为光脉冲在光纤纤芯中的传输速度,  $t_r = L/v$  为光脉冲绕环腔一周所用时间,  $A$  为光纤腔内总损耗(包括器件的插入损耗、耦合损耗以及光纤的传输损耗等),  $\alpha l$  为外部环境引起的光纤腔内长度为  $l$  的一段光纤上产生的传输损耗. 当溶液浓度改变时, 其折射率  $\tilde{n}$  随之改变, 由式(5)和(6)可看出, 随着溶液折射率增大, 衰荡时间逐渐减小.

设阶跃单模光纤纤芯和包层折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$ , 纤芯半径为  $a$ . 弱波导近似下, 光纤内的横向模场可用式(7)表示<sup>[15]</sup>. 其中,  $J, K$  分别为第一类和修正的第二类 Bessel 函数,  $\beta = k_0 n_{\text{eff}}$  为基模的传播常数,  $U^2 = a^2(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)$ ,  $W^2 = a^2(\beta^2 - k_0^2 n_2^2)$ .

$$\begin{aligned} e_{y,x} &= \frac{1}{n_2} \left( \frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^+ h_{x,y} \\ e_0 &\begin{cases} J_0(Ur/a)/J_0(U), 0 < r < a \\ K_0(Wr/a)/K_0(W), r > a \end{cases} \\ e_z &= i \frac{1}{k_0 a n_2} \begin{pmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \\ &\begin{cases} U J_1(Ur/a)/J_0(U), 0 < r < a \\ W K_1(Wr/a)/K_0(W), r > a \end{cases} \\ h_z &= i \frac{1}{k_0 a} \left( \frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^+ \begin{pmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \\ &\begin{cases} U J_1(Ur/a)/J_0(U), 0 < r < a \\ W K_1(Wr/a)/K_0(W), r > a \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

阶跃单模光纤的归一化频率  $V$  满足式(8)

$$V = \sqrt{W^2 + U^2} \leq 2.408 \quad (8)$$

定义归一化传播常数  $b = (n_{\text{eff}} - n_2)/(n_1 - n_2)$ . 利用  $b$  与  $V$  的关系可求得工作波长处传输基模的有效折射率  $n_{\text{eff}}$ .  $b$  的一个解析近似表达式为<sup>[19]</sup>

$$b(V) \approx (1.1428 - 0.9960/V)^2 \quad (9)$$

在  $V = 1.5 \sim 2.5$  时, 其准确度在 0.2% 以内.

根据 Poynting 定律, 可求得光纤在轴向  $z$  位置处基模传输的总功率为

$$P_t(z) = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \text{Re}(\mathbf{e}_y \times \mathbf{h}_x^*) \cdot \mathbf{l}_z r dr d\varphi \quad (10)$$

式中,  $\text{Re}$  是实部标记,  $\mathbf{l}_z$  是沿光纤轴方向的单位矢量. 利用  $J_0, J_1, K_0$  和  $K_1$  之间的关系, 将式(7)代入式(10), 可求出纤芯中传输的光功率为

$$\frac{P_{\text{core}}}{P_t} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^a \text{Re}(\mathbf{e}_y \times \mathbf{h}_x^*) \cdot \mathbf{l}_z r dr d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \text{Re}(\mathbf{e}_y \times \mathbf{h}_x^*) \cdot \mathbf{l}_z r dr d\varphi} = \frac{W^2}{V^2} \left[ 1 + \frac{J_0^2(U)}{J_1^2(U)} \right] \quad (11)$$

长度为  $l$  的一段具有轴向衰减的光纤的传输功率可表示为

$$\begin{aligned} \frac{P_t(l)}{P_t(0)} &= \{ [1 + J_1^2(U)/J_0^2(U)] + \exp(-al) \cdot \\ &[K_1^2(W)/K_0^2(W) - 1] \} / \{ J_1^2(U)/J_0^2(U) + \\ &K_1^2(W)/K_0^2(W) \} \end{aligned} \quad (12)$$

可见, 外界环境引起的损耗  $al$  会引起  $P_t$  的降低. 通过有限元分析, 可直观地得到光纤端面能量分布以及包层半径对倏逝波传感特性的影响.

