

DOI:10.16136/j.joel.2022.06.0684

基于全光纤激光自混合干涉技术的石英玻璃热光系数测量

彭婉妮, 牛海莎*, 潘雨婷, 李 昊, 谢翟子

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

摘要: 石英玻璃被广泛运用于航空航天、医学探测、光学成像等方面的光学仪器中, 其光学性能是仪器设计时必须考虑的关键因素之一。热光系数作为重要的光学性能参数, 其改变会影响光学元件成像的质量以及探测精度, 因此石英玻璃热光系数的精确测量对仪器设计及校准十分必要。本文以单模无源石英光纤作为测量对象, 提出一种基于全光纤激光自混合干涉技术的石英玻璃热光系数测量方法。实验将纯石英单模光纤作为干涉系统外腔, 与光纤激光器熔接, 构成全光纤封闭式激光自混合干涉热光系数测量系统。通过高温加热箱给定固定温度范围, 利用干涉条纹计数法对石英玻璃热光系数进行解算。实验结果表明, 系统对热光系数的分辨率可达到 $1.6329 \times 10^{-7} / (0.1\text{ }^{\circ}\text{C})$ 。此研究结果为进一步开展石英玻璃热光系数的测量以及光纤激光器的自混合干涉应用研究奠定了基础。

关键词: 自混合干涉; 光纤激光器; 热光系数; 石英玻璃

中图分类号: TN252; TN248 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)06-0578-07

Measurement of thermo-optical coefficient of quartz glass based on all-fiber laser self-mixing interference technology

PENG Wanni, NIU Haisha*, PAN Yuting, LI Hao, XIE Zhaizi

(School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Quartz glass is widely used in optical instruments of aerospace, medical exploration, optical imaging and its optical performance is one of the key factors that must be considered in the design of the instrument. The thermo-optical coefficient is an important optical performance parameter, and its change will affect the imaging quality and detection accuracy of the optical element. Therefore, the accurate measurement of the quartz glass thermo-optical coefficient is necessary for the design and calibration of the instrument. In this paper, a single-mode passive silica fiber is used as the measurement object, and a method for measuring the thermo-optical coefficient of quartz glass based on the all-fiber laser self-mixing interference technology is proposed. In the experiment, pure silica single-mode fiber is used as the external cavity of the interference system and fused with the fiber laser to form an all-fiber enclosed laser self-mixing interference thermo-optic coefficient measurement system. A fixed temperature range is given by the high-temperature heating box, and the thermo-optical coefficient of the quartz glass is calculated by the interference fringe counting method. The experimental results show that the resolution of the system to the thermo-optical coefficient can reach $1.6329 \times 10^{-7} / (0.1\text{ }^{\circ}\text{C})$. This research result lays a foundation for further research on the measurement of the thermo-optical coefficient of quartz glass and the application of fiber laser self-mixing interference.

* E-mail: niuhs@buaa.edu.cn

收稿日期: 2021-09-27 修订日期: 2021-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(61805017)、北京市教委科技计划项目(KM202111232020)、北京市教育委员会科研计划一般项目(KM201811232006)和 2021 年度大学生创新计划资助项目

Key words: self-mixing interference; fiber laser; thermo-optical coefficient; quartz glass

1 引言

石英玻璃具有硬度高、膨胀率低、稳定性、透光性好等其他材料无法取代的物理和化学性能^[1],被广泛应用于光学^[2]、光通信^[3]、半导体^[4]及电光源^[5]等高科技领域。但是,由于热光效应的存在,使其在应用中产生了诸多限制^[6]。热光效应又被称为折射率—温度系数,定义为 dn/dT ,其中 n 代表材料折射率, T 表示温度^[7]。例如,石英玻璃在一些光学成像系统中,存在着焦距随环境温度的改变产生较大移动的现象^[8],这是由于其折射率会受到温度变化的影响,即热光效应所致;在激光探测系统中,石英元件对光的强烈非线性吸收引起热光效应,导致吸收分子在入射激光束横向产生空间重分布,对精密仪器的测量精度造成影响^[9]。因此,石英玻璃热光系数的精确测量对进一步理解材料特性及精密仪器的温度校准具有重要意义。

