

用激光空腔锁定技术测量材料的拉、压弹性模量的相对误差

冀玉领 王丽琴

(山西师范大学, 临汾)

李永贵 秦荣先 胡志林

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

提 要

将一激光器的工作频率锁定在 Fabry-Perot 标准具(简称 F-P)的共振峰上, 利用 F-P 标准具光学共振频率随腔长的灵敏响应特性, 用光学拍频方法测得 F-P 腔体材料在微小应力作用下的应变值, 就可得到材料的弹性模量。本文就此提出了测量材料拉、压弹性模量相对误差的一种方法, 并且实测了石英材料拉、压弹性模量的相对误差。

关键词: 光学拍频。

一、原 理

在涉及微小应变的高精度测量中, 人们普遍采用了光学测量方法^[1,2]。利用激光空腔锁定技术, 借助于 F-P 标准具的光学高分辨率特性, 由标准具共振峰频率随腔长的灵敏响应, 用光学拍频方法实现了在 10^{-9} 量级的微小应变测量。同其它光学测量方法(如云纹法、光弹性贴片法、激光散斑干涉法等)相比, 具有更小的被测应变下限。本文基于这种测量应变的方法, 设计了一种测量材料弹性模量的方法。

对 F-P 标准具, 其共振峰频率^[3]

$$\nu = \frac{c}{2nL} \left[q + (m+p+1) \frac{\cos^{-1}(g_1g_2)^{1/2}}{\pi} \right] \quad (1)$$

式中 c 为光速, n 为腔内介质的折射率, L, g_1, g_2 分别为 F-P 标准具的腔长和结构因子, q, m, p 分别为标准具的本征纵横和横模的阶数, 适当调整光路, 就不会激发起腔体的本征横模^[5], 此时得到 F-P 腔体材料的应变和共振峰频率的关系为

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \nu}{\nu} \quad (2)$$

F-P 材料拉、压弹性模量的相对误差

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = 1 - \frac{E_2}{E_1} = 1 - \frac{\Delta \sigma_2}{\Delta \sigma_1} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = 1 - \frac{\Delta F_2}{\Delta F_1} \cdot \frac{\Delta \nu_1}{\Delta \nu_2} \quad (3)$$

式中角标 1、2 分别对应 F-P 腔体受拉和压力作用时的量， ϵ_i 为 F-P 腔体所受的轴向应力变化 $\Delta\sigma_i$ 时的应变变化量， $\Delta\nu_i$ 为 F-P 腔体所受轴向力变化 ΔF_i 时共振峰频率的变化量。由此可见，只要测得 F-P 腔体处于拉和压应力状态下的共振峰频率的同时，测得所受作用力的大小，就可得到 F-P 腔体材料拉、压弹性模量的相对误差。

实验原理图如图 1 所示。 F_0 为一 Faraday 光学隔离器，防止从 F-P 反射回来的光再次进入激光器 2，影响其正常运转^[4,5]，透镜 f 是考虑到 F-P 腔体和激光器 2 的模式匹配而设置的，PZT₁ 为施力元件，通过其压电伸缩效应给 F-P 腔体施力； N 为一力传感器，F-P 腔体所受轴向力的大小可由它读出， C_1 、 C_2 为两产生圆偏振光的偏振片， M_1 为一全反射镜， M_2 为一半透半反射镜，PIN₁、PIN₂ 为两个光电接收头。激光器 1 输出的为一标准频率激光，利用电子伺服系统将激光器 2 的工作频率锁定在 F-P 标准具的某一共振峰上；在 F-P 腔体的不同受力条件下，用光学拍频方法测得激光器 1 和激光器 2 输出光的拍频值，就可得到 F-P 在不同受力条件下的共振峰频率，从而知道了 F-P 腔体材料在不同受力条件下的应变。测得应变的同时，由力传感器 N 测得 F-P 腔体所受的应力大小，就可得到 F-P 腔体材料的弹性模量。