已知实验用光纤的参量为:  $n_1 = 1.4681$ ,  $n_2 = 1.4629$ ,  $a = 4.1 \mu\text{m}$ ,  $R = 62.5 \mu\text{m}$ . 激光光源波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ . 将参量代入式(8)和(9), 结合  $b$  的定义式, 计算得到此参量条件下归一化频率  $V = 2.05 < 2.408$ , 说

明该纤芯内只传输一种模式, 该模式的有效折射率  $n_{\text{eff}} = 1.465123$ .

按照已知光纤参量设置光纤的纤芯和包层, 第三层为与包层波阻抗相匹配的完美匹配层 (Perfectly Matched Layer, PML)<sup>[20]</sup>. 入射波无反射地进入 PML. 由于 PML 是有损耗的介质, 进入 PML 的透射波将迅速衰减, 从而可以在理论上求得光纤的损耗特性. 经模拟计算得到光纤横截面光场分布如图 2(a), 虽然有一小部分光泄露到包层成为倏逝波, 而相对较厚的包层还是将其束缚在光纤中, 远离了外界吸收介质. 纤芯内传输的基模是两个简并的偏振模, 有效折射率为 1.465123, 与理论计算得到的  $n_{\text{eff}}$  值相吻合. 当光纤的包层被腐蚀到半径  $r = 14.05 \mu\text{m}$  时, 可求得纤芯基模的有效折射率为  $1.46512 - i4.03294 \times 10^{-7}$ , 其中折射率的虚部即为消光系数. 消光系数越大, 说明该光纤内越多的倏逝波能量能被外界吸收介质所吸收, 因而对外界吸收介质越敏感. 若光纤的包层继续被腐蚀到半径  $r = 12.55 \mu\text{m}$  时, 其端面能量分布如图 2(b) 所示. 相应的基模有效折射率为  $1.46512 - i1.17231 \times 10^{-6}$ , 消光系数比  $r = 14.05 \mu\text{m}$  时提高了一个数量级. 由图可看出, 包层中的倏逝波已靠近包层边界, 此时较容易与外界吸收介质相接触.

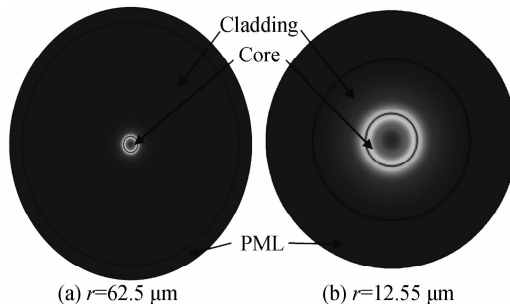


图2 不同包层直径的光纤横截面光场分布  
Fig. 2 Energy distribution in the cross section of etched fiber

## 2 实验装置及单模光纤的腐蚀处理

图3为接入一段包层被部分腐蚀的单模光纤的 FLRD 系统, 光纤环腔由两个大分光比(1:99)的  $1 \times 2$  光纤耦合器和长 1 km 的单模光纤组成. 数字信号发生器通过电源控制器驱动分布反馈式激光二极管 (DFB LD), 以输出相应的脉冲光信号 (脉冲宽度为  $2 \mu\text{s}$ , 中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$ ). 输出光信号经一个光纤耦合器耦合进环腔后, 再经另一个光纤耦合器耦合输出, 输出的光信号经 InGaAs 探测器转换为电信号, 由数字示波器采集并显示其衰荡谱, 相应数据通过计算机进行存储和进一步的处理.

