

文章编号: 0258-7025(2004)05-0551-03

提高激光反馈扫描显微镜轴向分辨率的实验研究

丁迎春, 张书练, 李 岩, 朱 均

(清华大学精密仪器与机械学系 精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 提出并实验研究了几种可以提高激光反馈扫描显微镜轴向分辨率的方法, 一种方法是对常规激光反馈实验中的探测技术进行了改进, 用渥拉斯顿棱镜把垂直偏振光分开探测, 轴向分辨率可以提高约 2.9 倍; 另一种方法是用双频激光器中产生的偏振态相互垂直的 o 光和 e 光作为反馈光代替了传统的单一光的反馈, 轴向分辨率被提高了约 2 倍; 第三种方法是用双频激光器中产生的 o 光或 e 光作为反馈光, 轴向分辨率可以提高约 2.5 倍。实验结果表明, 利用偏振态相互垂直的光之间的模竞争效应可以有效地提高扫描显微镜的轴向分辨率。

关键词 激光技术; 激光反馈; 激光频率分裂; 轴向分辨率

中图分类号 TH 741.8; TH 742.64 **文献标识码** A

Experimental Study on Improving Axial Resolution of Scan Microscope

DING Ying-chun, ZHANG Shu-lian, LI Yan, ZHU Jun

(The Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract In this paper, several methods are put forward, by which axial resolution of scan microscope could be improved. One is that detecting method of ordinary laser feedback is improved, the orthogonal polarized lights split by Wollaston prism are detected separately, comparing to the ordinary feedback, the axial resolution is improved about 2.9 times. Another is that the orthogonal polarized lights, o -light and e -light, generated by dual frequency laser, is used instead of ordinary feedback light, the axial resolution is improved about 2 times. The last is that o -light or e -light is as the feedback light, the axial resolution is improved about 2.5 times. The experimental results indicate that mode competitive effects of orthogonal polarized lights can effectively improve axial resolution of scan microscope.

Key words laser technique; laser feedback; laser frequency splitting; axial resolution

1 引 言

激光反馈效应的研究始于 1963 年, 当把激光器输出的光束由一反射面部分地反馈回这一激光器时, 激光器输出功率因反馈光的位相或光强的改变而改变。多年来, 人们在利用激光反馈效应测量物体的位移或表面形状的研究方面做了大量的工作^[1~5]。激光反馈扫描显微镜是利用物体反馈光的位相变化来调制激光器的输出光强, 进而达到测量

物体表面形状的目的。反馈光轴向分辨率的提高可以提高测量的精度。利用此效应设计的显微镜具有结构简单、低噪声、高轴向分辨率的优点。1995 年, 伯克利大学做的激光反馈扫描显微镜已达到轴向分辨率 1 nm 的精度。

本文用了两种与前不同的 He-Ne 激光反馈的实验和探测方法, 可以成倍地提高反馈扫描显微镜的轴向分辨率。

收稿日期: 2003-01-13; 收到修改稿日期: 2003-07-08

作者简介: 丁迎春(1966—), 女, 副教授, 清华大学博士后, 主要从事非线性光学、激光测量技术及激光应用的研究。

E-mail: dingyc@post. pim. tsinghua. edu. cn

2 常规激光反馈的实验

常规的激光反馈的实验装置如图 1 所示。使用半内腔的 He-Ne 激光器,平面镜 M_2 和曲率半径为 1 m 的凹面镜 M_1 组成激光器的谐振腔,它们的反射率分别为 0.986 和 0.999。激光器增益管 T 中充有 $^{20}\text{Ne}:^{22}\text{Ne}=1:1$ 的混合气体用来抑制输出功率曲线中的兰姆凹陷。反射镜 M_3 为外加的反射镜,它的反射率为 0.5,用于把激光器的输出光反馈进入谐振腔内。 P 为驱动 M_3 的压电陶瓷(PZT), D 为光电探测器,分别用来测量输出光强, C 为信号处理电路。

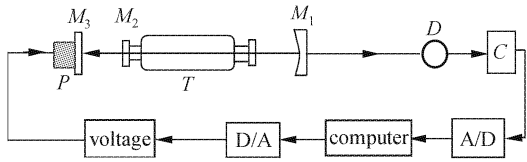


图 1 常规的激光反馈效应实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of ordinary laser feedback

整个探测过程由计算机通过运行软件程序进行控制,它使驱动腔外反射镜的移动与对激光强度的探测同步进行。推动腔外反射镜的压电陶瓷的电压每变化 40 V,激光腔镜移动约半个波长。计算机控制它每次测量时从 0 V 加到 180 V。因此,每次运行程序约测量了四个半周期。压电陶瓷的非线性度约为 10%。

