

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.05.06

一种用于线膨胀系数测量的高稳定性激光干涉系统

任冬梅, 兰一兵, 段小艳, 万宇

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍了一种可以对材料长度变化进行测量的高稳定性双光程激光干涉系统, 由于该干涉系统的测量光路和参考光路具有相似的传播路径, 光程差仅由被测试样的长度引起, 干涉系统具有较强的抵抗环境温度变化和振动等外界干扰的能力。通过平晶反射膜测量试验, 对干涉系统的稳定性进行了验证, 结果表明在 6.5 h 内测量数据的标准偏差为 4.2 nm。该激光干涉系统可用于材料尺寸变化(如线膨胀系数)的高准确度测量。

关键词: 激光干涉仪; 测量; 线膨胀系数; 高稳定性

中图分类号: TB921

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)05-0037-03

A High Stability Laser Interferometer for Measurement of Coefficient of Linear Thermal Expansion

REN Dongmei, LAN Yibing, DUAN Xiaoyan, WAN Yu

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: A high stability double-pass laser interferometer that can be used for measuring the length changes of materials is introduced. Since the measurement beam and the reference beam of the interferometer have similar traveling paths and the optical path difference is mainly caused by the sample itself, the interferometer has strong resistance to external disturbances such as ambient temperature changes and vibration. The stability of the system is verified by the experiment of measuring the reflection film of a plane mirror, which shows that the standard deviation of the measurement data is 4.2 nm in 6.5 h. This interferometer can be used for high-accuracy dimensional change measurement such as the measurement of the coefficient of linear thermal expansion of materials.

Key words: laser interferometer; measurement; coefficient of linear thermal expansion; high stability

0 引言

低膨胀材料在高精度仪器设备的关键结构设计中得到了广泛的应用, 其线膨胀系数的精确测量对这类结构的设计和应用至关重要。由于低膨胀材料的线膨胀系数较小, 要对其进行准确测量, 就要求试样长度变化的测量具有很高的准确度, 通常的一些线膨胀系数测量方法已不能满足其测量需求。在各种高准确度线膨胀系数测量方法中, 激光干涉测量技术因其测量灵敏度高和量值可溯源等优点引起了国内外许多研究者的兴趣, 各种各样的基于激光干涉技术的线膨胀系数测量装置^[1-7]相继被研制出来, 所用的干涉仪类型包括迈克尔逊干涉仪、斐索干涉仪和法布里-珀罗干涉仪等^[8-10]。如何在保持高灵敏度的同时提高干涉系统的稳定性是提高干涉法测量线膨胀系数准确度的一个关键, 为此, 在干涉仪光学系统结构设计中保证其具