考虑到氢氟酸 (HF) 对光纤包层材料 (二氧化硅) 具有腐蚀性, 而对光纤的涂覆层腐蚀作用很小, 所以采

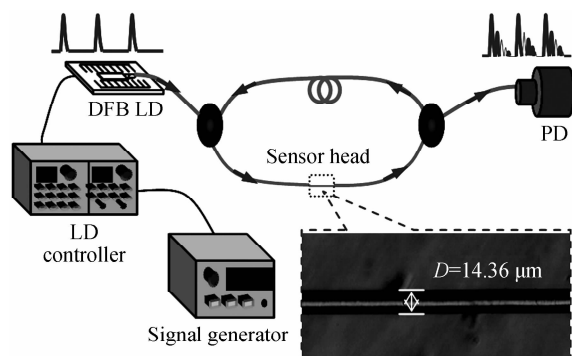
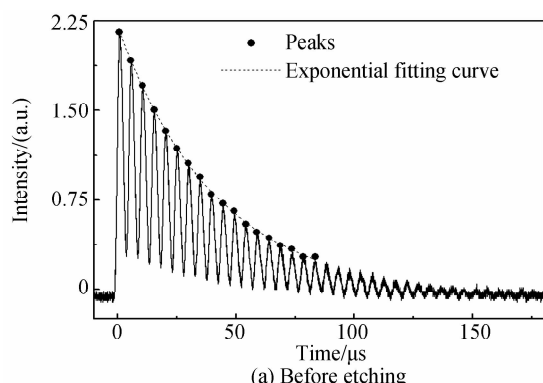


图3 监测液体挥发过程的FLRD实验装置  
插图为腐蚀光纤的显微照片

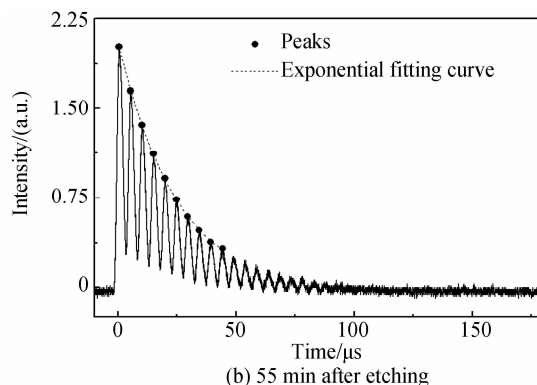
Fig. 3 FLRD experimental scheme for volatilization measurement, and the inset shows the microscope image of the etched fiber

用 HF 腐蚀光纤可以改变其包层直径,而不破坏腐蚀区域以外的光纤结构. 虽然被腐蚀的光纤越长,能泄露出更多的倏逝波,从而对外界吸收介质更敏感,但由于光纤直径较细时容易折断,并且传感头的损耗也会加大,不利于测量. 然而如果光纤的腐蚀区域过短,虽然不容易被折断,但其敏感性会大大降低. 综合考虑上述因素后,将光纤涂覆层剥离长约为 1 cm,用酒精清洗干净后,水平放入浓度为 40% 的 HF 溶液中进行腐蚀,同时监测光纤腐蚀过程中环腔输出的衰荡谱信号. 在腐蚀过程中,用 400 倍显微镜每隔 15 min 测量一次包层直径,得出光纤的腐蚀程度与其浸泡在 HF 溶液中的时间近似成正比,腐蚀速率约为  $2 \mu\text{m}/\text{min}$ .

图 4(a) 为光纤被腐蚀之前测得的光纤环腔衰荡谱,图 4(b) 为腐蚀 55 min 后的衰荡谱. 由图 4 可知,随着环腔中总损耗的增大,各脉冲峰相应地迅速衰减. 此时,将光纤从 HF 溶液中取出,用水清洗并自然晾干后,测得的腐蚀光纤包层直径为  $14.36 \mu\text{m}$ ,且腐蚀区域均匀无明显毛刺或光纤损伤,如图 3 中插图. 根据图 4 所示的衰荡谱进行指数拟合,得到光纤腐蚀前后的衰荡时间分别为 41.6 s 和 24.5 s. 随着光纤在 HF 溶液中浸泡时间的增加,系统的损耗随光纤直径的减小而增大.