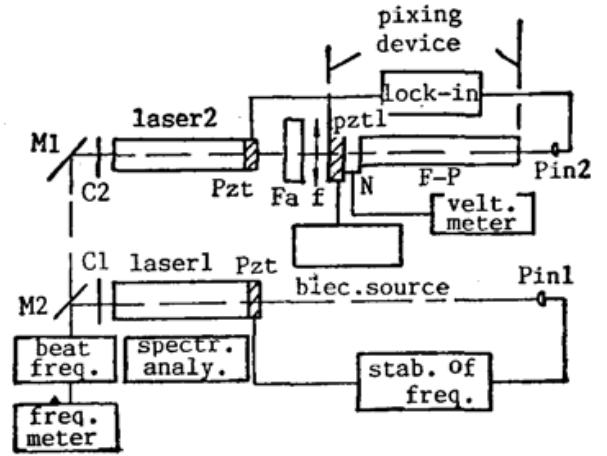


Fig. 1 Principle

二、实验装置

激光器 2 的工作频率在 F-P 标准具共振峰上的锁定原理如图 2 所示，图 3 是 F-P 透射光强在某一共振峰附近的光学行为。由振荡器产生的一微小调制信号加在激光器的压电陶瓷 PZT 上，对激光器的工作频率进行扫描，则光电接收头接收到的光信号就有一调制，此信号通过相干检波、相敏滤波和高压放大，根据激光器频率对 F-P 共振峰频率偏离的大小和方向，产生一正或负的适当直流电压加在激光器的 PZT 上，迫使激光器输出光的频率向 F-P 标准具的共振峰频率 ν_0 靠拢，从而将激光器的工作频率锁定在 F-P 标准具的共振峰上。

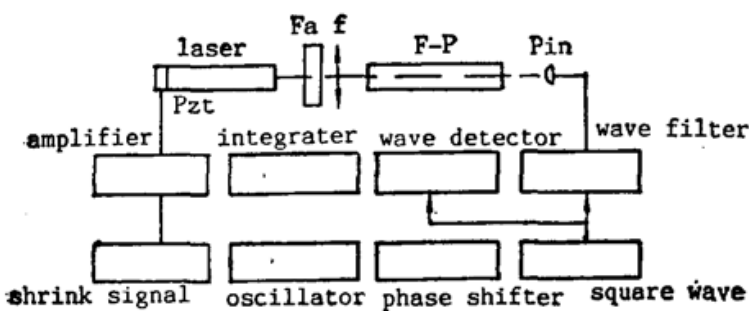


Fig. 2 Principle of Passage Lock-in

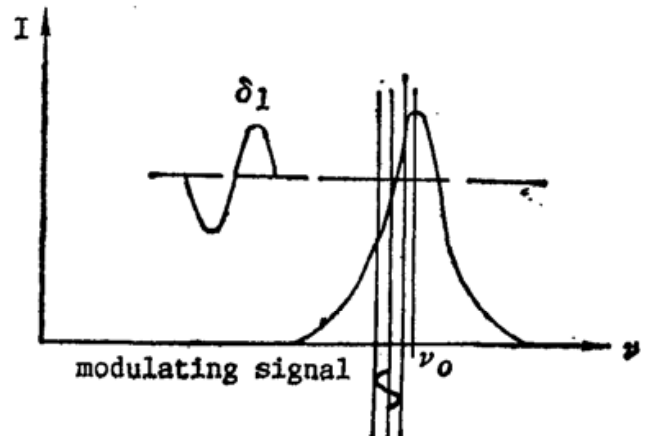
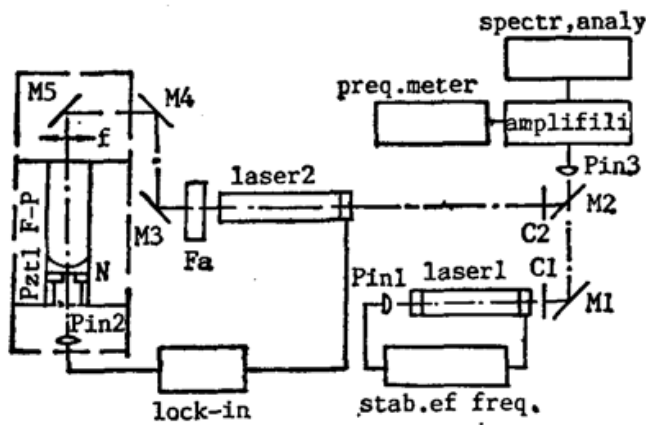


