

利用激光干涉法测量激光超声下非镜面钽膜的 表面波速度

马鹤立 刘盛刚 陶天炯 翁继东

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 基于传统的迈克耳孙干涉系统,设计了一种测量纳秒脉冲激光加载下非镜面金属膜表面波速度的技术。为得到特征明显的表面波信号,在非镜面钽膜前放置了会聚透镜,并且在参考光路使用了衰减器保证两束参与干涉的光满足光强匹配。从干涉信号强度随时间的变化中,可以观察到明显的表面波特征信号。通过测量不同距离探测点处表面波到达的时间,并进行线性拟合,可以得到常压下钽膜中表面波的传播速度,并以此速度为基础计算了常压下钽膜的横波速度,其结果与已报道的实验结果相当。

关键词 测量;表面波速度;激光超声;迈克耳孙干涉仪

中图分类号 TN247; O426 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.101201

Measurement of Laser-Generated Surface Wave Velocity of Non-Specular Tantalum Slice Based on Laser Interference

Ma Heli Liu Shenggang Tao Tianjiong Weng Jidong

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Under the loading of nanosecond laser pulse, a surface wave ultrasonic velocity measurement technology for non-specular surface metal sample based on Michelson interferometer system is developed. In order to obtain characteristic signal of surface wave, the convergent reflection signal light from non-specular surface of tantalum slice interferes with attenuating reference light. In the interference intensity change history, distinct characteristic signal of surface wave can be inspected. Through the result of arrival time of different detection points and linear fitting method, surface wave of tantalum is successfully measured. A result of transverse wave velocity comparable to the reported one is obtained based on the measured surface wave ultrasonic velocity.

Key words measurement; surface wave velocity; laser ultrasound; Michelson interferometer

OCIS codes 120.1880; 240.6690; 280.3375

1 引言

材料力学性能研究是材料科学中的一项重要课题。在等温物态方程研究和地球物理研究中,获取材料的弹性参数对准确认知材料热力学特性、了解物质弹性特征非常关键,已成为材料力学性能研究中的前沿问题。通过测量材料纵波声速和表面波声速,可以给出等温物态方程初始条件,计算出材料的弹性模量,如泊松比、剪切模量、体积模量和杨氏模量。所以,精确地测量材料在不同压力和温度下的纵波声速和表面波声速,对准确了解材料的力学性能至关重要。

利用激光超声检测技术来测量材料在不同压力和温度下的声速,是一种无损非接触的优良声速测量方法,相对于传统的压电换能声速测量方法^[1],该技术无需使用耦合介质,工作距离长,提高了测量结果的准确性,也避免了耦合介质在实验中污染样品,可以在高温高压下进行材料力学性能的测量。在过去的30年中,光学激光超声检测技术发展很快,常见的系统主要有共焦法布里-珀罗干涉系统(CFPI)^[2-5]、光子-电动势接收器^[6]、光束偏转技术(OBD)^[7-9]、电磁声换能技术(EMAT)^[10]。上述技术中,CFPI和光子-电动势接收器

收稿日期: 2013-05-04; **收到修改稿日期**: 2013-06-20; **网络出版日期**: 2013-09-02

基金项目: 冲击波物理与爆轰物理重点实验室基金(9140C671001120C6707)

作者简介: 马鹤立(1987—),男,硕士,研究实习员,主要从事瞬态光电测量方面的研究。E-mail: marcos12@126.com

成本高,系统搭建复杂^[9]。OBD采用了光纤耦合从样品表面反射光的强度变化作为信号,虽然系统结构简单,但超声信号强度较低。EMAT能够得到丰富的超声信号^[11],但由于采用了电磁耦合结构,工作距离十分有限,通常只有毫米量级。

光干涉法^[12-13]也是探测超声信号较为常见的方法,它通过表面波经过探测点时产生的位移振动使干涉光强变化来探测超声信号,其光路相对简单。但如果有一些特殊场合应用,如样品表面未精磨加工、在高温高压环境下已出现变形或相变等情况,从样品表面反射的光信号已较弱,要得到强度和空间分辨率较高的信号,需要解决信号光与参考光光强匹配和探测光斑直径过大的问题。

本文利用光干涉法在常温常压下测量厚度为 55 μm 的非镜面钽膜在纳秒脉冲激光作用下产生的表面超声波声速。实验中,通过在样品前增加会聚透镜达到控制探测距离和会聚探测光的目的,另外,利用在干涉系统参考支路增加衰减器的方法匹配光强,以期得到特征明显的表面波信号。这种测试系统的结构较为简单,可以为后续发展 DAC 加载下材料高压声速测量装置提供参考。