D 所探测的尾光激光强度用数值量表示,其激光功率与数值量的对应关系约 0.01 mW 对应 400 units。这个比例关系可以通过探测器(光电池)的后续放大电路进行调节。

实验中,在无腔外反射镜时激光调为单模状态。在尾端输出功率分别为 0.01 mW 和 0.02 mW 左右时进行探测,所得输出功率曲线如图 2 中的(a),(b)所示。

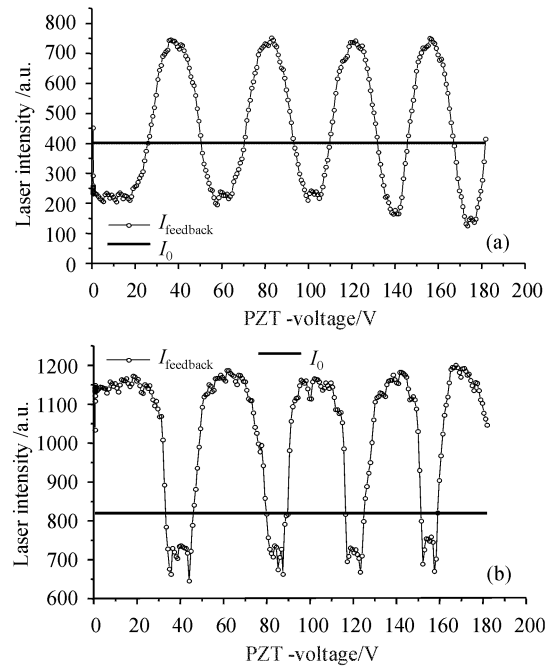


图 2 常规方法测得的反馈曲线

Fig. 2 Ordinary feedback curve

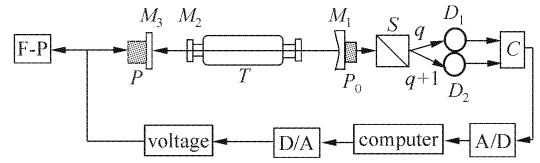


图 3 把垂直偏振光分开探测的实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of the orthogonal polarized lights separately detected

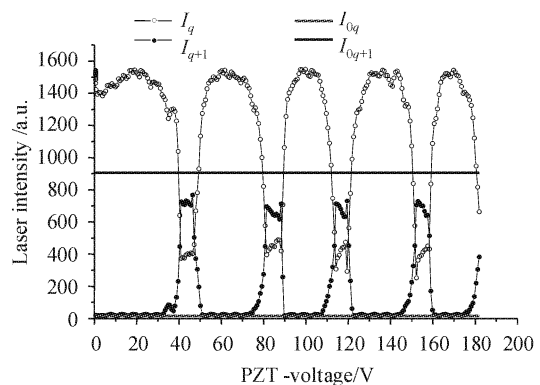


图 4 把垂直偏振光分开后探测的反馈曲线

Fig. 4 Feedback curve of the orthogonal polarized lights separately detected

3 新的激光反馈实验

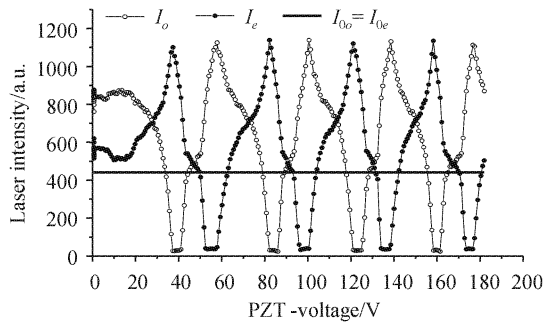
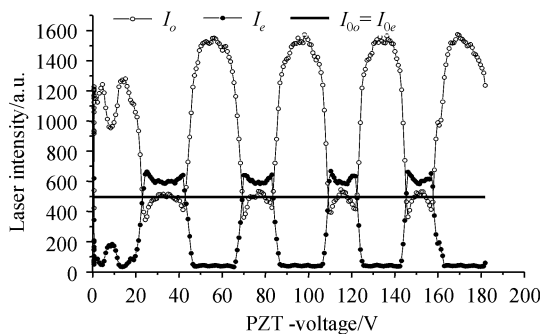
3.1 垂直偏振光分开探测

实验装置如图 3 所示。F-P 是法布里-珀罗扫描干涉仪。 S 为渥拉斯顿棱镜,用来把垂直偏振光 (q 光和 $q+1$ 光) 分开。 D_1 和 D_2 为光电探测器,分别用来测量 q 光和 $q+1$ 光的光强。探测曲线如图 4 所示。