传统的石英玻璃的热光系数测量是通过马赫-曾德干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) 测定,利用氦氖激光器 (He-Ne) 发射光束通过扩束望远镜、偏光片、分光镜进行扩束与分光后照射元件,再通过全反射镜反射回腔内产生干涉条纹^[10]。此测量方法由于采用空间光路,光程可能由于摆放位置的不精确或受空程传播间隙的影响会出现干扰。2021年,印度理工学院物理系 DEY 等^[11]通过测量不同泵浦功率下光束的暗芯相位轮廓的非接触式方法估计了微小样品的热导率,当泵浦功率略高于阈值时,相位分布与热透镜模型一致,但在泵浦功率足够大的情况下,由于条纹图的畸变较大,这种相位提取分析法难以实现。2020年,沙特国王大学工程学院 ABDEL-RAHMAN 等^[12]利用椭圆偏光谱法测定了氧化钒薄膜在 25—65 °C 温度下的热光系数。在大约 40 °C 时,1550 nm 和 2000 nm 处测得的最高 dn/dT 分别为 $-8.4 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 、 $-1.05 \times 10^{-2}/^{\circ}\text{C}$ 。2018年,武汉光纤光缆制造中心 LI 等^[13]利用红外—飞秒激光器制作了用于测量硅基光纤布拉格光栅热膨胀和热光系数的混合传感器。通过测量 FPPI 腔长改变量和 ii 型光纤光栅光谱波长的漂移,得到了硅基光纤光栅在 30—1100 °C 温度范围内的热膨胀和热光系数。然而,此种方法分辨率对光谱仪精度要求及成本较高。2015年,清华大学精密测量研究所 ZHENG 等^[14]提出了一种基于激光自混合干涉的材料热膨胀系数非接触式测量方法。采用

外差相位测量技术,利用两个 1064 nm 的 Nd:YAG 固体激光器分别通过一对声光调制器对光束频率进行偏移后入射进两侧打有对称均匀圆孔的马费炉并将样品放置于内,通过样品表面的散射光回到谐振腔内产生位移测量信号,测量了 45 号钢从室温到 748 K 温度范围的热膨胀系数。该系统具有较高灵敏度,且具有自补偿结构,但是由于炉膛内的空气扰动和高温下的表面氧化引起较大测量误差,以至于该系统的测量精度并不优越,最大误差为 $2.97 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

本文提出一种全光纤封闭式基于激光自混合干涉技术 (self-mixing interference, SMI) 的石英玻璃热光系数测量系统,搭建以 3 个波长匹配的光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 分别作为谐振腔参考镜 (FBG₁)、反射镜 (FBG₂) 和回馈镜 (FBG₃) 的光纤激光自混合干涉系统,在 FBG₁ 与 FBG₂ 中熔接一段掺铒光纤作为谐振腔增益介质,在 FBG₂ 和 FBG₃ 之间熔接待测单模无源石英光纤,通过回馈镜 FBG₃ 将外腔中的激光反射回激光器谐振腔中,构成封闭式自混合干涉测量系统。将石英光纤放置于高温加热箱内给定 44.5—400 °C 的温度范围,并同时将其 K 型热电偶作为参考和标准温度测量元件放置其内记录实时温度,通过采集干涉系统条纹变化数目解算温度对石英光纤折射率的变化规律。实验结果与参考文献 [15] 总结出的不同实验所得石英玻璃热物性数据进行了比对。

2 基本原理

石英玻璃的热光系数和热膨胀系数可分别表示为:

$$\alpha_n = \frac{\Delta n}{\Delta T \cdot n}, \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{\Delta L}{\Delta T \cdot L}, \quad (2)$$

式中, ΔT 为温度改变量, $\frac{\Delta L}{\Delta T \cdot L}$ 为折射率相对变化量, $\frac{\Delta L}{L}$ 为石英玻璃在热胀冷缩作用下长度随温度变化的相对变化量。

