

用外差干涉法探测固体表面激光超声的研究*

龚育良 张永智 梁海岩 白世武

(北京科技大学物理系 北京 100083)

提要 简述了用外差干涉法探测固体表面激光超声的原理和实验结果, 提出并论证了提高外差干涉法探测激光超声信号强度的方法和途径。

关键词 外差干涉, 探测, 激光超声

1 引 言

共焦法布里-珀罗干涉和外差干涉是激光超声的两种最主要光学探测方法。前者由于可以同时接收多个散射光斑, 有强的集光能力, 因此适合于工业现场对工件表面超声的探测。外差干涉法将激光超声加载到高频范围内处理, 避开了低频的 $1/f$ 噪声的干扰, 但由于它只有接收一个光斑时才有最佳的探测效果, 因此这种方法通常只适用于实验室条件下光滑表面超声的探测。自 1984 年 J. P. Monchalín 用激光外差干涉法进行连续超声接收实验^[1]以来, 人们采取了很多改进措施来提高干涉仪输出信号强度, 也取得了一定成效。但由于始终沿用 45° 入射和单面外差干涉输出, 光信号能量的利用不超过四分之一。我们的研究表明, 选择适当的入射角, 采用共轭外差干涉输出和信号光参考光的严格准直, 可使光能利用率和输出信号提高将近 4 倍。

2 外差干涉探测激光超声的原理和实验结果

图 1 是外差干涉探测固体表面激光超声位移的实验图。激光超声激励源是一台 Q 开关 YAG 激光器, 波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 激光脉冲宽 10 ns, 单脉冲能量在 60 mJ 内连续可调, 光束直径为 2~4 mm。光束以每秒 1 次的频率投射到样品表面在样品中激励超声脉冲。用激光外差干涉法探测样品表面的超声脉冲。干涉仪由激光源、Bragg 衍射盒、反射镜、分束镜、光电探测器和信号处理电路

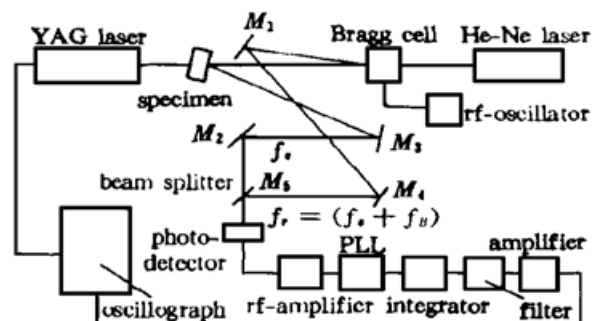


图 1 外差干涉探测激光超声的实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of the laser ultrasonic detection by a heterodyne interferometer

* 国家自然科学基金资助项目。

等组成。Bragg 衍射盒由射频发生器激励。He-Ne 激光束经 Bragg 衍射盒后分为具有不同频率的两束光，一束是频率为 f_s 的信号光，一束是频率为 $f_r = (f_s + f_B)$ 的参考光，信号光经样品表面反射后发生 $(4\pi/\lambda)u(t)$ 的相移，它们在光分束器上会聚干涉，经光电转换后的光电流为^[2]

$$i(t) = I_s + I_r + 2 \sqrt{I_s I_r} \cos \left[2\pi f_B t + \frac{4\pi}{\lambda} u(t) \right] \tag{1}$$

显然，光电流是一个调相信号，经锁相环和积分器组成的解调电路后的输出电压为^[2]

$$U(t) = \frac{1}{K_0 RC} \frac{4\pi}{\lambda} u(t) \tag{2}$$

式中， I_s, I_r, f_B 分别为信号光、参考光的直流分量和射频发生器的频率， $u(t)$ 为 YAG 激光器在样品中激发的表面的超声脉冲，其它均为常数。显然，干涉仪输出电压与激光超声成正比。滤波器的作用是将解调输出中因环境振动引起的低频干扰以及一些低频电路噪声滤除。输出的激光超声脉冲电压放大后送到数字存贮示波器。

图 2 是我们的探测结果。图中纵坐标为 2 V/格，时基为 50 μ s/格，上面的波形是 YAG 激光器氙灯输出的触发信号，下面的波形是干涉仪接收到的激光超声信号。超声信号延迟 160 μ s 是由于带 Q 开关 YAG 激光器从氙灯点燃到激发激光脉冲需 150 μ s 左右，激光超声在样品中传播需 6 μ s 所致。

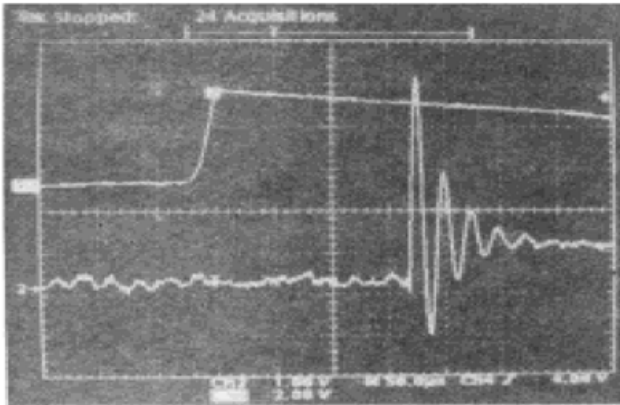


图 2 激光外差干涉法探测到的激光超声波形
Fig. 2 Laser ultrasonic waveform received by the laser heterodyne interferometric method

