

用激光外差法探测固体表面超声位移*

白世武 李红卫 龚育良

北京科技大学物理系 北京 100083

摘要 论述了应用激光外差和锁相环解调原理探测固体表面超声位移的原理、方法, 并利用激光外差干涉仪对固体表面的超声位移进行了探测, 得到了很好的结果。

关键词 超声测量, 激光外差, 干涉仪

中图分类号 TB551, TH744.3

Detecting Ultrasonic Displacement on Solid Surface by Laser Heterodyne Method

Bai Shiwu Li Hongwei Gong Yuliang

Department of Physics, USTB, Beijing 100083, PRC

ABSTRACT The principle and way of detecting ultrasonic displacement of solid surfaces with laser heterodyne and phase-locked loop to demodulate are described. Ultrasonic displacement of solid surfaces is detected with a laser heterodyne interferometer and a satisfactory conclusion is got.

KEY WORDS ultrasonic measurement, laser heterodyne, interferometer

测量材料表面超声位移的非接触方法有电容法、迈克耳逊干涉法和外差干涉法。电容换能器不但具有非接触和频带宽的优点, 而且还能对固体表面的位移进行定量分析, 但它与金属面间的间隔非常小, 只有几个 μm , 而且固体表面还要抛光到 $0.22 \mu\text{m}$ 。在迈克耳逊干涉法中, 检测信号的灵敏度依赖于两干涉光束间的平均相差, 即迈克耳逊干涉法存在一个工作点的问题。外差法非接触探测固体表面超声位移的应用中, 具有独特的优点, 首先, 它将固体表面超声位移载到高频范围内处理, 避开了低频的 $1/f$ 噪声的干扰, 有利于提高探测的信噪比; 其次, 由于采用了布喇格移频技术, 即使光源频率发生变化, 但是差额 $f_c - f_s = \Delta f$ 保持不变, 仍能进行正确探测, 这样就提高了系统的稳定性。本文论述了非接触接收固体表面超声位移的激光外差法的基本原理和实际装置, 测量了固体表面超声位移, 并进行讨论。

1 激光外差探测原理

该节简要论述外差法原理和解调原理。

1994-09-08 收稿 第一作者 男 35岁 硕士

* 国家自然科学基金资助项目

1.1 外差法原理^[1]

激光外差干涉技术就是在一般干涉仪的参考光路中,引入具有一定频率的载波,被测信号通过这一载波来传递,并被光电探测器接收.外差法原理如图1所示,考虑偏振方向相同,传播方向平行且重合的两束光波垂直入射到光探测器上.设信号光的频率为 f_0 ,参考光的频率为 $f_0 + f_b$,且认为光探测器整个面上量子效率是均匀的,所以根据电磁场理论,参考光和信号光的电场矢量分别为:

$$\begin{aligned} E_r(t) &= E_r \cos[2\pi(f_0 + f_b)t + \Phi_{r0}] \\ E_s(t) &= E_s \cos(2\pi f_0 t + \Phi_{s0}) \end{aligned} \quad (1)$$

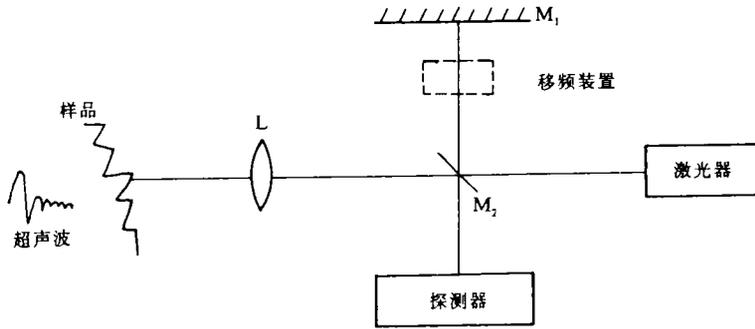


图1 实验原理图

当用光波频率为 f_0 和 $f_0 + f_b$ 的两束光分别照射测试表面和参考表面时,考虑到两束光的偏振态相同,干涉场中接收到瞬时光强为:

$$\begin{aligned} I(x, y, z) &= \{E_s \cos(2\pi f_0 t + \Phi_{s0}) + E_r \cos[2\pi(f_0 + f_b)t + \Phi_{r0}]\}^2 \\ &= E_s^2/2 + E_r^2/2 + (E_s/2) \cos 2(2\pi f_0 t + \Phi_{s0}) + (E_r/2) \cos[4\pi(f_0 + f_b)t + 2\Phi_{r0}] \\ &\quad + E_s E_r \cos[2\pi(2f_0 + f_b)t + \Phi_{s0} + \Phi_{r0}] + E_s E_r \cos[2\pi f_0 t + \Phi_{r0} + \Phi_{s0}] \end{aligned}$$

由于光电探测器无法响应光频变化,因此,上式中光频项在探测器上的响应为零,则探测器的输出为:

$$i(x, y, z) = g[E_s^2/2 + E_r^2/2 + E_s E_r \cos(2\pi f_b t + \Phi_0)] \quad (2)$$

其中 g 为比例系数.上式是探测表面静止时的光电流表达式,若探测表面的超声位移为 $\delta(t)$,则光电流表达式为:

$$i(x, y, z) = g[E_s^2/2 + E_r^2/2 + E_s E_r \cos(2\pi f_b t + (4\pi/\lambda)\delta(t) + \Phi_0)] \quad (3)$$

由上式知,光电探测器的输出电流是一个相位调制信号,经过解调后即可得到所需探测的超声位移 $\delta(t)$.