则石英光纤有效折射率 n 和长度 L 随温度的变化关系分别表示为:

$$n(T) = n_0 + \alpha_n (T - T_0) \cdot n_0, \quad (3)$$

式中, $n(T)$ 和 n_0 分别是 T 和 T_0 时的光纤折射率, α_n 表示石英光纤的热光系数。

$$L(T) = L_0 + \zeta (T - T_0) \cdot L_0, \quad (4)$$

式中, $L(T)$ 和 L_0 分别是 T 和 T_0 时的光纤长度, ζ 表示石英光纤的热膨胀系数。

折射率 n 和长度 L 随温度改变会引起石英玻璃传播光路产生光程差 ΔL , 表示为:

$$\begin{aligned} \Delta l &= |nL - n_0 L_0| = |[n_0 + \alpha_n(T - T_0) \cdot n_0] \times \\ &[L_0 + \zeta(T - T_0) \cdot L_0]| = \\ &|(\alpha_n + \zeta)(T - T_0)n_0 L_0 + (\alpha_n \cdot \zeta)(T - T_0)^2 n_0 L_0|, \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $(T - T_0)^2 n_0 L_0$ 项的系数, 约为 -12 次方可忽略不计, 因此式(5)可以表示为:

$$\Delta l = |nL - n_0 L_0| = |(\alpha_n + \zeta)(T - T_0)n_0 L_0|. \quad (6)$$

通过查阅技术手册^[16]可知, 石英玻璃的膨胀系数极小, 在 $0-1000^\circ\text{C}$ 范围内, 为 $5.4 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$, 比热光系数小一个量级, 因此温度引起的光程差的变化主要来自于热光系数的改变; 若能测得石英玻璃光程的改变量, 则可精确测得其热光系数。利用激光自混合干涉技术可通过干涉条纹计数法精确解算出光程改变量。结合光纤损耗小、灵敏度高、微小质轻、抗电磁干扰等特点, 可构成全光纤封闭式传输测量系统。

图 1 为全光纤激光自混合干涉石英玻璃热光系数测量系统模型, 具有高反射率的光纤光栅 FBG_1 , FBG_2 构成光纤激光器的谐振腔, 反射率分别为 r_1 , r_2 , 谐振腔长度为 D , 低反射光纤光栅 FBG_3 的反射率为 r_3 , L 是外腔的长度。由光纤激光器发出的激光束被 FBG_3 反射, 一部分激光输出又被原路反射回激光腔内, 从而产生激光自混合效应。

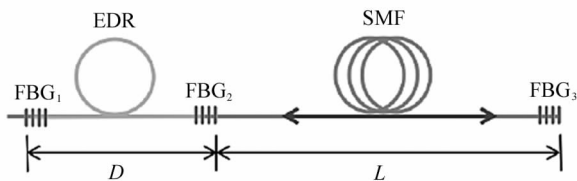


图1 全光纤激光自混合干涉石英玻璃热光系数测量系统模型

Fig. 1 Measurement system model of thermo-optical coefficient of quartz glass with all-fiber laser self-mixing interferometry

采用激光自混合干涉系统测量热光系数, 光纤激光器自混合干涉的角频率和输出功率可以表示为:

$$\omega\tau = \omega_0\tau + C\sin[\omega\tau - \arctan(\alpha)], \quad (7)$$

$$I = I_0[1 + m\cos(\phi)], \quad (8)$$

$$\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda}, \quad (9)$$

式中, $\omega_0\tau$ 和 I_0 分别为无反馈光的角频率和功率, α 为线宽增强系数, m 为波动系数, C 为光反馈参数, ϕ

为光束在外腔中的相位延迟。

$$|\Delta\phi| = |\Delta 4\pi nL/\lambda| = N \times 2\pi, \quad (10)$$

$$|nL - n_0 L_0| = N \times \frac{\lambda}{2}. \quad (11)$$

由式(10)、式(11)可得, 当激光器的外腔光程长变化 $\lambda/2$ 个长度时对应一个自混合干涉条纹。

所以, 当温度为 $T^\circ\text{C}$ 时, 由式(6)、(11)可得:

$$\begin{aligned} \Delta l &= |nL - n_0 L_0| = |(\alpha_n + \zeta)(T - T_0)n_0 L_0| = \\ &N \times \frac{\lambda}{2}, \end{aligned} \quad (12)$$

