

# 光学材料热光系数的精确 测量——“热光系数仪”

刘海清 金德运 黄国松  
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

本文介绍用于光学材料系数精确测量的“热光系数仪”。该仪器采用两种干涉仪组合、微机控制和数据采集处理等设计方案,实现了高精度测量。低温区热膨胀系数 $\alpha$ 、折射率温度系数 $\beta$ 热光系数 $W$ 的测量精度可达 $\pm 3 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

关键词: 热光系数, 热光应力系数, 双稳开关回路, 等厚干涉, 马赫-陈德尔干涉术。

## 一、前 言

光学材料性质的热变化使光学系统产生热像差,热像差对光束波面产生干扰,影响了光信息传递的质量,在激光系统中激活元件在光泵过程中形成的温度梯度,导致激活元件出现光学畸变,使激光束波面发生畸变,降低了激光器质量。研究测量这些与热相关的 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $W$ 等系数的仪器,其目的是改进和指导对光学材料的研制工艺和生产。这对于提高精密光学仪器和激光器的质量是有意义的。我们选用合理的设计方案和先进的技术措施,使仪器实现了多功能的高精度测量,其主要技术指标为测量温度范围:室温 $\sim 200^\circ\text{C}$ ;测量精度: $\pm 3 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (在 $20^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ 温度范围内)。

## 二、仪器原理

把光学材料样品置于干涉仪光路中,样品两端面形成的等厚干涉和马赫-陈德尔干涉,在均匀温度场中的热膨胀系数 $\alpha$ ,折射率温度系数 $\beta$ 和热光系数 $W$ 分别为<sup>[1]</sup>

$$\alpha = (m_2 - 2m_1)\lambda / 2L\Delta T, \quad (1)$$

$$\beta = [m_2 + n(2m_1 - m_2)]\lambda / 2L\Delta T, \quad (2)$$

$$W = m_1\lambda / L\Delta T, \quad (3)$$

式中 $m_1$ 、 $m_2$ 分别为干涉条纹变化数目; $\Delta T$ 为温度变化范围; $\lambda$ 为探测光波长; $L$ 为被测样品长度, $n$ 为被测样品折射率。

对非均匀场,棒状或片状样品引入应力热光系数 $P$ 和热应力双折射系数 $Q$ 来描述光学元件的折射率变化<sup>[2,3]</sup>。通常利用空心圆棒样品建立轴对称恒定的温度场,其径向和切向偏振光测量系数 $P$ 、 $Q$ 为<sup>[4]</sup>

$$P = \frac{m_r + m_\theta}{2L\Delta T_{ab}} \lambda - \beta, \quad (4)$$

$$Q = \frac{m_r - m_\theta}{2L\Delta T_{ab}}, \quad (5)$$

式中  $m_r$ 、 $m_\theta$  分别为径向和切向偏振光的干涉条纹变化数目； $\Delta T_{ab}$  为圆棒状样品内外表面的温差。

### 三、仪器的基本结构

仪器结构如图 1 所示，光源  $S$  (或孔  $O$  进来的外接激光光源) 发出的光束，经扩束望远镜后使其口径扩大， $(\lambda/4)$  波片  $F_1$  把光束变成圆偏振光，通过偏振片  $F_2$  获得定向偏振光 (可变光阑  $L_1$  变换光束口径)，再经平面反射镜转折进入马赫-陈德尔干涉仪  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ ，被测样品  $Z$  和补偿板  $B$  分别放入干涉仪的两路中，两束光在  $P_2$  处相干，干涉条纹经平面镜  $M_4$  转折在观察窗  $E$  进行对光观察；样品  $Z$  的两端反射光形成等厚干涉。此两种干涉条纹分别经小孔光阑  $L_2$ 、 $L_3$  进入微机 TRS-80II 进行数据处理，同时 TRS-80II 机对样品的温度变化进行自动控制，最后测量结果通过荧光屏显示或打印机输出。