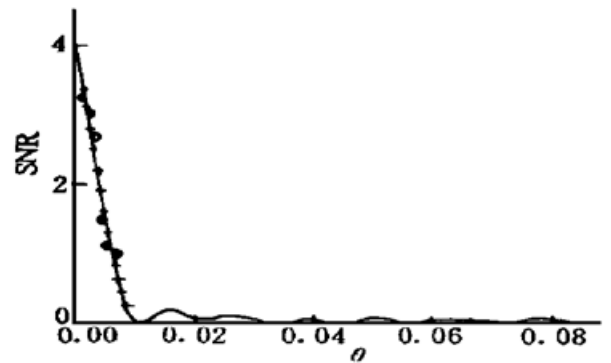


图 3 信噪比与信号光和参考光的准直角的关系
Fig. 3 SNR versus collimation angle θ of the signal light with the reference light

3 信号光和参考光的空间准直性对信噪比 SNR 的影响

公式(1)是在信号光和参考光完全准直(严格平行)的情况下得到的，实际上不可能做到这点，信号光和参考光之间总会存在一定的夹角 θ (空间准直角)，输出的光电流和 SNR 分别为^[3]

$$I = K \eta \pi U_s U_r (1 + \cos\theta) \cos[\omega t + (\phi_s - \phi_r)] \frac{\sin(\beta L/2)}{\beta L/2} \tag{3}$$

$$\text{SNR} = K (1 + \cos\theta)^2 \left[\frac{\sin(\beta L/2)}{\beta L/2} \right]^2 \tag{4}$$

这里 $\beta = 2\pi \sin\theta/\lambda$ 。图 3 为 SNR- θ 曲线。由图可知，为得到足够的 SNR，空间准直角必须控制在准直角的阈值 $\sin^{-1}(\lambda/L)$ 以内， θ 愈小，SNR 愈高。

4 信号光参考光入射角对外差信号强度的影响

到目前为止, 所有的外差干涉仪信号光参考光都以 45°入射到光分束器上, 实际上式(3)中的透射光幅值 U_s 和反射光幅值 U_r 的积 $U_s U_r$ 都和入射角有关。图 4 为信号光参考光入射到光分束器上的示意图。 n_0, n_1, n_2 分别为空气、分束器薄膜和玻璃基体的折射率。设 U_{s0}, U_{r0}, U_s, U_r 分别为入射信号光、参考光和透射信号光、反射参考光的幅值, 则根据菲涅耳定律, 可推得透射信号光和反射参考光相对值的乘积为^[4]

$$A_1 A_2 = \frac{U_s U_r}{U_{s0} U_{r0}} = \frac{\sqrt{(1 - R_1) \tan i_2 / \tan i_1} \sqrt{(1 - R_2) \tan i_3 / \tan i_2}}{\sqrt{1 + 2 \sqrt{R_1 R_2} \cos \Phi + R_1 R_2}} \sqrt{(1 - R_3) R_3 \tan i_1 / \tan i_3} \quad (5)$$

式中 i_1 为信号光参考光的入射角, R_1, R_2, R_3 分别为光能流在空气/镀膜、镀膜/玻璃、玻璃/空气界面上的反射率, $\Phi = 4\pi n_1 \cos i_2 / \lambda_2$ 为相邻透射光线的相位差。镀膜的折射率和厚度、玻璃的折射率对 $A_1 A_2 - i_1$ 曲线都有影响。对于给定的光分束器, 有一个最佳入射角, 这时 $A_1 A_2$ 有一个极大值。对于以折射率 1.5 的玻璃为基体的光分束器, 最佳入射角为 77°左右, 这时的 $A_1 A_2 = 0.42$, 约为通常 45°入射时的(0.21)二倍。可见采用最佳入射角外差信号强度可提高二倍左右。图 5 是我们的实验验证。曲线是理论结果, 圆点为实验结果, 两者符合较好。

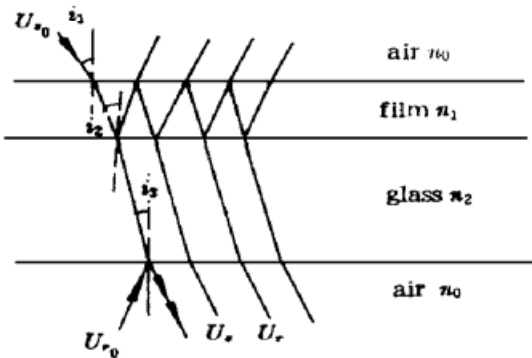
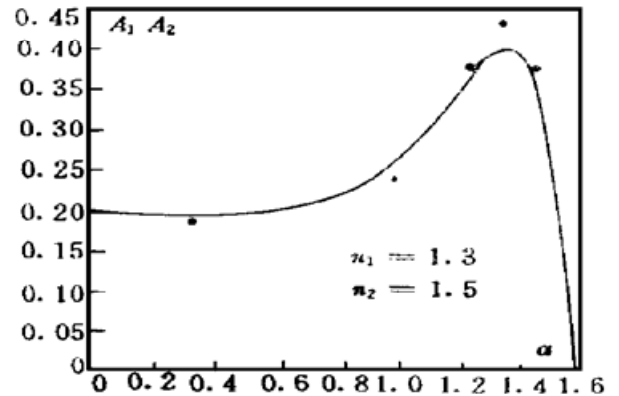