则

$$\alpha_n + \zeta = \frac{N \times \frac{\lambda}{2}}{(T - T_0)n_0 L_0}, \quad (13)$$

由此可得:

$$\alpha_n = \frac{N \times \frac{\lambda}{2}}{(T - T_0)n_0 L_0} - \zeta, \quad (14)$$

式中, n_0 , L_0 已知, 温度 T , T_0 可用 K 型热电偶测出, 精度为 0.1°C , 条纹变化数目 $N \times \frac{\lambda}{2}$ 由光电探测器

输入进数据采集卡并利用 Labview 程序采集干涉波形, 送入 Matlab 程序进行计数, ζ 在 $0-1000^\circ\text{C}$ 范围内的变化可忽略, 因此可通过自混合干涉系统测得热光系数。同时, 该系统可通过增加外腔长度 L_0 增大测量精度。

3 实验与分析

3.1 实验装置

采用 248 nm 的准分子激光器对 3 个光纤光栅进行刻蚀, 相位掩模版波长在 1556 nm , 其反射光谱如图 2 所示(光谱分析仪 Yokogawa AQ6370D, 分辨率 0.02 nm)。光纤光栅 FBG_1 , FBG_2 作为激光器谐

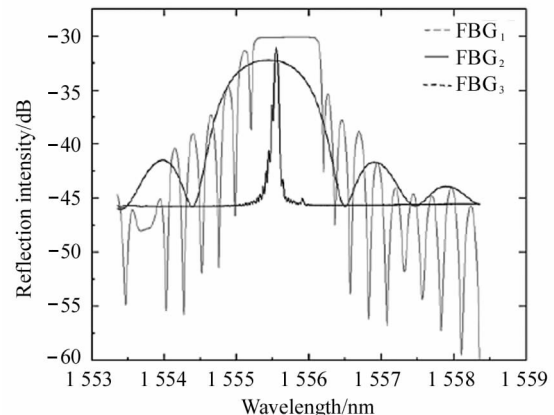


图 2 FBG_1 , FBG_2 和 FBG_3 的反射光谱图

Fig. 2 Spectra of reflection of FBG_1 , FBG_2 and FBG_3

振腔反射镜,反射波长为 1555.549 nm,反射率分别为 99.9%和 77%。FBG₃ 为系统回馈镜,反射率为 56%,刻蚀长度约 1 cm,3 dB 带宽约 1.21 nm。

该系统输出波长为 1555.549 nm,图 3 为全光纤自混合干涉系统输出光谱图。

全光纤激光自混合干涉石英玻璃热光系数测量系统的结构如图 4 所示,带单模尾纤输出的 976 nm 半导体激光器 (laser diode, LD) 发出的光经 980/1550 波分复用器 (wavelength division multiplexer, WDM) 激发一段 0.775 m 长的掺铒光纤 (Nufern 公司, EDFL-980-HP), 所用的掺铒光纤在 1530 nm 处的吸收系数约为 25.8 dB/m,总损耗约为 20 dB。将待测纯石英单模光纤 (Corning 公司, SMF-28e) 与 FBG₂ 与 FBG₃ 连接构成激光器的外腔,石英单模光纤既作为待测元件又作为系统传输元件。其中,部分激光被 FBG₃ 反射回腔内,和腔内光场发生作用,调制激光器的输出功率与频率,调制后的激光通过波分复用器由光纤准直器 (Coupler) 准直后输出,通

过光电探测器 (photo detector, PD) 将光信号转换为电信号,传输到数据采集卡 (NI 公司, USB-6211), 并利用 Labview 程序采集干涉波形,之后采用 Matlab 程序解算出干涉条纹数目以及温度致使石英光纤折射率改变量,绘制出光程曲线。

