

激光自混合显微系统的设计及实验研究*

杨新建 朱 钧 刘 刚 张书练

(清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 论述了自混合干涉技术的发展历程,并引入了自混合干涉显微技术的实验原理和研究近展;建立了 He-Ne 激光自混合干涉实验装置系统,获得了稳定的激光功率输出。然后,对基于激光自混合干涉技术的显微镜进行了研究,并详细给出了该系统的设计原理、装调方法和实验结果,得到了玻璃小球的三维形体信息图像。系统达到的横向分辨力 $1\ \mu\text{m}$,纵向分辨力为 $15\ \text{nm}$ 。上述实验结果证明自混合显微镜在微小物体的高精度形貌成像方面有着很大的潜力。

关键词: 应用光学; 显微镜; 激光; 自混合干涉效应

中图分类号: TN249 文献标识码: A

Design and Experimental Study of Laser Self-Mixing Microscopic System

Yang Xinjian Liu Gang Zhu Jun Zhang Shulian

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 18 December 2002; revised 11 Pril 2003)

Abstract: The progress of laser self-mixing technology is reviewed. Theory and recent research in the microscopic technology based on laser self-mixing interference effect is introduced. The experimental system of the self-mixing interference with He-Ne laser is established and satisfying power stability of the system is obtained. The microscope based on the laser self-mixing technology is investigated. The design, structure, adjustment and experimental result of laser self-mixing microscopic system is given. Finally the profile of the micro-ball made of glass is three-dimensionally imaged. The lateral resolution is $1\ \mu\text{m}$ and longitudinal resolution is $15\ \text{nm}$. It's proved that the microscope based on laser self-mixing interference effect has great potential in the field of high-resolution imaging on the micro-objects.

Key words: applied optics; microscope; laser; self-mixing interference effect

1 引 言

激光自混合干涉是指在激光应用系统中,激光器输出光被外部物体反射或散射后,其中一部分光又反馈回激光器谐振腔,反馈光携带外部物体信息,与腔内光相混合后,调制激光器的输出功率,因输出信号特点与传统的双光束干涉信号有相似之处,故称之为自混合干涉效应^[1]。

将激光自混合干涉原理应用于测量领域可认为是从 20 世纪 80 年代开始的,包括多普勒速度测量系统,逐渐又进行了对距离、位移等的测量研究。此外,自混合干涉效应在显微技术中也有应用^[2,3]。

用激光自混合扫描干涉仪对样品表面扫描测量时,我们通过电子反馈和压电陶瓷控制系统使每个测量点的激光稳定输出功率为一个固定的数值,称之为“零位”,保持每一时刻激光器稳定输出光强为恒定值,如图 1(a)所示即 M_1 与 M_3 之间的光程通过回馈机制始终为一个定值,此时压电陶瓷的伸长量的变化即反映待测样品的表面形状起伏。我们称这种输出方式为恒定功率输出法。这种方法可以使

* 国家科技部(GN99-5)与清华大学校基金(JZ2001007)资助课题。

E-mail: yangxinjian01@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2002-12-18;收到修改稿日期:2003-04-11

光输出功率随待测物体形貌起伏而单调变化,故能够解决传统干涉仪测量中的判向问题,并且具有很高的轴向分辨率与精度,如图 1(b)所示为激光器输出光强(P)随压电陶瓷(PZT)的伸长量(L)的变化关系。当 L 变化为半个波长时,正好对应于输出功率变化的一个周期,取 O 点为恒定功率零点,即当输出光功率偏移 O 点时,我们通过压电陶瓷的伸缩