图 4 信号光与参考光在分光片上的干涉
Fig. 4 Signal light interferes with the reference light on the splitter



5 $A_1 A_2$ 随信号光和参考光的入射角 α 的变化曲线
Fig. 5 $A_1 A_2$ vary with the incidence angle α of the signal with respect to the reference light

5 外差干涉的共轭输出

通常的外差干涉仪都是单边输出, 只利用了光能的一半, 如果采用图 6 所示的装置, 图中 1 和 2 代表两组相同的光电探测和信号处理电路, 不但利用信号光的透射光和参考光的反射光进行干涉输出, 还利用其共轭光(反射光和透射光)进行干涉输出, 经过解调后它们的输出分别为

$$U_1(t) = \frac{1}{K_1 R_1 C_1} \frac{4\pi}{\lambda} u(t) \quad (6)$$

$$U_2(t) = \frac{1}{K_2 R_2 C_2} \frac{4\pi}{\lambda} u(t + \delta t) \quad (7)$$

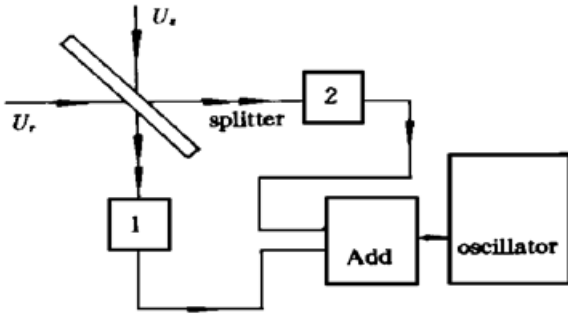


图 6 共轭外差干涉输出图

Fig. 6 Conjugate heterodyne interferometric output

式中 $\delta t = \frac{d_1 - d_2}{c}$ 是光从分束器传播到两光电探测器的时间差, 是一常数。若 $u(t)$ 是频率为 ω 的正弦信号, 则经加法电路后, 它们的输出可写成

$$\begin{aligned}
 U(t) &= U_1(t) + U_2(t) = \\
 &U_1 \sin(\omega t + \phi_1) + U_2 \sin(\omega t + \phi_2) = \\
 &U \sin(\omega t + \theta)
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

式中 $U^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2\cos(\omega\delta t)$, 若 $d_1 - d_2 = 1 \text{ cm}$, $\omega = 2\pi \times 10^7$, 则 $\cos(\omega\delta t) \approx 1$ 。所以 $U = U_1 + U_2$, θ 也为一常数。由此可见, 采用外差干涉的共轭输出, 如果光电探测和电路的传输系数相同, 光能将得以充分利用, 干涉仪的输出电压将增大一倍。

6 结 论

激光外差干涉法能有效探测固体光滑表面的激光超声脉冲, 但光能的利用率不足四分之一。信号光与参考光的空间准直性和在分束器上的入射角对外差信号的强度和信噪比有极大的影响。为保证有足够的信噪比, 准直角必须控制在准直角阈值以内, 而且愈小愈好。对不同的入射角, 外差信号存在一个极大值, 选择最佳入射角入射, 可使探测信号提高近一倍。改变传统的干涉仪单边干涉输出的方法, 采用两边共轭干涉输出, 又可使探测信号提高一倍。这样外差干涉法也能有效地探测粗糙固体表面的激光超声脉冲。

参 考 文 献

- 1 J. P. Monchalin. Heterodyne interferometer laser probe to measure continuous ultrasonic displacement. *Rev. Sci. Instrum.*, 1985, **56**(4) : 543~ 546
- 2 龚育良, 李红卫, 白世武 等. 激光外差探测超声位移的原理、方法和实验. *声学学报*, 1996, **21**(3) : 259~ 264
- 3 白世武, 龚育良. 空间准直性对激光外差干涉信噪比的影响. *光学仪器*, 1994, **16**(1) : 1~ 5
- 4 龚育良, 张永智, 丁红胜. 信号光的入射角和分光片对激光外差干涉信号强度的影响. *光学仪器*, 1997, **19**(1) : 9~ 13

Research of Detection of Solid Surface Laser Ultrasonic Pulses Using a Laser Heterodyne Interferometric Method

Gong Yuliang Zhang Yongzhi Liang Haiyan Bai Shiwu
(Department of Physics, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract This paper describes the measuring principle and an experimental study of laser ultrasonic pulses by the laser heterodyne interferometric method. A method of increasing the intensity of the detected signal is developed.

Key words heterodyne interferometer, detection, ultrasonic pulse