

# 光纤干涉法测量液体折射率随温度变化率

里佐威 张 伟 裴 力

高淑琴 吴晓俐

(吉林大学, 长春, 130023)

(吉林工业大学, 长春, 130025)

**摘要:** 待测液体充入空心石英光纤中, 构成多模光纤。采用双光纤干涉方法, 测量了液体折射率随温度变化率, 获得了较高的测量精度。

## Measurement of temperature coefficient of liquid refractive index using optical fiber interference

Li Zouwei, Zhang Wei, Pei Li

Gao Shuqin, Wu Xiaoli

(Jilin University)

(Jilin University of Technology)

**Abstract:** In this paper, a method for measuring the temperature coefficient of liquid refractive index by means of the optical fiber interference is introduced. In the experiment study, the liquid-core optical fiber is used. The study results show the high measurement accuracy.

### 一、引 言

空心石英光纤充入透明度高的液体, 构成液芯光纤。液芯光纤内的液体物理性质均匀, 无内应力。因而, 液芯光纤保偏性能好<sup>[1]</sup>, 模变换系数小, 结构为8000个模式的液芯光纤可以传输单模(HE<sub>11</sub>)超过几百米<sup>[2]</sup>。在干涉型光纤传感中, 多模液芯光纤也能产生清晰干涉条纹。我们曾对多模液芯光纤干涉进行了研究<sup>[3]</sup>。最近, 我们用多模液芯光纤干涉方法, 测量了几种液体的折射率 $n$ 随温度 $T$ 的变化率 $\partial n/\partial T$ 。测量中, 待测液体(其折射率 $n$ 要大于石英包皮的折射率 $n_0$ )充入空心石英光纤内, 构成液芯光纤。本文介绍测量原理、实验装置和测量结果。

### 二、测 量 原 理

单色光沿一根光纤传输, 总相位取决于光纤的三个特性。即光纤长度、折射率及其分布、光纤的横向几何尺寸。传输光的相位可以因为压力、温度、电磁场等影响而变化。只考虑温度变化引起光纤折射率和几何尺寸发生变化时, 总相位 $\varphi$ 变化 $\Delta\varphi$ 为<sup>[4]</sup>:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi nL}{\lambda} (\alpha + \partial n/\partial T) \Delta T \quad (1)$$

式中,  $L$ 是光纤长度,  $\lambda$ 为光在真空中的波长,  $\alpha$ 为光纤的热膨胀系数,  $\partial n/\partial T$ 为光纤芯折 射

率随温度的变化率。由于光纤芯材料液体折射率与等效折射率在这里相差很小，其温度变化率的差异更小。本文将二者看成相等。对液芯光纤，芯液体折射率随温度变化率很大，相比之下，石英热膨胀系数 $\alpha(10^{-6}/^{\circ}\text{C} \sim 10^{-7}/^{\circ}\text{C})$ 可以忽略。(1)式写为：

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi nL}{\lambda} \cdot \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \Delta T \quad (2)$$

根据(2)式，我们只要测出温度变化 $\Delta T$ 时的相位变化 $\Delta\varphi$ ，即可以测量出液体折射率 $n$ 随温度 $T$ 的变化率 $\partial n/\partial T$ 。

光程延迟时间为 $t$ 的两光束干涉系统，干涉条纹强度可表示为：

$$I(t) = 1 + \cos 2\pi m \quad (3)$$

$m$ 可为非整数， $m = \nu \cdot t$ ，表示干涉条纹级数，其变化可由光频率 $\nu$ ，也可以由延迟时间 $t$ 引起。 $t$ 可以是两路相干光的物理长度、折射率、温度等变化引起的。在入射光频率 $\nu$ 固定时， $dt = \frac{1}{\nu} dm$ 。即光程延迟变化 $dt$ 引起干涉条纹变化 $dm$ 。可以通过测量干涉条纹变化 $dm$ ，计算出只有温度变化引起的两束光相位变化 $\Delta\varphi (2\pi \cdot dm)$ 。我们用两根液芯光纤构成双光路不等臂干涉仪。测量出室温下( $18^{\circ}\text{C}$ )液体折射率 $n$ 随温度 $T$ 的变化率 $\partial n/\partial T$ 。

### 三、实验装置及实验步骤

选用两根液芯光纤，内半径 $a = 32.0\mu\text{m}$ 。一根长 $1.860\text{m}$ 为敏感光纤，其中 $1.380\text{m}$ 为受温度影响的长度。另一根长为 $0.480\text{m}$ 为参考光纤。为补偿环境对实验的影响，在盛水容器外面部分敏感光纤的长度与参考光纤长度相等，并处于相同条件下。两光纤都放在绝热箱中。

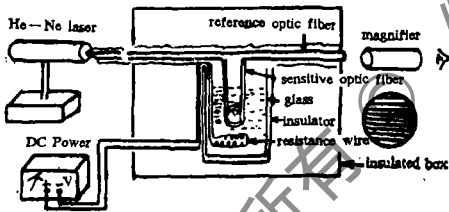


Fig.1 The schematic of experiment set-up

如图1所示。敏感光纤放在盛有一定质量水的玻璃杯中，水中放一个电阻值为 $R$ 的电阻丝，两端与箱外直流电源相连接。用放大镜观察条纹及其移动。调节激光器，使入射光束与两光纤轴线成 $0^{\circ}$ 角(平行)。最好使两光纤传输的光程差为激光器腔长偶数倍，以获得最清晰的干涉条纹<sup>[5]</sup>。待条纹稳定后，给电阻丝通电以改变水的温度。通入一定强度的电流，经一定时间的条纹移动时，记录下通电时间 $\tau$ 和电流强度 $I$ (动态测量)记录不同时间引起的条纹移动数 $\Delta N$ 。根据焦耳定律计算出温度变化 $\Delta T$ 。见附表(结果为5次测量平均值)。