(a) Before etching



(b) 55 min after etching

图4 单模光纤腐蚀前后的衰荡谱

Fig. 4 Ring-down spectra before and after the fiber is etched

分别将环腔中长 1 cm 左右的光纤直径腐蚀至  $28.4 \mu\text{m}$ ,  $26.67 \mu\text{m}$  和  $26.15 \mu\text{m}$ , 并且将腐蚀区域置于不同浓度的丙三醇溶液中,测量其浓度响应特性,结果如图 5 所示. 从图中可以看出,腐蚀光纤对外界与纤芯折射率差别大的溶液不敏感. 而且对于相同的溶液浓度(外界环境),系统的损耗随光纤直径的减小而增大. 这表明剩余的包层半径越小,由倏逝波引起的损耗对外界环境越敏感. 但是包层半径的降低是有一定限度的. 如果包层太小,会影响测量准确度,且腐蚀段光纤易于损坏. 综合模拟结果和实验结果,在保证腐蚀光纤对外界环境敏感的情况下,应尽可能使其直径大一些,以减少实验过程中的损坏概率,故本文实验中将光纤包层直径腐蚀到  $26 \mu\text{m}$ .

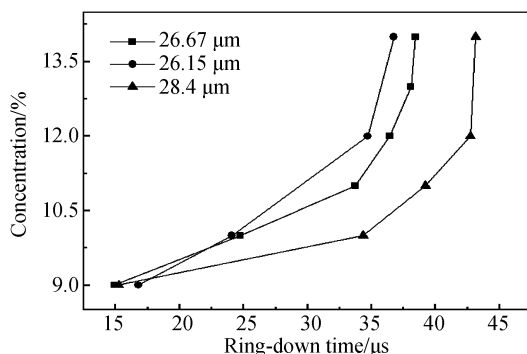


图5 不同包层半径的腐蚀光纤的浓度响应

Fig. 5 Concentration response with etched fibers of different diameters

### 3 乙醇挥发过程的监测实验

将实验所用的单模光纤剥掉长度为 1 cm 的涂覆层,并放入 40% 的 HF 溶液中腐蚀 49 min,清洗后由显微镜测得腐蚀区域光纤的直径为  $26.67 \mu\text{m}$ . 为了防止光纤的腐蚀区域弯曲或者损坏,将其两端预拉直后固定在载玻片上. 载玻片与光纤的热膨胀系数相近,所以当腐蚀光纤受热时,载玻片不会因热膨胀而将光纤进一步拉伸甚至拉断,从而造成额外的环腔损耗. 固定腐

蚀光纤前,用 HF 溶液将载玻片的中央区域腐蚀出一个凹面,使腐蚀光纤悬空于该区域,从而避免其与载玻片接触而造成倏逝波损耗.将制作好的传感头放于温控箱内,并将温控箱的温度控制在 30℃,湿度控制在 16%左右,同时将一些固态 NaOH 颗粒放置在温控箱内,用以吸收挥发出来的乙醇气体和箱内的水蒸气.分别取 99.9%的乙醇溶液和丙三醇溶液配制 5 g 的乙醇和丙三醇混合溶液,其中乙醇的质量分数为 10%.将配制好的溶液缓慢滴在载玻片上,液面高出光纤腐蚀区域约 1 mm.

图 6 为 30℃恒温环境下,乙醇分别挥发 0、20、80 和 200 min 时对应的光纤环腔衰荡谱.可以看出,随着乙醇的挥发,混合溶液的折射率增大,衰荡谱明显减小.

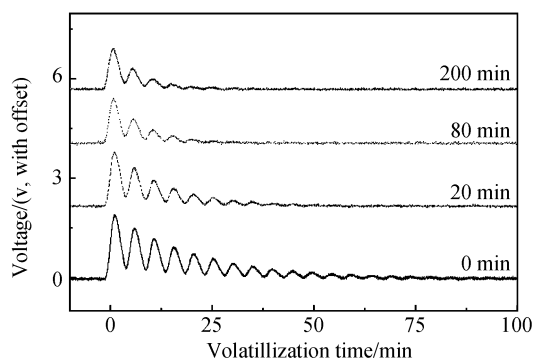


图 6 30℃下不同挥发时间的光纤环腔衰荡谱

Fig. 6 Ring-down spectra of the FLRD system at different times during volatilization at 30°C

在乙醇的挥发过程中,每隔 20 min 记录一次衰荡谱.将各衰荡谱提取峰值进行曲线拟合,得到 30℃恒温环境下,系统的衰荡时间随乙醇挥发时间的变化关系,结果如图 7.由于丙三醇的折射率大于乙醇的折射率,溶液中乙醇的含量不断挥发而减小,导致乙醇-丙三醇混合溶液的折射率相应增大,逐渐接近光纤包层的折射率,使其对腐蚀光纤纤芯中泄露的倏逝波能量的吸收程度也逐渐增大,从而使光纤环腔内的损耗逐渐增大,衰荡时间逐渐减小.