3.2 频率分裂激光的反馈实验

实验装置与图 3 稍有不同。在激光增益管 T 与

激光腔镜 M_1 之间放一石英晶体片 Q 。它可以使 He-Ne 激光分裂成 o 光和 e 光。这时的渥拉斯顿棱镜用于把 o 光和 e 光分开。在等光强点探测到 o 光和 e 光的反馈曲线如图 5 所示。

图5 o 光和 e 光的反馈曲线Fig. 5 Curve of o -light and e -light feedback图6 在等光强点只有 o 光反馈时所得曲线Fig. 6 Curve of o -light feedback in the point of equal intensity

3.3 在频率分裂激光中只有一种光反馈的实验

实验装置与图3不同的是激光谐振腔内放有石英晶片,反馈镜 M_3 用一个渥拉斯顿棱镜和两块反射镜代替。渥拉斯顿棱镜用于把 o 光和 e 光分开,两块反射镜分别用于反馈 o 光和 e 光。在等光强点探测的 o 光反馈曲线如图6所示。

从以上图中可以看出,图4,5,6与图2存在明显的区别。在图4中,是把偏振态相互垂直的偏振光 q 光与 $q+1$ 光分开探测,由于垂直偏振光之间的模竞争效应,使得一种光占优势的同时,另一种光也有一定的输出。在图5中,在偏振态相互垂直的 o 光与 e 光同时反馈时,由于 o 光与 e 光之间的强模竞争效应,使得 o 光与 e 光占优势的几率相等。在图6中,虽然只有一种光(如 o 光)反馈,但由于模竞争效应,使得在 o 光占优势的同时, e 光也有一定的输出。

4 实验结果分析与讨论

从图2中可以看出,用前人的实验方法探测激光反馈曲线,曲线的变化幅值约为500~600的数量单位,即功率变化幅值约为0.015 mW。而把相互

垂直的偏振态分开探测,由于模竞争效应,其中某个偏振态反馈曲线的变化幅值,或者两个偏振态反馈曲线的变化差值,可以达到1500个数量单位,对应功率变化量为0.0375 mW。由于曲线的变化幅值可以成倍地提高,使轴向可分辨的最小距离成倍地减小,因此轴向分辨率可以成倍提高。下面做更详细的分析。首先看图2中的(b),当PZT电压从87.5 V变化到95.9 V,激光强度从663 units变到1162 units。因此该比值是59 units/V。对图4,当PZT电压变化从88.6 V到97.4 V, A光的激光强度与B光的激光强度的差值从0 unit变至1524.8 units。因此该比值是173 units/V。图5中,PZT电压变化为91 V到100.4 V时, o , e 光强度的差值从0 unit到1100.5 units。因此该比值是117 units/V。最后,图6中,PZT电压从83.3 V到93.6 V, o , e 光强度的差值从0 unit到了1516 units。因此该比值是147 units/V。

以上四个比值第一个是按照常规方法测量所得,后面三个值分别用的是 $q, q+1$ 光之间的模竞争, o, e 光之间的模竞争,以及只有 o 光反馈的方法。三种新的反馈方法使轴向分辨率分别提高了约2.9倍,2倍和2.5倍。轴向分辨率的提高程度与激光反馈系统的结构和模竞争的程度有关。在 o 光与 e 光之间的反馈中,由于激光腔内加了石英晶片,使腔内损耗加大,激光增益减小,所以输出光强减小,同时也使得轴向分辨率变小了。在只有单一光反馈的实验中,与把垂直偏振光分开探测的实验相比,虽然都是一种光占优势,但由于腔内存在损耗,所以轴向分辨率要小;与 o 光和 e 光的反馈实验相比,虽然腔内都存在损耗,但由于是一种光占优势,所以轴向分辨率要大。轴向分辨率的提高主要是利用了垂直偏振光之间的模竞争效应,而且如果在模竞争中,一种光取得了绝对优势,轴向分辨率的提高程度比两种光都占优势要大。

参 考 文 献

- 1 A. Bearden, M. P. O'Neill, L. C. Osborne *et al.*. Imaging and vibrational analysis with laser-feedback interferometry [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(3):238~240
- 2 W. M. Wang, W. J. O. Boyle, K. T. V. Grattan *et al.*. Fiber-optic Doppler velocimeter that incorporates active optical feedback from a diode laser [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(11):819~821
- 3 W. M. Wang, W. J. O. Boyle, K. T. V. Grattan *et al.*. Self-mixing interference in a diode laser: experimental observations and theoretical analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(9):1551~1558
- 4 P. J. De Groot. Range-dependent optical feedback effects on the multimode spectrum of laser diodes [J]. *J. Mod. Opt.*, 1990, **37**(7):1199~1214
- 5 Th. H. Peek, P. T. Bolwijn, C. Th. J. Alkemeade. Axial mode number of gas lasers from moving-mirror experiments [J]. *Am. J. Phys.*, 1967, **35**(9):820~831