### 四、实验结果

我们将待测样品氯苯(折射率为 $n = 1.520$ )充入空心石英光纤内(石英包皮折射率为 $n_c = 1.486$ )，构成液芯光纤。测量出电阻丝 $R$ 的电阻数值( $15.0\Omega$ )和水、玻璃杯、电阻丝的质量( $m_w$ ,  $m_G$ 和 $m_E$ )， $m_w = 1258.0\text{g}$ ,  $m = 198.5\text{g}$ ,  $m_E = 5.6\text{g}$ 。查出相应比热容 $C_w = 4180\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ,  $C_g = 670\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ,  $C_E = 450\text{J/kg} \cdot \text{K}$ 和热功当量 $K = 4180\text{J/kg} \cdot \text{K}$ 。根据实验记

录的通电时间 $\tau$ 和电流强度 $I(0.400\text{A})$ 。计算出水温度变化 $\Delta T$ ， $\Delta T = \int_0^{\tau} KI^2 R dt / (C_w m_w +$

$C_{5m} + C_{EmE}$ ) 见附表。

Table Experimental results

$t(s)$	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0
$\Delta T \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$	4.47	8.94	13.4	17.8	22.5	26.8	31.3	35.8	40.7	45.4	50.1	54.8
$\Delta N(\text{strip})$	8.0	16.4	24.0	32.0	40.2	49.0	56.2	64.0	71.8	81.4	90.6	99.2

由附表，用最小二乘法拟合  $\Delta N - \Delta T$  直线，(图2)，求其斜率

$$k' = (\Delta \bar{T}_i \cdot \Delta \bar{N}_i - \bar{\Delta T}_i \cdot \bar{\Delta N}_i) / (\Delta \bar{N}_i^2 - \bar{\Delta N}_i^2)^{1/2}; k' = 5.53 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$\partial T / \partial N = 5.53 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$ 。相干光源 He-Ne 激光器输出波长  $\lambda = 6.328 \times 10^{-7} \text{ m}$ 。由(2)式计算出  $|\partial n / \partial T| = |\lambda / (nL) \cdot \partial N / \partial T| = 5.46 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。我们还用苯、溴苯做了实验。测得数据分别为  $5.36 \times 10^{-4} / \text{ } ^\circ\text{C}$  和  $5.21 \times 10^{-4} / \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

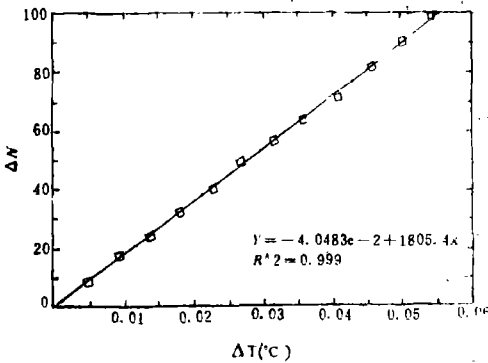


Fig.2 The linear relation between the temperature variation and the shifting number of interference fringes

液体折射率随温度变化的测量是一种较困难的工作。我们采用光纤干涉方法进行测量，以光波相位变化计算折射率随温度变化。由(1)式、(2)式看出，相位变化量与光纤长度成正比。由于敏感光纤可以很长，较大的两光纤长度差保证了测量的高精度。测量中系统的良好绝热水的均匀加热以及如上所述的补偿方法，使实验免受外界环境干扰。实验中电流强度的稳定是重要的。采用高质量稳压源或稳流源可以保证电流的稳定。

在各物理量测量中，都可以通过选择精密仪器(如分析天平等)，获得精确数值。我们几次实验，都获得了较高精度的结果。经分析和按误差传递公式进行计算，误差为0.2%~5%。重复性较好(为三位有效数字)，一些文献引用的结果<sup>[7]</sup>误差为2%~20%(二位有效数字)。

### 五、结 论

多模液芯光纤干涉方法，可以测量液体折射率随温度的变化率。实验中待测液体折射率要大于液芯光纤石英包皮的折射率。该方法测量精度较高。适当增加敏感光纤长度，采用精密电子仪器测量，测量精度还将有很大提高。

### 参 考 文 献

- [1] Papp A, Arms H. Appl Opt, 1977; 16(15): 1315
- [2] Gambling W A. Appl Opt, 1975; 14(7): 1537
- [3] 里佐威, 韩玉华, 侯兰田 *et al.*, 光学学报, 1993 12(1): 34~37
- [4] Shaw B C. Optical fiber sensing and signal processing, London UK 1986: Chap 7, 90
- [5] Roychoudhuri C. Appl Opt, 1980; 19(12): 1703~1705
- [6] 李锡培. 实验数据的数学处理. 北京: 科学出版社, 1980: 121
- [7] Storne J. J O S A, 1972; 62(3): 327

作者简介: 里佐威, 男, 1945年3月出生。副教授。现从事红外、光纤技术专业研究工作。

收稿日期: 1992年6月29日。