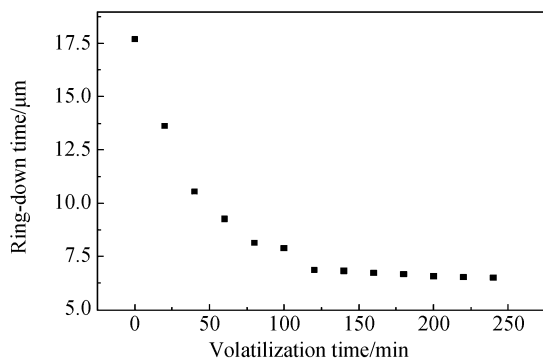


图 7 衰荡时间随乙醇挥发时间的变化

Fig. 7 Ring-down time vs. volatilization time

为了得到溶液中乙醇的浓度随乙醇挥发时间的变化关系,将传感头放置在配制好的不同浓度的乙醇-丙

三醇溶液中,并测量系统的衰荡时间,结果如图 8.经数据拟合得到衰荡时间与乙醇-丙三醇溶液浓度的关系为

$$y = 38.30415 + \frac{5.38084 - 38.30415}{1 + \exp[(x - 9.71607)/0.72942]} \quad (13)$$

根据式(13),将图 8 中的衰荡时间转换为对应的乙醇浓度,得到乙醇浓度随其挥发时间的变化关系,如图 9.用单指数函数拟合数据点,得到拟合相关系数为 0.990 7.可见乙醇在丙三醇溶液中的挥发符合单指数衰减规律.但是从 100 min 开始,数据点开始出现些微偏离.这是由于在实验过程中,固定腐蚀光纤的树脂胶在所浸入的有机溶剂作用下出现软化,导致腐蚀光纤因重力的影响而发生微弯现象,从而影响了实验结果.

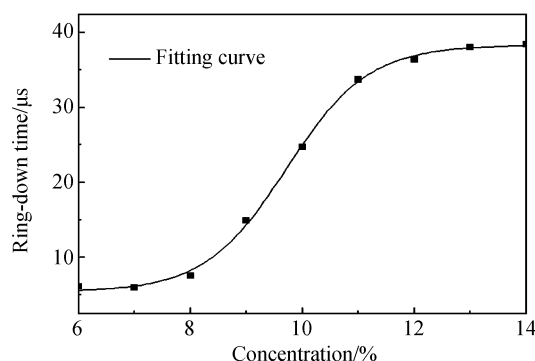


图 8 光纤敏感区域的溶液浓度响应

Fig. 8 Ring-down time of the sensor system in Solution with different concentrations

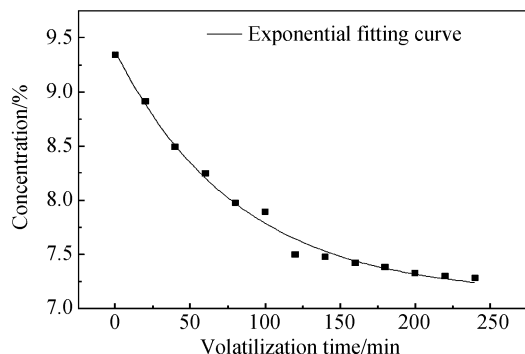


图 9 混合溶液中乙醇浓度随挥发时间的变化

Fig. 9 Concentration change of solution during volatilization

## 4 装置的温度响应特性

在传感头置于混合溶液前连续记录 50 次衰荡谱,可得到系统衰荡时间的相对误差为  $\Delta\tau/\bar{\tau} = 0.21\%$ ,其中  $\bar{\tau}$  为测量的衰荡时间的平均值.系统最小可探测到的衰荡时间变化量  $\Delta\tau = 0.08$  s.将光纤环腔中腐蚀光纤完全浸入到丙三醇溶液中,以 5℃的步进量将溶液的温度从 20℃升至 45℃,得到图 10 所示光纤环腔的衰荡时间随温度的变化特性曲线.可以看出,随着温度的升高,衰荡时间的标准偏差  $\Delta\tau$  只有 0.02 s,仍在系统的测量不确定度范围内.丙三醇的折射率会随着温