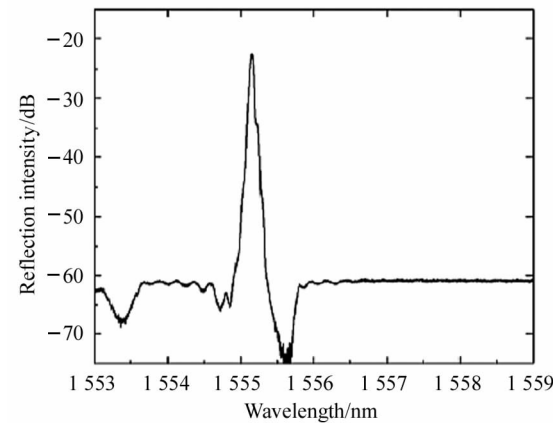


图 3 全光纤自混合干涉系统输出光谱图

Fig. 3 Spectra of all-fiber self-mixing interference system

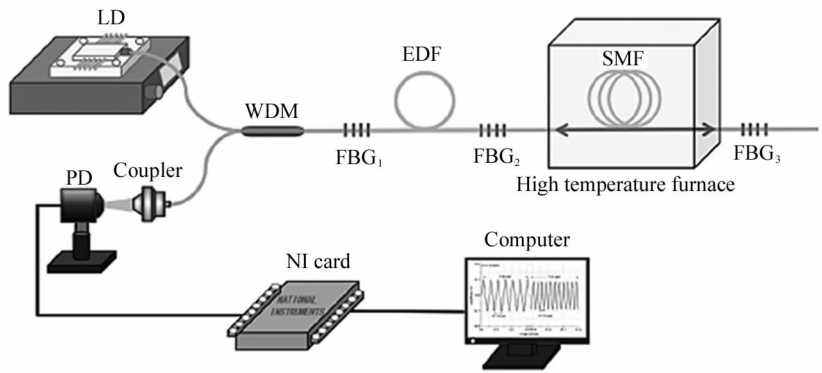


图 4 全光纤激光自混合干涉石英玻璃热光系数测量系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of the thermo-optical coefficient measurement system of all-fiber laser self-mixing interference quartz glass

3.2 实验测试与结果分析

由于自混合干涉系统外腔长度的不同,会影响系统精度。因此,实验前为选取最佳测量精度,选取 5 段不同长度的纯石英单模光纤,分别为 1 m、2 m、3 m、4 m、5 m,将激光器外腔段的单模光纤放置在加热台上给定 30—35 ℃ 温度范围,实验结果如图 5 所示,由于理论上外腔长度越长系统精度越高,但当外腔长度的达到 5 m 时,干涉条纹出现凹陷,且由实验结果表明,4 m 外腔响应良好且条纹具有一定方向性,所以最终选择 4 m 的石英光纤作为外腔及测量对象。

本次实验采用带单模尾纤输出的 976 nm 的 LD

对光纤激光器进行泵浦,电流设置为 117 mA,外腔中采用纯石英单模光纤,其 n_0 为 1.4682,实验前将石英光纤通过高温加热箱外部小孔放置于内,并将 K 型热电偶一并放入其中,记录下高温箱的实时温度。数据采集采用 NI 公司的 USB-6211 型号的采集卡,并利用 Labview 采集程序采集波形,将高温加热箱从 40—400 ℃ 持续加热,采集输出干涉条纹数目,干涉波形如图 6 所示。图 7 为 44.5—400 ℃ 内干涉条纹数目变化。

