

液芯光波导溶液浓度传感器

麦咏贤 周佐平 范仕良

(华南理工大学物理系, 广东, 广州, 510641)

摘要 提出一种用大直径液芯光波导作为溶液浓度传感器的新方案, 其优点是可获得较高的测量灵敏度. 对系统的工作原理, 灵敏度与系统结构参数的关系作了分析和讨论. 实验结果与理论分析基本一致.

关键词 光波导, 浓度, 测量.

引言

用光导纤维作溶液浓度传感的研究已有不少报道^[1,2], 但这些方法存在刚度不够、可靠性差、传输信号弱和对信号处理电路要求高等缺点. 为此, 我们在文献[3]中提出采用大直径光波导作液体浓度测量的传感系统. 这种系统具有结构简单、稳定可靠的优点, 在此基础上, 本文提出采用大直径液芯光波导作溶液浓度测量的传感系统. 这种系统的特点在于可针对被测对象的浓度范围, 灵活选择合适的液芯折射率, 从而提高测量灵敏度, 这种结构适合于工业生产中的在线测量.

1 结构及原理

大直径液芯光波导溶液浓度传感器的结构如图1所示. 在结构均匀的直玻璃管(折射率为 n_2)内, 密封有折射率为 n_3 的液芯, 管外充满折射率为 n_1 的被测液. 折射率 $n_2 > n_3 > n_1$. 管的一端放置点光源S(红外半导体发光二级管), 另一端为探测器B.

被测浓度为 D , D 与 n_1 的关系可预先测定, 于是对 D 的测量

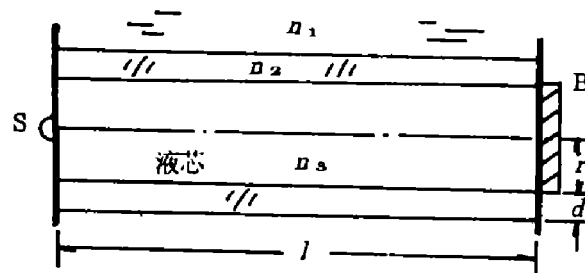


图1 大直径液芯光波导溶液浓度传感器

Fig. 1 The large-diameter waveguide with liquid core for liquid density measurement

可转化为对 n_1 的测量. 在传感器结构已定, 光源发光强度不变的条件下, 探测器 B 接收的光能随 n_1 而变化.

为了推导 B 接收的光能 E 与 n_1 的关系, 假设: 光波导是轴对称的, 点光源位于轴线上, 所有讨论的光线都位于子午面上; 介质是充分透明无吸收的.

点光源向光波导入射的光线按其行为不同, 可分别讨论如下:

(1) 点光源直射到 B 上和射到管壁上而发生全反射的光线. 这部分光能以 E_1 来表示, 最终均被 B 所接收.

入射光锥半角一般用 θ 表示, 而与 (n_2, n_1) 界面上的全反射角 i_m' 对应的半角则记为 θ_m , 相应的 (n_2, n_3) 界面上的入射角记为 i_m .

此时光源对光波导所张的立体角 ω 为

$$\omega = 2\pi(1 - \cos \theta_m),$$

光源发光强度角度分布函数用 $f(\theta)$ 表示.

为简单起见, 设 $f(\theta) = K$, K 为一常数, 所以,

$$E_1 = K\omega = 2\pi K(1 - \cos \theta_m), \quad (1)$$

由全反射条件及 $i_m + \theta_m = \frac{\pi}{2}$ 的关系得到 θ_m

$= \cos^{-1} \frac{n_1}{n_3}$, 当 n_1 发生 dn_1 变化时, 有

$$d\theta_m = \frac{-dn_1}{n_3 \cdot \sin \theta_m}, \quad (2)$$

相应的 E_1 的变化为

$$dE_1 = Kd\omega = 2\pi K \cdot \sin \theta_m \cdot d\theta_m, \quad (3)$$

得

$$\frac{dE_1}{dn_1} = -\frac{2\pi K}{n_3}, \quad (4)$$

$\frac{dE_1}{dn_1}$ 的值表示 E_1 随 n_1 变化的程度, 它反映了测量的灵敏度. 故式(4)表明, 就 E_1 光能而言,

减小 n_3 可提高测量灵敏度. 由于是全反射, n_3 不能小于 n_1 . 液芯的优点就在于容易获得合适的 n_3 , 这正是我们采用液芯光波导的主要原因.