度的升高而降低,但在 45℃ 以下时,其折射率的变化处于传感头折射率响应的不敏感区域。所以,在 30℃ 条件下,溶液折射率随温度的变化对传感头的影响,要远低于溶质挥发导致的折射率变化对传感头的影响。考虑到光纤的热光系数( $\beta \approx 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )比热膨胀系数( $\alpha = 5.5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )大两个数量级<sup>[21]</sup>,可认为整个环腔主要受热光效应的影响,相当于将纤芯的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  修正为  $n_{\text{eff}}(1 + \beta\Delta T)$ ,则环腔的衰荡时间  $\tau = t_r(1 + \beta\Delta T)/A$ ,由此可求得温度在 45℃ 以下变化时对应的  $\Delta\tau$  也低于 0.02s。因此,该系统对于环境温度的变化有较低的温度交叉敏感性。

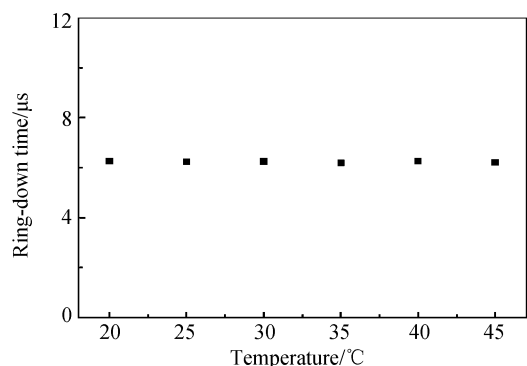


图 10 传感头的温度响应特性

Fig. 10 Temperature response of the etched fiber

## 5 结论

将一段长 1 cm 单模光纤的包层部分腐蚀后作为折射率传感头,熔接到由光纤耦合器连接的光纤环腔中,采用光纤环腔衰荡技术作为解调手段,研究了室温环境(30℃)下乙醇-丙三醇混合溶液中乙醇的挥发规律。结果表明,随着混合溶液中乙醇(低折射率)不断挥发,混合溶液的折射率增大,并逐渐接近光纤包层的折射率,导致其对腐蚀光纤纤芯泄露的倏逝波能量的吸收程度也逐渐增大,从而使光纤环腔内的损耗逐渐增大,衰荡时间相应减小。将衰荡时间转换成混合溶液中乙醇浓度,可得乙醇的浓度呈指数规律衰减。通过实验和理论分析环境温度对敏感区域和整个光纤环腔的影响,可以看出,该系统在室温附近具有较低的温度交叉敏感性。因此,该系统可应用于环境保护或化工、制药等领域中远程和准实时监测液体的挥发过程。另外,由于部分包层腐蚀光纤测量的是光纤附近局部小区域的挥发规律,而且当溶液静止时,溶质的挥发速率随着距离液面高度的不同而不同,所以将传感头放置于溶液中不同高度处可得到液体内部的挥发规律。

### 参考文献

[1] JONGMA R T, BOOGAARTS M G H, HOLLEMAN I, *et al.* Trace gas detection with cavity ring down spectroscopy[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, **66**(4):2821-2828.