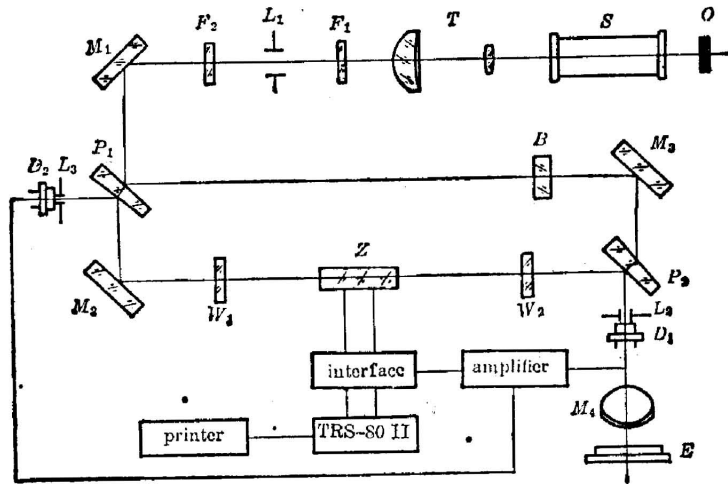


Fig. 1 Schematic diagram of system

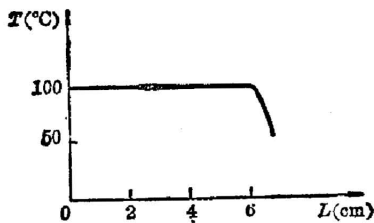


Fig. 2 Axial profile of the temperature in a sample chamber

为保证干涉条纹质量，选用马赫-陈德尔干涉仪的两个分光镜  $P_1$ 、 $P_2$  为楔形，目的使非分光面的反射光束不能进入干涉光路中，并加置光阑，以保证干涉条纹的清晰度。在干涉仪的参考光路放入补偿片  $B$ ，可调节参考光的强度，使干涉条纹具有好的对比度。采用减少热传导和防止热交换措施，以尽量减少影响干涉条纹抖动的因素。同时利用计算机软件，识别真正干涉条纹变化，排除由于振动抖动引进的误差。

为了保证样品的均匀升温，采用了轴对称电热丝

加热室和干冰致冷室,并用热容量较大的小马福作为接触升温 and 致冷,样品室内以炉中心为坐标原点的轴向温度分布如图 2 所示,(样品室轴向尺寸为 13 cm),温度精度为  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。用四个自由度的精密工作台,实现精确测量。

仪器采用 TRS-80 II 型计算机实现了温控、数据采集和处理,其原理框如图 3 所示。

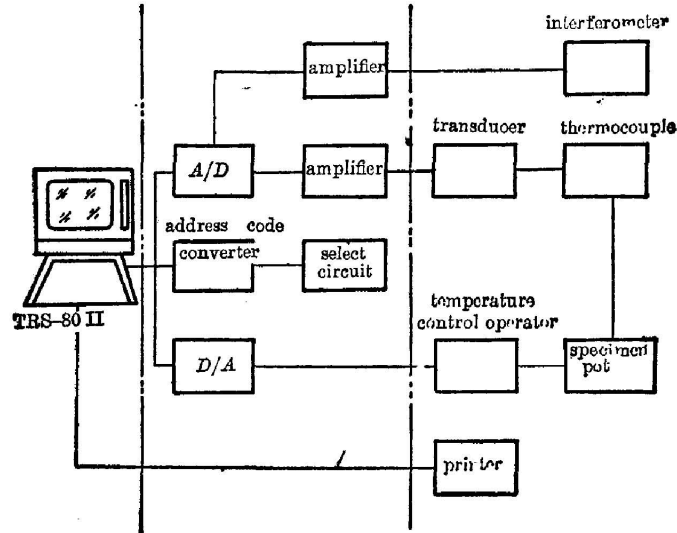


Fig. 3 Block diagram of instrument control and data collection

(1) TRS-80 II 微型机:在完成热光系数仪光路调整后,启动系数仪与 TRS-80 II 机,输入本次测量参数、温控曲线后,开始控制室温,计数干涉条纹,计算热光系数,实时显示运行参数、测试结果后,屏幕显示或打印机输出测试结果。

(2) A/D、D/A 接口板:当样品室温度按给定的温控曲线均匀升、降温时,样品的马赫-陈德尔干涉条纹与端面干涉条纹数目的变化( $M_1$ 、 $M_2$ ),经光电转换为电信号馈至直流放大器,放大得到 0~5 V 的电压模拟信号,进行 A/D 转换后,得到与条纹明暗强度相对应的数字,TRS-80 II 机立即显示条纹强度与数目的变化,从而实现了干涉条纹的自动采集与处理。