1.2 解调原理^[1,3]

将从光电探测器输出的电流信号,转换为电压信号,送入低噪声前置放大器,将信号放大到满足锁相环的解调要求,为方便起见,设锁相环路的输入交流部分为:

$$U_i(t) = U_i \cos[\omega_b t + 4\pi/\lambda \delta(t) + \Phi_0] = U_i \cos[\omega_b t + U_{\Omega} \cos(\Omega t + \theta_i) + \Phi_0] \quad (4)$$

其中输入相位即为:

$$\theta_1(t) = U_{\Omega} \cos(\Omega t + \theta_i) \tag{5}$$

这是一个频率为 Ω 的余弦输入相位, 此输入相位的幅度是 U_{Ω} , 初相是 θ_i .

由于锁相环路已近似为线性系统, 在余弦输入相位作用下, 输出相位一定是同频的余弦相位. 因此, 它可以表示为:

$$\theta_2(t) = U_{\Omega_c} \cos(\Omega t + \theta_c) \tag{6}$$

式中 U_{Ω_c} 是输出相位的幅度, 它与输入相位幅度 U_{Ω_i} 之间的关系取决于闭环频率响应 $H(j\Omega)$ 的模, 即:

$$U_{\Omega_c} = U_{\Omega_i} |H(j\Omega)|^{[3]} \tag{7}$$

式(6)中的 θ_c 是输出相位的初相, 它等于输入相位的初相再加上闭环频率响应的相位, 即:

$$\theta_c(t) = \theta_i + \arg H(j\Omega)^{[4]} \tag{8}$$

如果设计较好的调制跟踪锁相环传递函数的频响 $H(j\Omega) = 1$, 相移 $\arg |H(j\Omega)| = 0$, 则:

$$\theta_2(t) = \theta_1(t) = (4\pi/\lambda) \delta_s(t) + \Phi_0 \tag{9}$$

根据压控振荡器的控制特性:

$$U_c(t) = (1/K_0)(d\theta_2/dt) \tag{10}$$

以及积分器的特性:

$$U(t) = (1/RC) \int V_c(t) dt = (1/K_0)(1/RC)(4\pi/\lambda) \delta_s(t) \tag{11}$$

即为调相信号的解调输出. 其中 K_0 为压控振荡器的增益系数, RC 为积分器的积分时间常数, λ 为激光光源的波长 (632.8 μm). 从上式可知, 从积分器输出信号幅度 $U(t)$ 与超声位移 $\delta(t)$ 成正比.

2 实验装置调试与实验结果^[2~4]

2.1 光外差信号的调试

激光外差干涉仪探测灵敏度的高低, 关键是光学部分外差信号的调整. 影响外差信号的因素很多, 如空间准直性, 周围环境 (温度、湿度、振动), 反射镜的反射率等, 所以在光外差信号的调试过程中, 除合理的光路布置外, 要尽可能地减少其他不利因素的影响, 特别是对空间准直性的调试极为重要. 理论和实验表明, 只有空间准直性调得较好, 才能提高外差信号的信噪比, 在此基础上, 才能对被测信号进行有效的探测.

外差干涉实验装置如图 2 所示, He-Ne 激光器、布喇格器件、全反射镜、分光镜和光电探测器都固定在具有三维可调的光机座上. 调整 He-Ne 激光器使光束通过布喇格器件, 然后打开超高频功率信号发生器, 反复调节 He-Ne 激光器和布喇格器件的三维位置, 使从布喇格器件出来的一级衍射斑和零级斑相对来说较圆、较亮. 没有发生偏转的光是零级光, 而发生偏转的光是一级衍射光, 频移为 36 MHz. 实验表明, 在频移 36 MHz 的情况下, 外差信号的信噪比相对是较好的. 分别调节 M_1 、 M_3 、 M_4 和 M_2 、 M_5 使两束光同时入射到 M_6 , 这一步要反复调试两束光的有关反射镜, 使两束光在 M_6 上得到较好的重合, 最后调试 M_6 使两束光得到完全重合以满足两束相干光空间准直性要求. 调节光电探测器使干涉光束射入光电探测器, 这时在示波器上观察出如图 3 的外差信号.