2 实 验

2.1 实验原理

当脉冲光的功率密度大于 10^7 W/cm^2 时^[14-15],材料表层的温度会瞬间升高达到材料的熔点,使得表面气化或形成等离子体,有小部分物质被喷射出表面,对材料本身会产生一个反作用力,激发声波并且在材料中传播。理论上,在无限大半平面空间中,脉冲激光作用下产生的声波会沿着作用面表面横向传播形成表面波,其传播满足瑞利波动方程。波面经过的位置会发生振动,位移变化历史一般表现为上下跳动的单脉冲信号。

选择与抽运激发点间隔一定距离 d 的位置作为探测点,将光学迈克耳孙干涉系统中的某个支路的光照射在参考点上,使其反射光与另一支路从反射镜反射的光发生干涉,考虑单色同偏振的光波叠加情况,在迈克耳孙干涉仪中干涉光强满足关系

$$I(P,t) = |E_{\text{ref}}(P,t) + E_{\text{sig}}(P,t)|^2 = |E_{\text{ref}}(P,t)|^2 + |E_{\text{sig}}(P,t)|^2 + 2|E_{\text{ref}}(P,t)||E_{\text{sig}}(P,t)|\cos[k\delta(t) + \varphi], \quad (1)$$

式中 $E_{\text{ref}}(P,t)$ 、 $E_{\text{sig}}(P,t)$ 分别为参考光和信号光到达探测器时的电场强度分量, $\delta(t)$ 为 t 时刻两束参与干涉光波之间的光程差, k 为光真空波数, φ 为两束光之间的随机相位差。其信号的调制深度满足

$$K = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} = \frac{2|E_{\text{ref}}(P,t)||E_{\text{sig}}(P,t)|}{|E_{\text{ref}}(P,t)|^2 + |E_{\text{sig}}(P,t)|^2}, \quad (2)$$

从(1)式可知,当表面波到达探测点引起振动位移 $\Delta\delta$ 时,干涉光强会随振动位移 $\Delta\delta$ 发生变化,由于干涉光光强与参与干涉的两束光之间的光程差成余弦变化关系,波长量级的位移变化会使得光强在一个周期以内变化。并且根据(2)式,信号强度与参与干涉的两束光强的匹配程度有关,两束光的强度越接近,信号调制深度大,表面波信号幅度越大。因此,对于非镜面的金属样品来讲,采用一定的方法调节迈克耳孙干涉的两条支路光强使两者匹配,可以得到特征明显的信号。另外,选择带宽合适的示波器,可以减少信号中因外界环境变化而导致的振动噪声。

在本实验中,通过改变脉冲抽运光的入射角来调节抽运激发点和探测点之间的距离 d ,测量在单次脉冲光冲击和连续 20 次脉冲光冲击下的表面波传播至探测点的平均时间 t ,利用线性拟合求出表面波的传播速度 C_R 。

2.2 实验装置

实验在室温常压下进行,光路如图 1 所示。其中测量样品为厚度 55 μm 、直径 25.4 mm、表面非镜面的钽膜。探测光路基于迈克耳孙干涉系统,Nd:YAG 连续(CW)激光器输出的激光(功率为 700 mW)经分束镜 BS1 分为两束光,一束经衰减片和反射镜 M2 反射后作为参考光,另一束经宽带分束镜 BS2 和焦距为 100 mm 的平凸透镜聚焦后照射样品作为信号光。由于测试钽膜表面不平整,漫反射作用较为明显,所以在实验中,样品被放置在透镜的焦平面上,使得照射在探测点上光斑的直径在微米量级。在抑制漫反射、增加信号光强度的同时,使信号光返回通过 100 mm 焦距透镜后能够成为准平行光,可与参考光在焦距为 30.8 mm 的透镜前发生干涉,形成牛顿干涉环。另外,100 mm 焦距透镜汇聚入射平行光,缩小了光照面积,提高了测量的空间分辨率。参考光路的滤光片起到了匹配光强、增强干涉条纹对比度的作用。抽运激光采用了波长为 532 nm、脉宽为 3.87 ns、

单脉冲能量为 8.8 mJ 的 Nd:YAG 脉冲激光,经石英片透射和测量样品前 100 mm 焦距透镜会聚后冲击样品表面,其功率密度大于 10^7 W/cm²,以烧蚀机制在样品中激发表面波。表面波传播至探测点并使探测点处产生振动,从而产生光强变化的干涉信号。变化的光信号经 30.8 mm 焦距透镜耦合进入多模光纤中,经光电(O/E)转换器转换后传入带宽为 500 MHz 的示波器(OSC)中进行记录。在实验中,利用雪崩光电探测器(APD)接收石英片在脉冲激光照射下产生的微反射光作为触发信号。

实验中,脉冲激光器下方的反射镜 M3 被放置在旋转位移台上,通过控制其反射角,可以调节探测点和抽运激发点之间的距离 d ,通过测量表面波到达时间 t ,可以达到测量表面波传播速度的目的。测量距离控制的原理如图 2 所示。