(3) 外部设备:具有自动补偿热电偶冷端温度差的温度变送器,将输入的热电偶毫伏值信号通过调制——放大——解调成线性变化的毫安值。

温度执行机构为可控硅控制器,样品室采用单相交流 220 V 加热。改变加热丝上的电压,达到调节温度的目的。

打印机为计算机输出设备,根据测试者需要,可将测试结果通过它打印输出。

#### 四、仪器测试与误差分析

利用该仪器测量 3 部分光学玻璃和激光玻璃的五个系数,其结果如表 1、表 2 所示\*。

\* 表中测量值是 10 次测量的平均值。

Table 1 Measured results ( $10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) of coefficients of  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $W$  of optical glasses

glass	temperature	$\alpha$	$\beta$	$W$	glass	temperature	$\alpha$	$\beta$	$W$
QK <sub>3</sub>	50°~100°C	9.17	-1.65	2.84	F <sub>2</sub>	-78°~20°C	7.80	1.50	5.60
K <sub>9</sub>	-78°~20°C	7.00	-0.10	3.50		20°~50°C	7.60	3.90	3.40
	20°~50°C	7.20	2.20	5.30		50°~100°C	7.60	5.10	9.60
	50°~100°C	7.40	2.40	5.90		100°~150°C	7.60	5.90	10.50
	100°~150°C	7.60	2.70	6.40		150°~200°C	7.60	6.80	11.30
	150°~200°C	7.90	2.90	6.90	F <sub>5</sub>	-78°~20°C	7.00	2.00	6.30
BaK <sub>2</sub>	-78°~20°C	7.00	-0.10	3.70		20°~50°C	7.20	4.80	9.20
	20°~50°C	8.40	0.25	4.70		50°~100°C	7.50	5.20	9.80
	50°~100°C	8.50	0.83	5.40		100°~150°C	7.50	6.20	10.90
	100°~150°C	8.60	1.48	6.10	150°~200°C	7.50	7.10	11.80	
BaK <sub>7</sub>	150°~200°C	8.80	2.01	6.80	N <sub>21</sub>	20°~50°C	10.50	-5.00	0.80
	-78°~20°C	6.10	1.20	4.60		50°~100°C	10.70	-4.40	1.40
	20°~50°C	6.80	2.87	6.85		100°~150°C	10.90	-3.80	2.10
	50°~100°C	6.90	3.20	7.10		150°~200°C	11.10	-3.40	2.25
	100°~150°C	7.20	4.03	8.14	PbMoO <sub>4</sub>	20°~50°C	10.00	-71.60	-59.20
150°~200°C	7.40	4.39	8.62	-40.70				-29.10	
ZK <sub>6</sub>					LaK <sub>2</sub>	50°~100°C	7.40	0.70	5.80
					QF <sub>1</sub>	50°~100°C	7.66	2.00	6.21
					KF <sub>3</sub>	50°~100°C	9.50	-2.80	2.20
					BaF <sub>7</sub>	50°~100°C	7.69	4.92	9.61
					ZBaF <sub>4</sub>	50°~100°C	6.49	8.52	12.82

Table 2  $P$ ,  $Q$  coefficients ( $10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) of some optical glasses

glass	$P$	$Q$	glass	$P$	$Q$
BaK <sub>1</sub>	4.3	1.0	NO <sub>4</sub>	2.7	0.8
K <sub>9</sub>	4.0	1.0	NO <sub>6</sub>	4.9	1.0
QK <sub>2</sub>	2.0	0.5	NO <sub>7</sub>	4.0	1.1
ZF <sub>6</sub>	9.7	0.4	NO <sub>8</sub>	5.5	1.0
NO <sub>1</sub>	5.0	0.8	NO <sub>9</sub>	4.2	1.0
NO <sub>2</sub>	4.8	1.0	NO <sub>10</sub>	4.6	1.0
NO <sub>3</sub>	4.1	0.9	NO <sub>22</sub>	6.1	0.5

根据仪器的测量原理公式可知,误差来自温度控制误差,干涉条纹计数误差,样品长度测量误差,激光波长漂移和样品调节误差等。其中对 100 mm 样品长度测量的相对误差为  $10^{-4}$ ; 激光波长漂移引进的相对误差为  $10^{-6}$ ; 样品调节误差,在棒状样品端面反射光斑在  $D_s$  接收器中心偏离  $\pm 2$  mm 情况下,光线在样品内产生的程差为  $n\Delta d = 6.5 \times 10^{-4}$ ,引进的相对误差在  $4 \times 10^{-8}$  左右。上述各种误差的总和约为  $2 \times 10^{-4}$ ,相对于温控误差和条纹计数误差要小得多。因此,整个仪器的误差来源主要取决于温度和条纹计数,各系数的相对误差为