通过解算不同温度范围内干涉条纹数目,即温度致使折射率走过路程差带入式 (14) 解算出热光系数如图表 1 所示,其曲线图如图 8 所示。

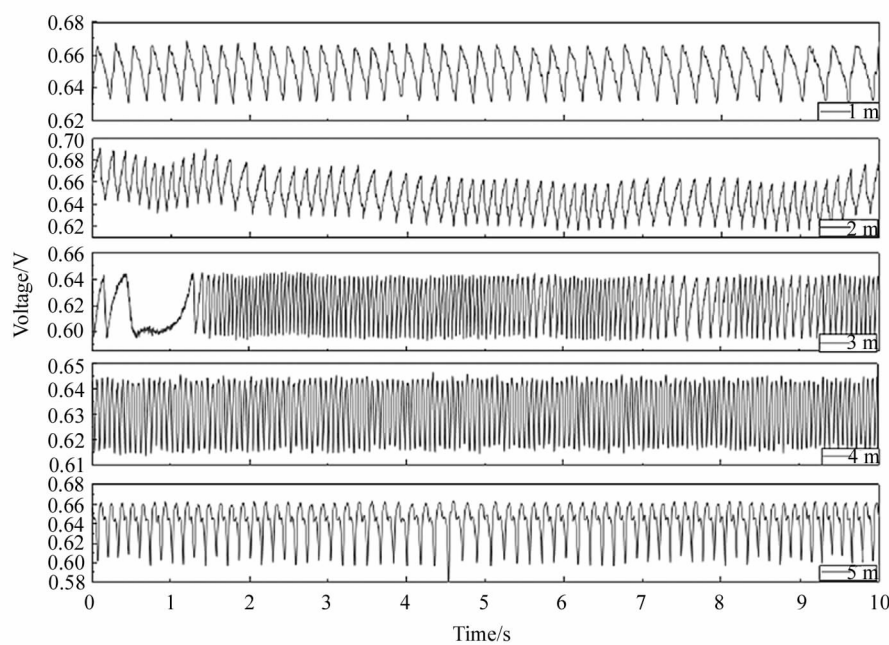


图 5 外腔长 1 m、2 m、3 m、4 m、5 m 时干涉信号

Fig. 5 Interference signal when the length of external cavity is 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m

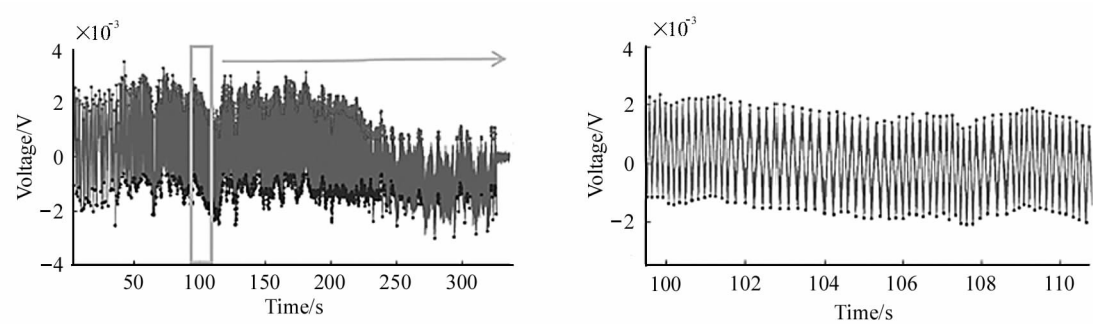


图 6 44.5—400 °C 时干涉波形

Fig. 6 Interference waveform at 44.5—400 °C

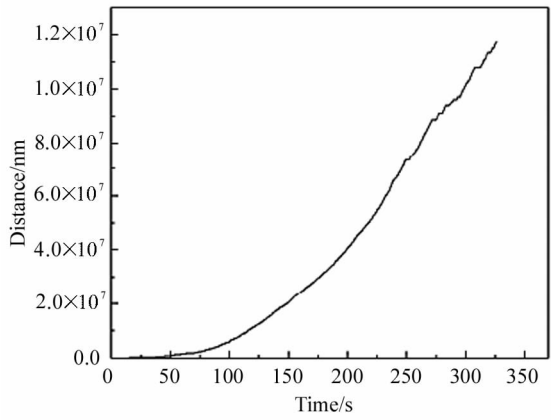


图 7 44.5—400 °C 内干涉条纹数目变化

Fig. 7 Variation in the number of interference fringes between 44.5 °C and 400 °C