Fig. 3 Optical Behavior of a Peak of F-P

图 4 为测量 F-P 材料拉、压弹性模量相对误差的装置图。整个装置安排在一隔振光学平台上, F-P 置入一封闭容器内, 以减小环境温度变化和气流扰动对 F-P 共振峰频率的影响。



图中, F-P 的一端和力传感器固定在一起, 力传感器又和施力压电陶瓷 PZT₁ 固定在一起; F-P 的另一端和 PZT₁ 的另一端分别固定在一固定的大框架上; PIN₁、PIN₂ 为两个光电二极管, PIN₃ 为雪崩光电二极管, M₃、M₄、M₅ 为 3 个全反射镜, 实验中所用的标准频率激光器 1 为碘饱和吸收稳频 He-Ne 激光器, 其频率稳定性可达 10⁻¹¹(10 sec), 激光器 2 为一单模 He-Ne 激光器。

Fig. 4 Diagram of Experimental Apparatus

应力的测量装置为一应变计式力传感器, 结构为两端固定梁, 在梁受力时的极大应变处粘贴 8 片箔式应变计, 并连接成一应变桥, 桥压输出 u 和传感器受力 F 间有如下关系:

$$F = Ku。$$

式中 K 为一常数, 可由传感器的定标给出。

三、实验结果

如图 4 所示, 将激光器 2 的工作频率锁定在 F-P 标准具的某一共振峰上, 利用压电陶瓷 PZT₁ 的电致伸缩效应给 F-P 腔体施力, 由光学拍频方法测得 F-P 腔体应变的同时, 由力传感器的桥压输出得到 F-P 腔体所受的力, 就可求得 F-P 腔体材料的弹性模量。

实测 F-P 腔体材料(石英)的受力和相应 F-P 标准具共振峰频率变化如下表所示, 可形象的示于图 5。

Force unit: g, Frequency unit: MHz

stress	F	768	303	156	111	-54
force on F-P		0	22.21	29.18	31.25	38.99
stretch	F	1050	852	633	510	366
force on F-P		0	9.50	20.04	25.95	32.35

In the table, the value of ν were determined relatively by taking the beat frequency of the first time measurement as reference

实验中, 力的测量误差为 ± 3 克, 拍频值的测量误差为 ± 0.1 MHz, 由 (3) 式算出, 石英材料拉、压弹性模量的相对误差为: $\frac{\Delta E}{E} = 0.03 \pm 0.03$, 式中, ± 0.03 为标准偏差。