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \left| \frac{\Delta m_1}{m_2 - 2m_1} \right| + 2 \left| \frac{\Delta m_2}{m_2 - 2m_1} \right| + \left| \frac{\Delta T}{T} \right|, \quad (6)$$

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} = (1-n) \left| \frac{\Delta m_2}{D} \right| + 2n \left| \frac{\Delta m_1}{D} \right| + \left| \frac{\Delta T}{T} \right|, \quad (7)$$

$$\frac{\Delta W}{W} = \left| \frac{\Delta m_1}{m_1} \right| + \left| \frac{\Delta T}{T} \right|, \quad (8)$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \left| \frac{\Delta m_r}{m_r + m_\theta} \right| + \left| \frac{\Delta m_\theta}{m_r + m_\theta} \right| + \left| \frac{\Delta T}{T} \right| + \left| \frac{\Delta\beta}{\beta} \right|, \quad (9)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \left| \frac{\Delta m_r}{m_r - m_\theta} \right| + \left| \frac{\Delta m_\theta}{m_r - m_\theta} \right| + \left| \frac{\Delta T}{T} \right|, \quad (10)$$

$$D = m_2 + n(2m_1 - m_2).$$

本仪器温度误差为  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ , 干涉条纹测量误差为  $\pm 0.5$  条纹。根据上述分析, 表 3 给出了几种光学玻璃在  $50^\circ \sim 100^\circ\text{C}$  和  $20^\circ \sim 120^\circ\text{C}$  温度变化范围内各  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $W$  系数的测量误差。表中数据说明  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $W$  的测量误差范围在  $\pm 3 \times 10^{-7}^\circ\text{C}^{-1}$  以内, 即仪器在此温度范围的测量精度为  $\pm 3 \times 10^{-7}^\circ\text{C}^{-1}$ , 利用同样方法求得  $P$ 、 $Q$  的测量误差为  $4 \times 10^{-7}^\circ\text{C}^{-1}$ 。

Table 3 Errors ( $10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ ) of  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $W$  at  $\lambda = 6328\text{\AA}$

glass	temperature	$n$	$m_1$	$m_2$	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta W$
K <sub>9</sub>	$50^\circ \sim 100^\circ\text{C}$	1.51467	46.0	208.5	$\pm 0.20$	$\pm 0.17$	$\pm 0.15$
BaK <sub>2</sub>	$50^\circ \sim 100^\circ\text{C}$	1.53808	44.0	237.0	$\pm 0.18$	$\pm 0.10$	$\pm 0.14$
BaK <sub>7</sub>	$50^\circ \sim 100^\circ\text{C}$	1.56676	61.5	241.0	$\pm 0.20$	$\pm 0.16$	$\pm 0.17$
ZK <sub>6</sub>	$50^\circ \sim 100^\circ\text{C}$	1.61260	54.5	220.0	$\pm 0.17$	$\pm 0.13$	$\pm 0.15$
F <sub>2</sub>	$50^\circ \sim 100^\circ\text{C}$	1.60955	76.5	273.0	$\pm 0.20$	$\pm 0.20$	$\pm 0.20$
F <sub>5</sub>	$50^\circ \sim 100^\circ\text{C}$	1.62080	79.0	278.0	$\pm 0.20$	$\pm 0.19$	$\pm 0.21$
ZF <sub>6</sub>	$50^\circ \sim 100^\circ\text{C}$	1.74092	112.5	356.0	$\pm 0.21$	$\pm 0.20$	$\pm 0.27$
N <sub>24</sub>	$50^\circ \sim 100^\circ\text{C}$	1.54000	11.7	198.0	$\pm 0.25$	$\pm 0.18$	$\pm 0.08$
QK <sub>3</sub>	$20^\circ \sim 120^\circ\text{C}$	1.48599	36.0	296.0	$\pm 0.15$	$\pm 0.10$	$\pm 0.07$
LaK <sub>2</sub>	$20^\circ \sim 120^\circ\text{C}$	1.68945	74.0	336.0	$\pm 0.13$	$\pm 0.07$	$\pm 0.10$
KF <sub>3</sub>	$20^\circ \sim 120^\circ\text{C}$	1.52414	27.5	294.0	$\pm 0.15$	$\pm 0.10$	$\pm 0.06$
BaF <sub>7</sub>	$20^\circ \sim 120^\circ\text{C}$	1.61098	121.5	437.5	$\pm 0.14$	$\pm 0.12$	$\pm 0.14$
ZBaF <sub>4</sub>	$20^\circ \sim 120^\circ\text{C}$	1.66045	156.0	470.0	$\pm 0.13$	$\pm 0.16$	$\pm 0.17$