(2) 半角 $\theta > \theta_m$ 的入射光. 其中能够入射到 B 的能量用 E_2 代表. 入射半角为 θ , 角宽为 $\Delta\theta$ 的一窄束入射光所张开的立体角为 $\Delta\omega = 2\pi \cdot \sin \theta \cdot \Delta\theta$, 相应的光能为

$$\Delta E_2 = 2\pi K \cdot \sin \theta \cdot \Delta\theta, \quad (5)$$

在不同半角 θ 下, 计算 ΔE_2 中入射到 B 上的 $\Delta E_2'$ 的过程相当繁杂. 其原因在于不同 θ 的光线在到达 B 之前所经历的反射与折射次数不仅与 θ 有关, 而且还是波导结构参数 l, r ,

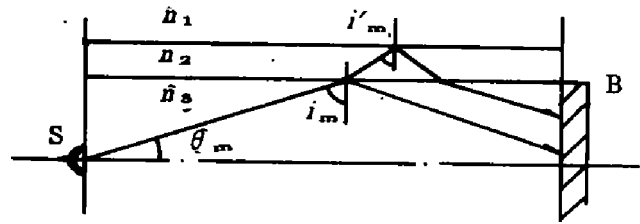


图 2 全反射的光线及全反射角

Fig. 2 Total reflection of beams and the critical angle, i_m'

d, n_2 和 n_3 的函数. 甚至某一入射光线经反射和折射后其不同部分亦可能经历不同的反射和折射次数. 只有把上述种种情况考虑在内, 并对 θ 从 θ_m 到 $\frac{\pi}{2}$ 的所有光能进行累加, 才能算出 E_2 .

图 3 给出经不同反射次数后的光线强度的比例, 它们是以入射光线的强度为 1 来计算的. 图 3 中 R_a 和 R_b 分别代表光在界面 a 和 b 的反射率, 它们是角 θ 和折射率的函数, 具体数值根据菲涅耳公式计算. 图 3 中 T 代表透射率, 它与 R_a 的关系为 $T=1-R_a$. 在图 3 中反射次数多于 3 次的极其微弱的光线均已略去.

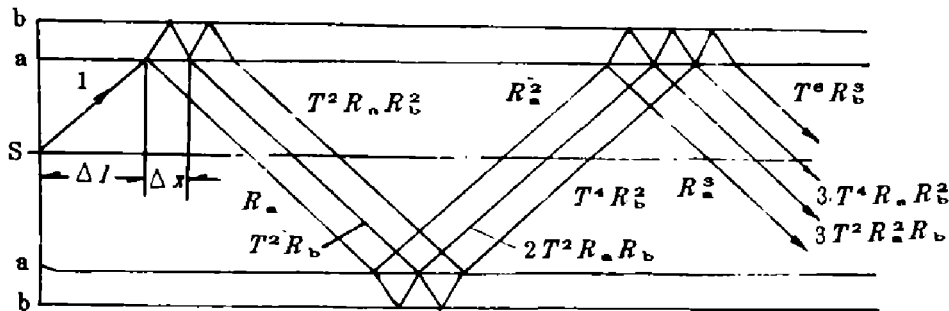


图 3 各光线的强度

Fig. 3 The strength of beams

在波导长 l 及其它结构参数已知的情况下, 使用以下两个长度作为“尺子”来计算 $\Delta E_2'$ 是方便的: 其一是光从光源射到管壁时, 轴向前进的距离 $\Delta l = r / \tan \theta$; 其二是光从同一界面 (n_3, n_2) 入射与出射两点之间的距离 $\Delta x = 2d \cdot \tan i_2$, 其中 $i_2 = \sin^{-1}(\frac{n_3}{n_2} \cos \theta)$. 利用这两把“尺子”很容易从图 3 上找出 $\Delta E_2'$. 例如, 当 $\Delta l + 2\Delta x < l < 3\Delta l$ 时有

$$\Delta E_2' = [R_a + T^2(R_a R_b^2 + R_b)] \Delta E_2,$$

将 θ 从 θ_m 到 $\pi/2$ 的所有 $\Delta E_2'$ 进行累加, 即可得 E_2 .

综合以上两种情况, 进入 B 的总光能是

$$E = E_1 + E_2, \quad (\text{任意单位}) \tag{6}$$

实际上, 我们对传感器的测量灵敏度更感兴趣, 其定义为:

$$\text{灵敏度} \quad S = \Delta E / \Delta n_1, \quad (\text{任意单位}) \tag{7}$$

$$\text{相对灵敏度} \quad RS = \Delta E / E \cdot \Delta n_1; \tag{8}$$

当 E 得出后很容易算得 S 和 RS .

根据上述数学模型, 我们用计算机对不同的波导结构参数的种种情况进行了 E, S 和 RS 的计算, 找出测量灵敏度随结构参数变化的关系. 以下给出部分有代表性的计算结果 (见图 4~6). 它们都是选定一些结构参数的情况下, 某一参数与灵敏度之间的关系. 所选定的参数见表 1.

表 1 几种关系计算中选定的参数
Table 1 Parameters selected for the calculations

图号	曲线	选定参数					
		$r(\text{mm})$	$l(\text{mm})$	$d(\text{mm})$	n_3	n_2	n_1
4	n_3 - S 关系	2.74	40	0.81		1.450	1.3345
5	d - S , d - RS 关系	2.74	56		1.3617	1.450	1.3345
6	r - S , r - RS 关系		56	0.81	1.3617	1.450	1.3345
7	计算, 实验比较	2.74	56	0.81	1.362	1.450	