有高稳定性和强抗干扰能力是必不可少的。本文介绍了一种可用于低膨胀材料线膨胀系数测量的高稳定性激光干涉系统。

1 干涉系统的工作原理

针对低膨胀材料线膨胀系数测量的需求, 设计了一种具有准共光路结构的双光程激光干涉系统, 可实现对被测试样的双端测量, 其工作原理如图 1 所示。

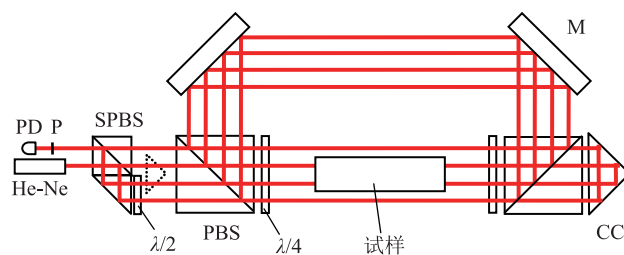


图1 激光干涉系统的工作原理示意图

在测量过程中,由稳频 He-Ne 激光器发出的光束被小偏振分光镜 (SPBS) 分为两束,透过该分光镜的光束为测量光束,被该分光镜反射的光束为参考光束。测量光束通过左侧大偏振分光镜 (PBS) 和 $\lambda/4$ 波片后被试样的左端面反射,然后反向通过 $\lambda/4$ 波片,经左侧大偏振分光镜、两块平面反射镜 (M) 和右侧大偏振分光镜反射后通过 $\lambda/4$ 波片,被试样的右端面反射,反向经过 $\lambda/4$ 波片后通过右侧大偏振分光镜,被角锥棱镜 (CC) 反射回来;然后,测量光束沿反方向通过由两块大偏振分光镜、两块平面反射镜和被测试样组成的测量回路,在试样的右端面和左端面各反射一次后,通过左侧大偏振分光镜,经过 $\lambda/2$ 波片和直角棱镜,回到小偏振分光镜。与此同时,参考光束经直角棱镜转折后通过 $\lambda/2$ 波片,与测量光束平行地通过左侧大偏振分光镜,经过两个 $\lambda/4$ 波片,被右侧大偏振分光镜、两块平面反射镜和左侧大偏振分光镜反射后,再次经过两个 $\lambda/4$ 波片,透过右侧大偏振分光镜,被角锥棱镜反射回来;然后,参考光束以反方向通过由两块大偏振分光镜和两块反射镜组成的参考回路,最后通过左侧大偏振分光镜,回到小偏振分光镜。测量光束与参考光束在小偏振分光镜处相遇,两束光通过偏振片射向光电接收器,干涉信号经光电转换后送至信号处理系统。

2 干涉系统的特点分析

图 1 所示的光学系统虽然结构比较复杂,但以其建立的激光干涉系统在用于试样长度变化测量时仍具有以下优点:首先,该干涉系统具有准共光路结构,除试样本身长度所引起的光程差外,测量光束和参考光束具有相等的名义光程长度,两束光也具有相似的传播途径;这种准共光路结构一方面可以减小由环境条件变化引起的空气折射率变化对测量结果的影响,另一方面也使得环境温度变化和振动等外界因素引起的光学系统微小结构变化对测量光束和参考光束的影响能够相互抵消,因此,光学系统具有较强的抗干扰能力。其次,在测量过程中测量光束在试样的两个端面各反射两次,参考光束相应地在试样的两旁各经过两次;这种双光程干涉仪的光学分辨力为 $\lambda/4$ (λ 为激光波长),较通常的单光程激光干涉仪提高一倍,同时干涉信号对测量过程中试样的微小姿态变化不敏感,易于保持测量信号的稳定。最后,将被测试样放置在两个大偏振分光镜之间,在实现用单一干涉系统对试样进行双端测量的前提下,能够尽可能减小光程长度。

通过上述分析可以看出,图 1 所示的光学系统结构形式有利于提高干涉系统的稳定性。

3 干涉系统稳定性试验

根据图 1 所示原理建立的激光干涉系统试验装置如图 2 所示,为了考察干涉系统的稳定性,以在平晶表面所镀的反射膜作为试样进行了测量试验。所用平晶的一个表面中间镀有反射膜,周围留有一环形透光区域,反射膜的厚度为几百纳米。在试验过程中,将平晶安装在被测试样的位置,测量光束在反射膜的正反两面反射,参考光通过平晶的透光区域。这样,反射膜就相当于一个长度很小的试样,在温度控制良好的情况下,反射膜的厚度变化可以忽略,因此,反射膜厚度的测量结果就可以作为对干涉系统稳定性的一种估计。图 3 所示为在温度为 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 的调温实验室环境下进行的反射膜测量试验的结果,可以看出,在 6.5 h 内测量数据的峰-谷值和标准偏差分别为 18.3 nm 和 4.2 nm,在测量过程中每小时测量数据的最大变化为 -10.2 nm。