仪器测量值与真值(理论值)之间的差异, 不是衡量仪器性能的唯一指标; 仪器测量值的重复性是衡量仪器的另一重要指标。多次测量的平均值与各次测量值之间的偏差是描述这一指标的参数。表 4 列出了  $F_5$  和 BaK<sub>7</sub> 玻璃分别重复 10 次测量的结果。表中列出了最大偏差, 均方根偏差和相对偏差。数据表明, 系统最大偏差约为  $\pm 1.2 \times 10^{-7}^\circ\text{C}^{-1}$ , 均方根偏差为  $\pm 6 \times 10^{-8}^\circ\text{C}^{-1}$ , 相对偏差为 1~2%。

Table 4 Accuracy range ( $10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) measurement instrument ( $50^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{C}$ )

Number	F <sub>5</sub>			BaK <sub>7</sub>		
	$\alpha$	$\beta$	$W$	$\alpha$	$\beta$	$W$
1	7.42	5.24	9.85	6.92	3.15	7.07
2	7.54	5.16	9.85	7.01	3.04	7.01
3	7.48	5.20	9.85	6.83	3.26	7.13
4	7.54	5.16	9.85	6.98	3.05	7.01
5	7.54	5.16	9.85	6.89	3.11	7.01
6	7.48	5.20	9.85	6.86	3.19	7.07
7	7.54	5.16	9.85	6.92	3.15	7.07
8	7.51	5.12	9.78	6.92	3.15	7.07
9	7.58	5.08	9.78	6.89	3.11	/ 7.07
10	7.51	5.16	9.85	6.92	3.15	7.07
mean value	7.51	5.16	9.84	6.91	3.14	7.06
max. deviation	0.09	0.08	0.06	0.10	0.12	0.07
standard deviation	0.05	0.04	0.03	0.05	0.06	0.04
relative error	0.67%	0.76%	0.30%	0.72%	1.91%	0.57%

## 五、讨 论

热光系数仪可用偏振光或自然光测量各向同性材料的  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $W$  系数，但在测量各向异性晶体材料时，必须采用偏振光，分别测量  $o$  光和  $e$  光的六个系数  $\alpha_o$ 、 $\alpha_e$ 、 $\beta_o$ 、 $\beta_e$ 、 $W_o$ 、 $W_e$ 。对钽酸铝晶体测量表明，与计算值的结果完全相符。由于干涉测量误差小。对膨胀系数测量最大误差约为  $\pm 2 \times 10^{-7}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，最大偏差为  $\pm 1 \times 10^{-7}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，方均根偏差为  $\pm 5 \times 10^{-8}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，所以该仪器也是微膨胀系数测量的有效工具。但因干涉仪材料是金属，为了避免环境温度变化的影响，要求环境温度起伏在  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  以内。

## 参 考 文 献

- [1] 黄国松等;《光学学报》,1982, 2, No. 4 (Jul), 380~384.
- [2] 激光玻璃检验组;《物理学报》,1978, 27, No. 1 (Jan), 22~42.
- [3] A. A. Мак; *ОМП*, 1971, 38, No. 9 (Сен), 42~53.
- [4] Ю. А. Агайев; *Ж П С*, 1970, 12, No. 4 (Апр), 668~684.
- [5] А. Н. 查哈里也夫斯基;《干涉仪》,(科学出版社,1966), 47~76.

## Precision measurement of thermo-optic coefficients of optical materials—A thermo-optic coefficient measuring instrument

LIU HAIQING, JIN DEYUN AND HUANG GOUSONG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 6 June 1986; revised 14 January 1987)

### Abstract

This paper describes a kind of thermo-optic coefficients measuring instrument which can be used for exact measurement of five coefficients of optical materials.

A new design which combining two kinds of interferometers, computer control and data processing and adopted, resulting in a high-precision measurement.

An accuracy of  $\pm 3 \times 10^{-7} \text{C}^{-1}$  has been achieved in measuring the thermal expansion coefficient  $\alpha$  in a low temperature region, temperature coefficient of refractive index  $\beta$  and thermo-optic coefficient  $\omega$ .

**Key Words:** thermo-optic coefficient; stress thermo-optic coefficient; bistable on-off circuit; interference of equal thickness; Mach-Zehnder interferometry.