如果 F-P 的横截面积沿轴向相当均匀, 则很容易就可得到材料的拉、压弹性模量的绝对值。

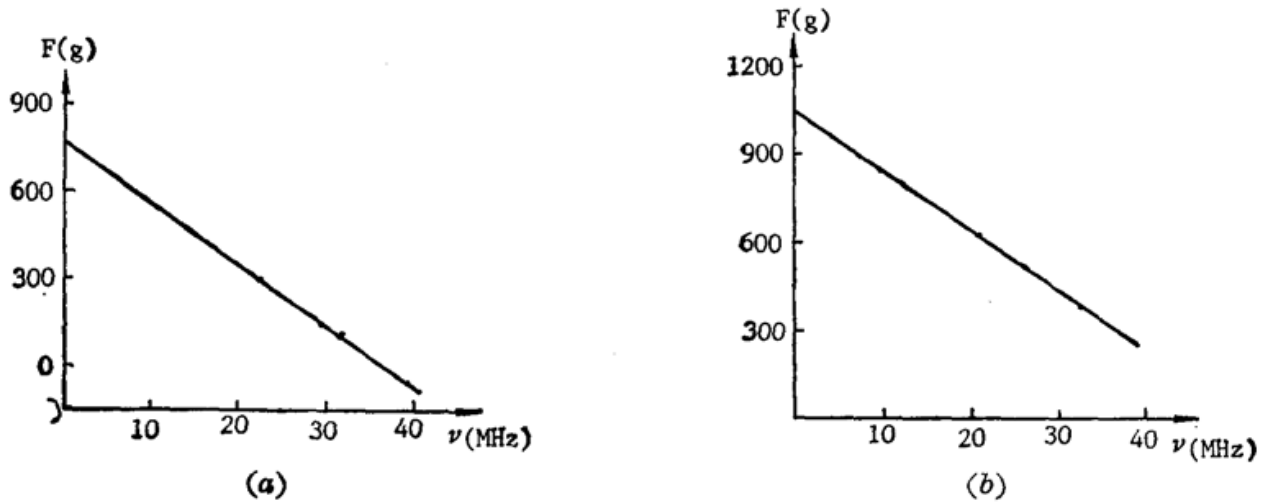


Fig. 5 Stress Force on F-P

实验中的误差主要来源于锁定器的锁定精度以及温度变化引起的 F-P 共振峰频率的漂移。温度变化一方面使 F-P 腔体伸缩,同时也使 F-P 腔内介质(此处为空气)的折射率发生改变,这都将影响应变的测量精度,由

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta n}{n} = (3.5 \times 10^{-7} + 9.29 \times 10^{-7}) \Delta T。$$

式中, 3.5×10^{-7} 、 9.29×10^{-7} 分别为石英材料的热膨胀系数和空气折射率的温度系数。测量过程中, F-P 附近的环境温度变化可控制在 $1/1000^\circ\text{C}$ 以内,此时 $\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta\nu}{\nu} \sim 10^{-9}$, 和可测最小应变在同一数量级。另外,环境振动和激光器功率波动也会给测量带来一定的误差。

应该指出,对于只允许小应变的场合,当应变小于 1% 微应变时,利用一般的测量方法将有相当的困难,此时就显示出了这种测量方法的优越性。本实验就是在小于 1 kg 的微力作用下进行测量的,对于文中所介绍的微小应变的测量方法,在类似的测量中都有实用价值。

参 考 文 献

- [1] 陈建华;《实验应力分析》,(中国铁道出版社,北京,1984), 153; 280。
- [2] J. 阿弗里尔主编,陈棣华等译;《实验应力分析手册》,(机械工业出版社,北京,1985), 175; 226。
- [3] H. Kogelnik;《Proceedings of the Symposium on Quasi-Optics》,(Polytechnic press of the Polytechnic Institute of Brooklyn, Brooklyn, N. Y., 1964), 333。
- [4] M. R. Sayeh, H. R. Bilger et al.; *Appl. Opt.*, 1985, **24**, No. 22 (Nov) 3756。
- [5] D. M. Clunie; *J. Sci. Ins.*, 1964, **41**, No. 8 (Aug), 489。

Relative error measurement of stress and stretch elastic moduli by using laser passive lock-in technique

JI YULING AND WANG LIQIN

(*Shanxi Normal University, Lingfen*)

LI YONGGUI, QIN RONGXIN AND HU ZILIN

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing*)

(Received 24 March 1989; revised 13 October 1989)

Abstract

A method for measuring the moduli of elasticity of material is presented in this paper. Laser frequency is locked-in the passage peak of Fabry-Perot etalon. Using the optical resonant characteristic of Fabry-Perot etalon with the optical beat frequency method, we can get the moduli of elasticity by measuring the strain under very small stress action. The relative errors of stress and stretch elastic moduli of quartz are given.

Key words: optics beat frequency.