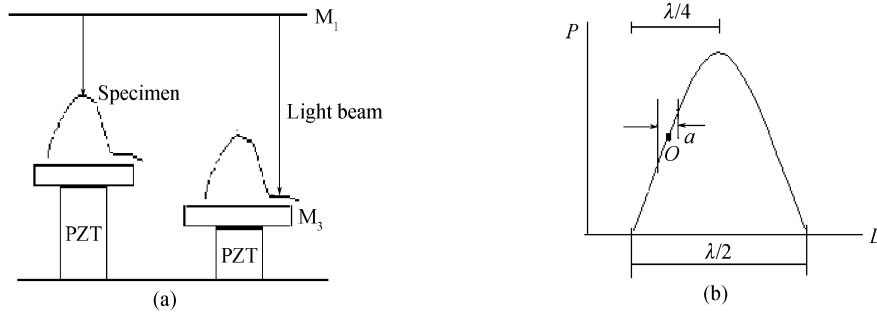


Fig. 1 The principle diagram of precision-measure by power stabilization

基于该原理而制成的扫描共焦三维成像显微镜(一种远场显微镜)由美国基金会资助,在 1995 年前后于美国加州大学伯克利分校分子和细胞生物学系问世,揭开了显微技术的新一页。和已有共焦光学显微镜相比,不仅可以探测样品凹凸(即光的相位),也能探测样品的明暗(即反射率),并且提供三维图像,具有高的轴向分辨率和横向分辨率,在测量中不干扰试样,不影响细胞生存,仪器相对简单。用此显微镜,获得了远比电子显微镜图像清晰的三维分辨率硅标准板图像($25\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$,其上布满 $800\ \text{nm}$ 直径、 $800\ \text{nm}$ 高小园柱等“零件”),在培养中的骨髓神经细胞体的照片,进行了海龟耳底活动分析,以及细胞分裂过程中的系列照片,同时具有很快的测量速度^[4]。

鉴于回馈显微镜上述的种种优点,我们进行了

使其恢复至原值零点(O 点)。这样一来,扫描过程中压电陶瓷的伸缩变化即对应于光点探测样品表面形貌的起伏,并且输出信号光功率在 O 点附近的起伏变化所对应的横轴区间 a 的大小(由噪声功率与压电陶瓷变化量取值精确度共同决定)便决定了测量的轴向分辨率($a/2$)。

激光回馈显微技术的研究,并设计了熔石英做外壳的 He-Ne 激光器以提高激光输出功率的稳定性,并采用了扩束光路中加入一个光阑的方法来提高系统成像的分辨率,这与伯克利的装置相比较,有很大的改进,并对一些实验参量进行了计算,目前已取得了初步的结果,得到了扫描样品的形貌图。下面将对自混合显微系统的设计和装调作较详细报道,最后对实验结果进行了讨论,并对误差作了分析。

2 激光自混合显微镜实验研究装置与装调

图 2 所示为实验系统总体结构图,它可以分为光学系统和信号采集与控制系统两部分。

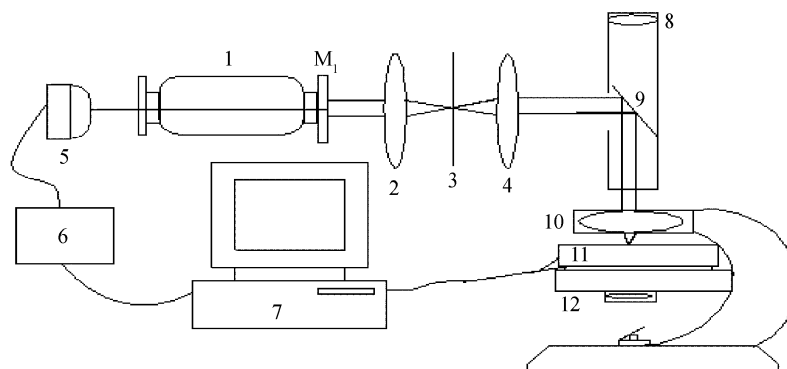


Fig. 2 Block diagram of the experimental system. 1: He-Ne laser, 2,4: lens, 3: aperture, 5: photocell, 6: amplifier, 7: computer, 8: eye-lens, 9: mirror, 10: objective lens, 11: stage, 12: lighting

光学系统中,经 He-Ne 激光器 1 前端输出镜 (M_1)发出的光,经过会聚透镜 2、光阑 3、扩束透镜 4

组成的扩束系统后,由半透半反镜 9 转折光路,经显微镜物镜 10 会聚在装有微小小球的载物台 11 上。其详细参量以及选择如下:

1) 激光器 1: He-Ne 气体激光器,功率 1 mW, 波长 632.8 nm, 单纵模输出。我们选用了结构如图 3 所示的熔石英壳封装的 He-Ne 激光器。

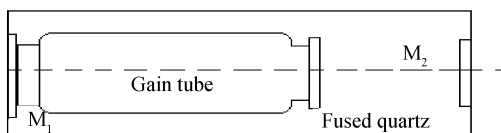


Fig. 3 He-Ne laser tube with fused quartz envelope

因为熔石英的热膨胀系数($5.0 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)非常小,用它封装可以使得激光输出的主频率几乎不移动,并且输出光束也不会出现较大的角漂,这样可以保证激光功率的稳定输出。外界环境温度变化 $1 \text{ } ^\circ\text{C}$, 对于主频率为 $4.74 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 的输出激光而言,其频率漂移为 $\delta\nu = -(\nu/L)\delta L = 2.37 \times 10^8 \text{ Hz}$, 而对于由普通硬质玻璃(热膨胀系数为 $5.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)制成的激光管,频率漂移为 $\delta\nu = 2.37 \times 10^9 \text{ Hz}$, 相对而言激光管输出功率要稳定得多。

2) 熔石英壳封装的会聚光路: 由扩束系统、半透半反镜 9、目镜 8 和物镜 10 组成。扩束系统包括两个放大倍数为 10 的物镜 2、4 和一个光阑 3; 半透半反镜 9 的设计有两点要求: 首先要使激光器输出光的能量最大的照射到样品上, 因此需要对 632.8 nm 光有尽可能大的反射率, 同时希望显微目镜 8 能同时观察到载物台 11 上的样品, 即要求该镜有一定的透过率, 为此, 我们选择了对 632.8 nm 光在入射角为 45° 有 95% 反射率的半透半反镜; 显微镜目镜放大倍数为 15; 显微物镜放大倍数为 100。

通过整个会聚光路, 激光器出射光束会聚成一个光斑, 直径在 $2 \sim 3 \text{ } \mu\text{m}$ 。由于整个系统中存在衍射和散射, 会聚后的光斑其实不是一个理想的光斑, 而是一个类似于干涉条纹的光场。该光场的中心是一个亮的光点, 该光点集中了整个激光束的大部分能量, 同时光点周围还存在亮的条纹。为了防止这些条纹回馈到激光器腔内, 以提高回馈信号的准确度, 我们在光路中加入一个光阑以减少杂散光对信号光的影响。整个系统对光阑的要求是: 只有会聚光点中心附近 $1 \text{ } \mu\text{m}$ 的区域的光能回到激光器的腔内。这样既可以挡住外界的杂散光, 又只允许会聚光点中心附近 $1 \text{ } \mu\text{m}$ 的区域的光能够通过光阑回到腔内, 从而提高回馈测量系统的分辨率, 由几何光

学的知识可计算得出光阑的直径应在 $8.3 \text{ } \mu\text{m}$ 。

3) 照明光路 12: 由聚光灯发出的光经反射镜反射后从下面照射在载物台 11 上, 便于显微镜观测。为了增加激光的回馈效果, 载物台上的载物片是 632.8 nm 全镀膜镜 (M_3)。带来的问题是在采用普通显微镜的白炽灯泡照明时无法观察载物台上的细胞。为了解决这个问题, 我们重新设计了照明系统。

为了增加照明光的功率, 我们选用了 100 W 的卤钨灯作为光源。照明光路除了保持原有光路中的会聚系统外, 加了一个反光碗, 以产生平行光。经过透镜把照明光会聚在载物台 11 上, 如图 4 所示。实验表明这种照明方式和载物台的镀膜既可以满足照明的需要又可以满足增加激光回馈效应的需要。

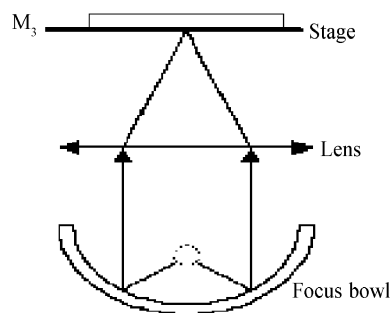


Fig. 4 The design of illuminative system

信号采集与控制系统则包括光电探测与采集和微动工作台及其反馈控制两部分:

1) 光电探测与采集: 光电探测器采用普通的硅光电池 5, 数据采集卡采用型号为 PC6311D 的采集卡。光电探测器获得的电信号通过所示的放大电路 6 进行信号放大, 放大后的信号通过数据采集卡被计算机 7 采集。

2) 微动工作台与控制: 我们自行设计一个三维微动工作台 11, 有三组压电陶瓷驱动, 最大行程均为 $20 \text{ } \mu\text{m}$, 可以较精确的控制工作台的移动。通过水平面二维工作台的移动, 实现对待测样品逐点扫描, 将所得的光功率输出值与功率零点值比较, 进而得出轴向上压电陶瓷驱动电压的变化趋势, 从而改变微动工作台的轴向位移, 实现光功率的恒定输出。

3 实验结果及讨论

在上述装置条件下, 我们进行了一系列的相关实验。图 5 是整个实验系统的噪声曲线, 图 6 是 M_3 作微小位移移动时探测光信号随时间变化曲线。

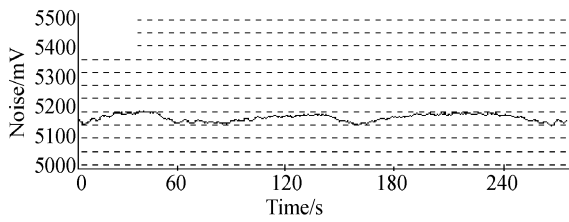


Fig. 5 Noise curve of the experiment

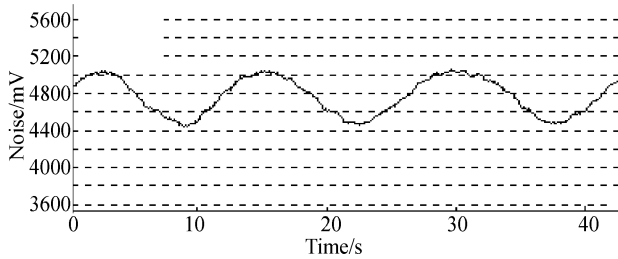
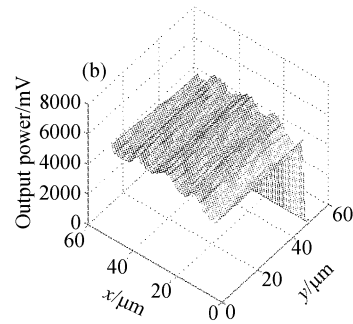
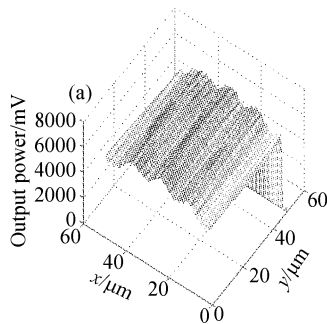
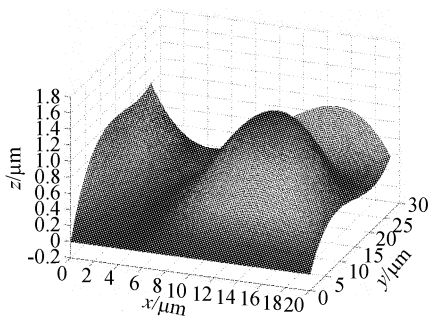
Fig. 6 Output power curve when M_3 is drowedFig. 7 Output power curve in two-dimensional scanning when M_3 is scanned by the light spot

Fig. 8 The shape of the little spheriform specimen

4 实验的重复性讨论与误差分析

衡量一个测量系统性能的好坏,重复性是一个关键因素。为了确定实验数据的准确程度,我们进行了几组重复性的测定试验,对载物台上样品作一维的重复性扫描,并对多次扫描所得数据进行比较。图 9 即是两次实验所得的对比曲线,其中横轴坐标表示一维扫描点的位置分布,纵轴表示该位置所对应的样品形体厚度起伏,由图线可以看出,在两次对