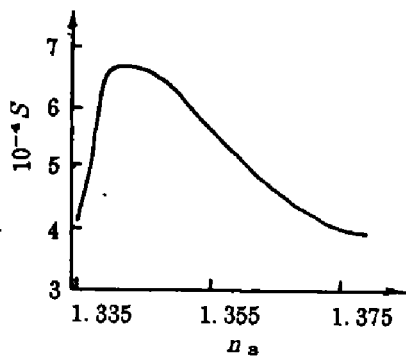


图 4 灵敏度随液芯 n_3 变化的曲线
Fig. 4 Dependence of the sensitivity on the index, n_3 , of liquid core

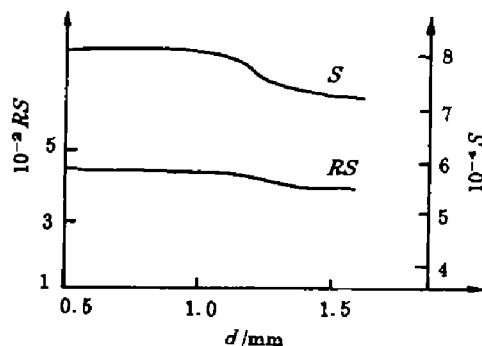


图 5 灵敏度随壁厚度变化的曲线
Fig. 5 Dependence of the sensitivity on the thickness, d , of glass tube wall

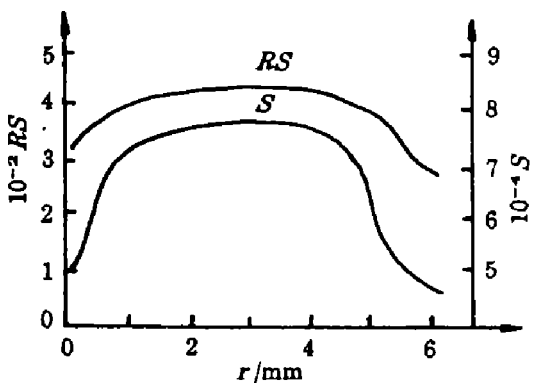


图 6 灵敏度随液芯半径变化的曲线
Fig. 6 Dependence of the sensitivity on the radius, r , of liquid core

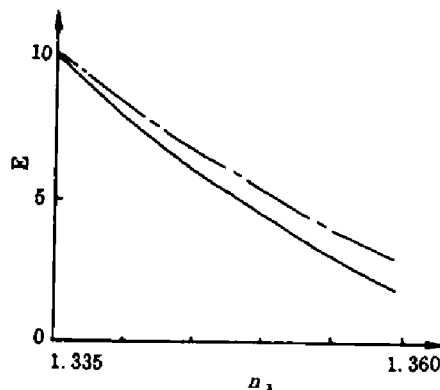


图 7 接收光能随被测液折射率变化的曲线
Fig. 7 Dependence of the received optical energy on the index n_1 , of liquid to be measured

2 测试系统和实验结果

为了对理论加以验证, 我们建立了一个红外测试系统. 系统的方框图如图 8 所示, 其中点光源红外发光管由一个高精度的恒流源供电, 以获得高稳定的红外辐射. 我们做的实验包括: (1) 液芯

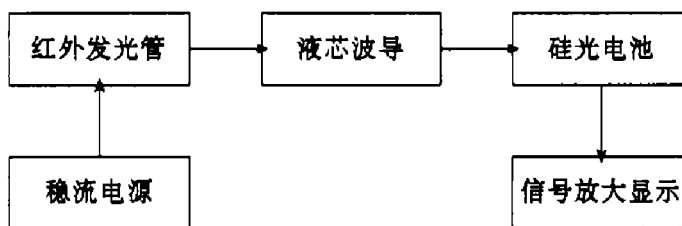


图 8 测试系统方框图
Fig. 8 Block diagram of the measuring system

折射率与灵敏度的关系;(2)波导长度与灵敏度关系;(3)玻管材料(石英玻璃与普通玻璃)与灵敏度的关系;(4)液芯半径与灵敏度的关系等.多数实验曲线的变化趋势是与理论分析结果相吻合的.图7是其中的一例,图7中实线为理论计算结果,虚线为实验结果.其误差主要来源于在理论计算时采用了点光源等近似条件.

研究表明,大直径液芯光波导作为溶液浓度传感器具有稳定可靠、灵敏度高的优点.其结构参数可根据具体情况灵活选择.在此基础上我们已研制了适用于测量酒精等溶液的浓度计.

参考文献

- 1 Conrad H H. *Chemical Engineering*, 1984, 91(10): 71-78
- 2 Arikawa J, et al. *Electronic Engineering*, 1985, 22(3): 79-84
- 3 周佐平,林 为. *红外与毫米波学报*, 1993, 12(6): 452-458

SENSOR OF OPTICAL WAVEGUIDE WITH LIQUID CORE FOR LIQUID DENSITY MEASUREMENT

Mai Yongxian Zhou Zuoping Fan Shiliang

(*Applied Physics Department, South China University
of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China*)

Abstract A new system of large-diameter waveguide with liquid core for the measurement of liquid density is presented. The main advantage of this system is the relatively high measuring sensitivity. The principle of this system and the effect of construction parameters of the system on the sensitivity are discussed. The results of measurements are nearly in agreement with the theoretical analysis. .

Key words optical waveguide, density, measurement.