表 1 不同温度范围内热光系数解算

Tab. 1 Calculation of thermal-optical coefficient in different temperature range

α_n /°C	$N \times \lambda / 2$ /nm	$T / ^\circ\text{C}$	$T_0 / ^\circ\text{C}$
0.3785×10^{-6}	2.9504×10^4	50	44.5
2.6993×10^{-6}	1.0500×10^6	100	44.5
2.8474×10^{-6}	2.0872×10^6	150	44.5
3.0456×10^{-6}	3.2564×10^6	200	44.5
3.5282×10^{-6}	4.8827×10^6	250	44.5
3.8656×10^{-6}	6.5742×10^6	300	44.5
4.0622×10^{-6}	8.2116×10^6	350	44.5
5.1108×10^{-6}	11.7328×10^6	400	44.5

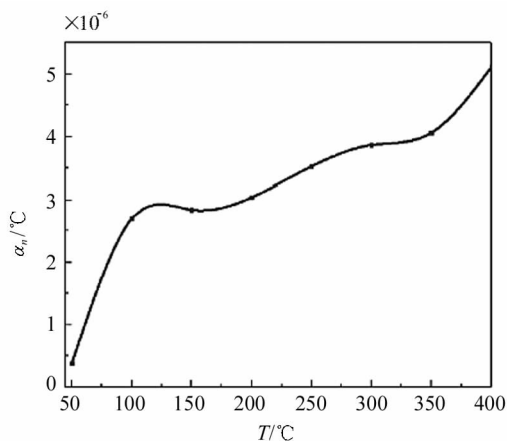


图8 44.5—400 °C内热光系数曲线图

Fig. 8 Graph of thermal light coefficient at 44.5—400 °C

4 误差分析

误差来源是由多个因素共同影响的,第一个因素为数据处理方面的误差,随着温度的升高,光纤的热膨胀系数不是一个常量,而是会有微小的变化,在0—400 °C范围内,石英玻璃的热膨胀系数变化曲线如图9所示^[16],当热膨胀系数每增加 $1 \times 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$ 时,一个干涉条纹对应的热光系数相应地减少 $1 \times 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$,而在处理数据的过程中,热膨胀系数因为变化较小所以当作常量来处理。除了数据处理方面带来的计算误差,测量系统本身也会对测量结果产生影响,掺铒光纤激光器在该测量系统里不是一个独立的、波长稳定的光源,而是作为测量光路的一部分,其稳定性对测量结果也会带来一定的影响,产生测量误差。光纤激光器的频率 $f=c/\lambda$, c 为真空中的光速, $c=3 \times 10^8$ m/s,波长为1550 nm的激光器的中心频率为 1.935×10^5 GHz,激光器频率波动差为 $\Delta f=c(\lambda_2-\lambda_1)/(\lambda_1\lambda_2)$,波长1550 nm光纤激光器输出激光频率波动在5 MHz左右,由式(14)可知频率波动引起的热光系数的误差在 $9.5 \times 10^{-8}/(0.1^{\circ}\text{C})$ 数量级;

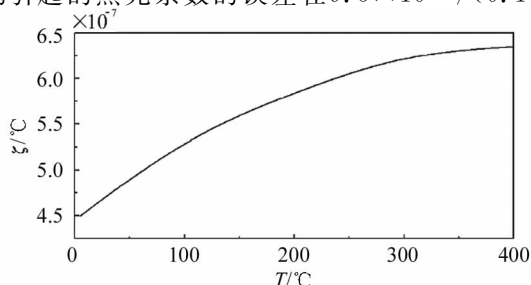


图9 0—400 °C热膨胀系数变化曲线图

Fig. 9 Variation curve of thermal expansion coefficient at 0—400 °C

最后,本文系统设计采用了闭合光纤元件一体熔接,不需要进行光路对准程序,对机械震动表现得十分稳定,但是光纤固定在高温炉内,会受到一些应力的影响,从而产生误差,且系统未封装,环境因素会引起系统误差。