由此可知,当 M_3 移动 $\lambda/4$ 时,信号输出峰峰值为 600 mV,而噪声起伏的范围在 50 mV 以内,这便决定了该系统对样品扫描的纵向分辨力约 15 nm。由图也可看到:实验中所测光功率的输出 P 与 L (M_2 与 M_3 之间的距离)成类余弦关系^[1]。

图 7 是在未加反馈电路时对载物片表面进行二维扫描时所得的激光功率输出曲线,因为载物片表面起伏(70 nm 以下)在 $\lambda/4$ 以内,此时激光光功率的输出可以直接反映其表面形貌。图 8 是采用恒定功率输出法对任意形状的微小物体(实验中我们采用微小玻璃小球作为样品)进行形貌扫描所得的一幅扫描图像。其中横向分辨力取决于扫描光点大小以及探测器的灵敏度,约为 $1 \mu\text{m}$,纵向分辨率主要取决于恒定功率输出的稳定程度,也即是噪声信号的幅度,同时,压电陶瓷的非线性对其也有影响。

同一物体进行一维扫描时,同一点处的最大差值约为 30 nm,形貌曲线基本保持一致。

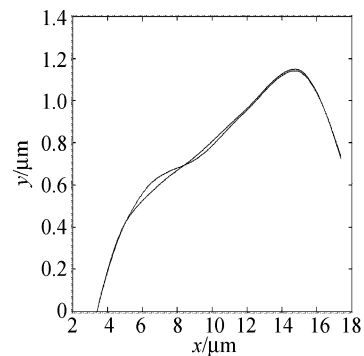


Fig. 9 The curve of repeatability

在整个实验系统中,误差来源为激光器的功率稳定性以及压电陶瓷的非线性等因素,对于前者,功率输出噪声曲线的起伏在 50 mV 以内,这说明系统的轴向分辨力可达到 15 nm;为减少压电陶瓷的非线性对系统误差的影响,我们采用校准的电感测微仪直接测出压电陶瓷的位移变化量,而不是通过对其驱动电压数据的处理来获得待测物的形貌信

息,这样压电陶瓷的非线性对系统性能的影响近乎为零,一切可取决于电感测微仪的分辨力(10 nm)。

结束语 本文较为完整的介绍了我们对激光自混合效应在显微镜技术方面的应用研究工作。通过我们所设计和装调的实验系统,达到了横向分辨力为1 μm ,纵向分辨力为15 nm的较高清晰成像,测出了微小球体样品的基本形貌图。通过上述实验,证明了回馈显微镜在微小物体的高精度形貌成像方面有很大潜力。而更为精细的成像则有待于实验系统的稳定性、压电陶瓷的非线性、光路中光能损耗等条件的进一步改进。

参 考 文 献

- 1 Yu Yanguang, Yao Jianquan, Ye Huiying. A self-mixing interference structure with pre-feedback used for measuring displacement. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(3):308~312 (in Chinese)
- 2 Yu Yanguang, Qiang Xifu, Wei Zhenlu *et al.*. A differential displacement system using laser self-mixing interference effect. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(9):1269~1273 (in Chinese)
- 3 Yu Yanguang, Cheng Ming, Qiang Xifu. Self-mixing interference effects in a laser diode with multiple optical feedback. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(10): 1093~1098 (in Chinese)
- 4 Wong T L, Sabato S L, Bearden. PHOEBE, a prototype scanning laser-feedback microscope for imaging biological cells in aqueous media. *J. Microscopy*, 1995, **177**(2): 162~170
- 5 Bearden A J. Power-modulated laser devieces. International Application Number: PCT/US90/05499
- 6 O'Neil M P, Bearden A. Measurement of basilar membrane motion in the turtle with laser-feedback interferometry (LFI). *Proc. SPIE*, 1986, **1889**:186~196
- 7 Wang W M, Boyle W J O, Grattan K T V *et al.*. Fiber-optic Doppler velocimeter that incorporates active optical feedback from a diode laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(11): 819~821
- 8 Wang W M, Boyle W J O, Grattan K T V *et al.*. Self-mixing interference in a diode laser: experimental observations and theoretical analysis. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(9):1551~1558