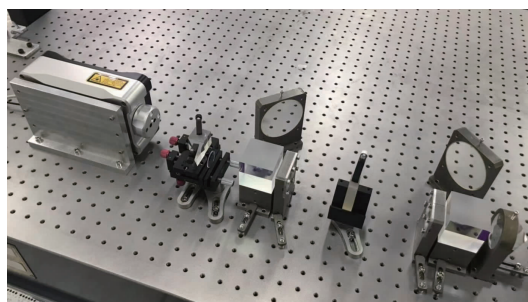


图 2 激光干涉系统试验装置

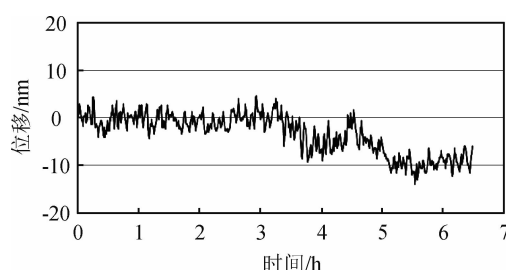


图 3 测量结果

作为比较,在图 1 所示光学系统的左侧大偏振分光镜前放一个小角锥棱镜(如图 1 中虚线所示),使测量光束经小角锥棱镜反射后直接返回小偏振分光镜,与参考光束发生干涉,通过这种方法对参考光束的光程变化进行了观察。在相似的试验条件下,测量数据

在 1 h 内的漂移可达 400 nm 以上, 远大于图 1 所示准共光路式干涉系统给出的测量结果。

以上试验结果表明, 采用图 1 所示的准共光路式光学系统能够显著地提高激光干涉系统的稳定性。在上述调温实验室环境下, 反射膜的尺寸变化可以忽略, 图 3 中干涉系统读数的变化主要反映了由于气压和温度改变所引起的干涉系统的微小变化。如果将干涉系统置于真空室内, 测量结果有望得到进一步的改善。

4 结论

本文介绍了一种用于对材料长度变化进行高准确度测量的双光程激光干涉系统, 并对其特点进行了分析; 该系统采用准共光路式光学系统, 从原理上保证测量系统具有较强的抗干扰能力, 仅用单一干涉系统即实现了对试样的双端测量; 通过测量平晶反射膜在室温下的变化, 对干涉系统的稳定性进行了初步验证, 试验结果显示在 6.5 h 内测量数据的标准偏差为 4.2 nm, 表明该干涉系统具有很高的稳定性。下一步将对该干涉系统在真空环境下的长期稳定性以及试样温度变化对干涉系统的影响进行深入研究, 为其在低膨胀材料线膨胀系数测量中的应用提供参考。

参考文献

- [1] Schödel R. Ultra-high accuracy thermal expansion measurements with PTB's precision interferometer[J]. Meas. Sci. Technol., 2008, 19: 084003.
- [2] Bennett S J. An absolute interferometric dilatometer [J]. J. Phys. E: Sci. Instrum., 1977, 10: 525 - 530.
- [3] Cordero J, Heinrich T, Schuldt T, et al. Interferometry based high-precision dilatometry for dimensional characterization of highly stable materials [J]. Meas. Sci. Technol., 2009, 20: 095301.
- [4] Suska J and Tschirnich J. An interferometric device for precise thermal expansion measurements on bar-shaped material [J]. Meas. Sci. Technol., 1999, 10: N55 - 59.
- [5] Bianchini G, Barucci M, Del Rosso T, et al. Interferometric dilatometer for thermal expansion coefficient determination in the 4 ~ 300 K [J]. Meas. Sci. Technol., 2006, 17: 689 - 694.
- [6] Okaji M, Yamada N and Moriyama H. Ultra-precise thermal expansion measurements of ceramic and steel gauge blocks with an interferometric dilatometer [J]. Metrologia, 2000, 37: 165 - 171.
- [7] 孙建平, 范开果, 荆卓寅等. 基于激光干涉法精密测量材料线膨胀系数装置的研究 [J]. 计量学报, 2008, 29(SI): 164 - 167.
- [8] Wolff E G and Savedra R C. Precision interferometric dilatometer [J]. Rev. Sci. Instrum., 1985, 56: 1313 - 1319.
- [9] Tompkins S S, Bowles D E and Kennedy W R. A Laser-interferometric dilatometer for thermal-expansion measurements of composites [J]. Experimental Mechanics, 1986, 26: 1 - 6.
- [10] 任冬梅, 万宇, 谢春玉. 测量线膨胀系数的光学干涉方法 [J]. 计测技术, 2011, 31(2): 52 - 55.

收稿日期: 2019 - 09 - 12; 修回日期: 2019 - 09 - 24

基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2016205C003)

作者简介



任冬梅(1964 -), 女, 研究员, 博士, 研究领域为微纳米测量技术和光学仪器, 承担科研项目 10 余项, 获得省部级科技奖 4 项。