- [2] CUI H P, HOU K Y, WU Q H, *et al.* Development and application of a membrane inlet-single photon ionization-mass spectrometer for on line analysis volatile organic compounds in water references[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry (Chinese Version)*, 2010, **38**(5):760-764.  
崔华鹏,侯可勇,吴庆浩,等.连续测量水中挥发性有机物的膜进样-单光子电离-质谱仪的研制及其应用[J]. *分析化学*, 2010, **38**(5):760-764.
- [3] SMITH J H, BOMBERGER D C. Prediction of the volatilization rates of high-volatility chemicals from natural water bodies [J]. *Environmental Science and Technology*, 1980, **14**(11):1332-1336.
- [4] BROWN R S, KOZIN I, TONG Z, *et al.* Fiber-loop ring-down spectroscopy[J]. *Journal of Chemical Physics*, 2002, **117**(23):10444-10447.
- [5] ANDACHI M, NAKAYAMA T, KAWASAKI M, *et al.* Fiber-optic ring-down spectroscopy using a tunable picosecond gain switched diode laser[J]. *Applied Physics B*, 2007, **88**(1):131-135.
- [6] STEWART G, ATHERTON K, CULSHAW B. Cavity-enhanced spectroscopy in fiber cavities [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(5):442-444.
- [7] JIANG Y J, ZHAO J L, TANG D Q, *et al.* Measurement of the bending loss of single-mode fibers by use of fiber loop cavity ring-down technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4):971-975.  
姜亚军,赵建林,汤大卿,等.利用光纤环腔衰荡技术测量单模光纤的弯曲损耗[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4):971-975.
- [8] ZHANG W H, LIU B, LUO J H, *et al.* Study of pressure sensor based on fiber loop ringdown [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3):466-468.  
张卫华,刘波,罗建花,等.基于光纤环形腔衰荡的压力传感器研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(3):466-468.
- [9] LIU Y P, ZHANG W G, JIANG M. Development and recent progress of fiber cavity ring-down spectroscopy[J]. *Progress In Physics*, 2008, **28**(4):401-409.  
刘亚萍,张伟刚,姜萌.光纤腔衰荡光谱技术及其最新进展[J]. *物理学进展*, 2008, **28**(4):401-409.
- [10] TANG D, YANG D, JIANG Y, *et al.* Fiber loop ring-down optical fiber grating gas pressure sensor[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, **48**(12):1262-1265.
- [11] ZHOU K, WEBB D, FARRIES M, *et al.* Biochemical sensor based on a novel all-fiber cavity ring down spectroscopy technique incorporating a tilted fiber Bragg grating[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, **47**(10):1023-1027.
- [12] NI N, CHAN C C, XIA L, *et al.* Fiber cavity ring-down refractive index sensor [J]. *Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(16):1351-1353.
- [13] WANG C, HERATH C. High-sensitivity fiber-loop ringdown evanescent-field index sensors using single-mode fiber [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(10):1629-1631.
- [14] BROWN R S, KOZIN I, TONG Z, *et al.* Fiber-loop ring-down spectroscopy[J]. *Journal of Chemical Physics*, 2002, **117**(23):10444-10447.
- [15] JIANG M, ZHANG W G, ZHANG Q, *et al.* Investigation on an evanescent wave fiber-optic absorption sensor based on fiber loop cavity ring-down spectroscopy [J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(2):249-253.
- [16] LEWIS W K, WHITMAN W G. Principles of gas absorption [J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1924, **16**(12):1215-1220.

- [17] WAECHTER H, LITMAN J, CHEUNG A H, *et al.* Chemical sensing using fiber cavity ring-down spectroscopy [J]. *Sensors*, 2010, **10**(3):1716-1742.
- [18] JIANG Y J, ZHAO J L, YANG D X. Optimized extraction of ring-down time in cavity ring-down spectroscopy [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2009, **38**(7):1740-1745.  
姜亚军, 赵建林, 杨德兴. 光腔衰荡光谱法中衰荡时间的优化提取[J]. *光子学报*, 2009, **38**(7):1740-1745.
- [19] 饶云江. 光线技术[M]. 北京:科学出版社, 2006:65-67.
- [20] BERENGER J P. A perfect matched layer for absorbing of electromagnetic waves[J]. *Journal of Computational Physics*, 1994, **114**(2):185-200.
- [21] LI X C, PRINZ F, SEIM J. Thermal behavior of a metal embedded fiber Bragg grating sensor[J]. *Smart Materials and Structures*, 2001, **10**(4):575-579.