5 结论

石英玻璃在精密仪器中的广泛应用使其热光系数的精确测量十分必要。本文提出一种全光纤封闭式基于激光自混合干涉的石英玻璃热光系数测量系统,该方法利用一对波长匹配的光纤光栅作为激光器谐振腔,激光腔中熔接一段掺铒光纤作为增益介质,将待测纯石英单模光纤作为激光回馈系统的外腔放置于高温加热箱内给定44.5—400 °C温度范围,并将热电偶放置其内记录下实时温度。在外腔末端熔接与激光器波长匹配的反射光栅作为回馈系统的回馈镜,将外腔中的激光反射回激光器谐振腔中,构成封闭式自混合干涉石英玻璃热光系数测量系统。实现了44.5—400 °C内石英玻璃热光系数的测量,其分辨率达到了 $1.6329 \times 10^{-7}/(0.1^{\circ}\text{C})$ 。

参考文献:

- [1] WILM K, FRISCHAT G H. Coating and diffusion studies to improve the performance of silica glass crucibles for the preparation of semiconducting silicon single crystals[J]. Glass Technology-European Journal of Glass Science and Technology Part A, 2006, 47(1): 7-14.
- [2] DOMENEGUETI J F, ANDRADE A A, PILLA V, et al. Simultaneous measurement of thermo-optic and thermal expansion coefficients with a single arm double interferometer[J]. Optics Express, 2017, 25(1): 313-319.
- [3] ZHANG P, CHEN L, WANG F, et al. A high precision scheme for micro-channel processing in quartz glass using femtosecond laser[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2017, 59(8): 1993-2000.
- [4] SUN Y C, SONG X F, ZHANG X Q, et al. Silica glass for inertial navigation system[J]. Navigation and Control, 2019, 18(5): 1-10+48+131.
孙元成, 宋学富, 张晓强, 等. 惯性导航系统用石英玻璃材料[J]. 导航与控制, 2019, 18(5): 1-10+48+131.
- [5] WANG X, ZHANG X D. Laser and vision measurement research on parameters of miniature quartz plate-sensitive glass part[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(6): 1450-1455.
- [6] DUPOUY P E, BUCHNER M, PAQUIER P, et al. Interferometric measurement of the temperature dependence of an

- index of refraction; application to fused silica[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(4): 678-82.
- [7] ADAMOVSKY G, LYUKSYUTOV S F, MACKEY J R, et al. Peculiarities of thermo-optic coefficient under different temperature regimes in optical fibers containing fiber Bragg gratings [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(5): 766-773.
- [8] DOBEK K, BARANOWSKI M, KAROLCZAK J, et al. Thermal lens in a liquid sample with focal length controllable by bulk temperature [J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(5): 1-6.
- [9] GAO H, JIANG Y, CUI Y, et al. Investigation on the thermo-optic coefficient of silica fiber within a wide temperature range [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(24): 5881-5886.
- [10] HUANG G S, CHEN S Z. Thermo-optic properties of optical glass [J]. *Acta Optica Sinica*, 1982, 2(4): 380-384.
黄国松, 陈世正. 光学玻璃的热光性质 [J]. *光学学报*, 1982, 2(4): 380-384.
- [11] DEY S, RALLABANDI S, SINGH S, et al. Study of a dark core beam generated by nonlinear thermo-optical effect [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 134: 106652.
- [12] ABDEL-RAHMAN M, BAHIDRA E, ABAS A F. Vanadium-oxide-based thin films with ultra-high thermo-optic coefficients at 1 550 nm and 2 000 nm wavelengths [J]. *Materials*, 2020, 13(8): 2002.
- [13] LI L, LV D, YANG M, et al. A IR-femtosecond laser hybrid sensor to measure the thermal expansion and thermo-optical coefficient of silica-based FBG at high temperatures [J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 359.
- [14] ZHENG F, TAN Y, LIN J, et al. Study of non-contact measurement of the thermal expansion coefficients of materials based on laser feedback interferometry [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(4): 043109.
- [15] SERGEEV O A, SHASHKOV A G, UMANSKII A S. Thermophysical properties of quartz glass [J]. *Journal of Engineering Physics*, 1983, 43(6): 1375-1383.
- [16] Quartz glass compilation group. Quartz glass [M]. Beijing: China Architecture and Architecture Press, 1975: 3-19.
《石英玻璃》编写组编. 石英玻璃 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1975: 3-19.

作者简介:

牛海莎 (1984—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事精密仪器测量方面的研究。