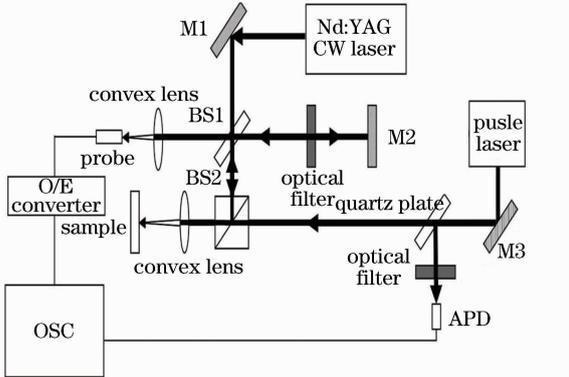


图 1 实验光路图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment

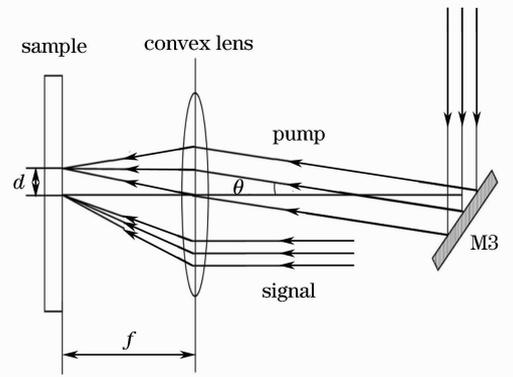


图 2 旋转位移台控制测量距离的光路图

Fig. 2 Schematic diagram for controlling the distance between signal and pump in use of rotation stage

调试光路时,可先用 CCD 相机观察抽运光和信号光中心位置,调节两束光中心位置至完全重合。由图 2 所示的光路可知,当反射镜转动 α 角度时,反射光转动 $\theta = 2\alpha$,此时,在样品上信号光与抽运脉冲光中心距离满足

$$d = f \times \tan \theta \approx f\theta. \quad (3)$$

实验中所用的旋转位移台步长为 0.02° ,距离移动步长 Δd 即为

$$\Delta d = 100 \times \frac{2 \times 0.02\pi}{180} = 0.07 \text{ mm}. \quad (4)$$

3 结果和讨论

利用数字示波器的单次模式和平均模式,测量在单次脉冲光冲击(图 3)和连续 20 次(图 4)脉冲光冲击下,不同测量点处干涉光强随时间的变化历史。其中,0 时刻代表 APD 接收触发信号的起跳时间。实验中,

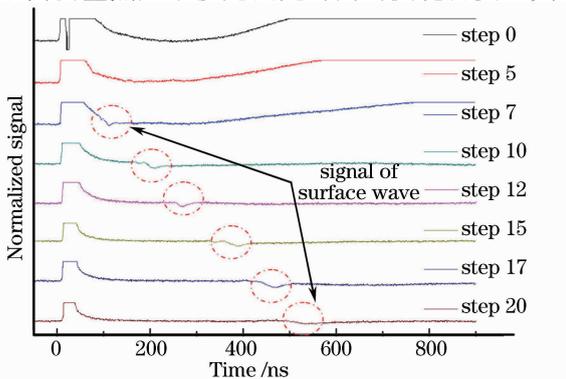


图 3 单次脉冲光冲击下不同测量点处的表面波信号
Fig. 3 Ultrasonic surface wave signals captured with single pulse

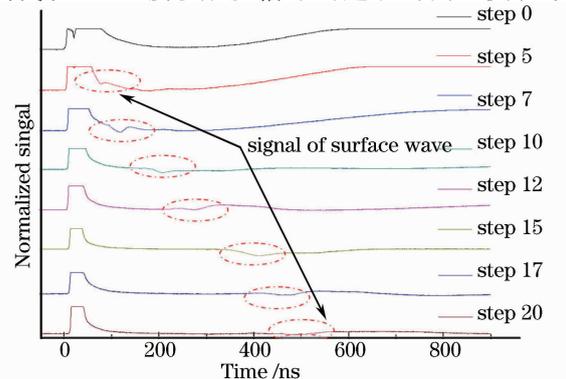


图 4 连续 20 次脉冲光冲击下不同测量点处的表面波信号
Fig. 4 Ultrasonic surface wave signals captured with average of 20 pulses

反射镜 M3 依次旋转 to 第 5、7、10、12、15、17、20 步位置,对应探测点相对于抽运点的距离 d 依次为 0.35、0.49、0.7、0.84、1.05、1.19、1.4 mm。由于脉冲激光与探测光波长相同,脉冲光冲击钼膜时产生的强散射光能被多模光纤接收进入示波器,所以在触发后首先会出现平顶状的光饱和和信号,之后可以看到明显的表面波信号(图 3、4 中虚线圆圈中)。表面波到达时间随着探测距离 d 的增加出现产生了明显的移动。

从图 3 和图 4 中的虚线圈处读出表面波信号的到达时间 t ,将这些数据点绘制成图并对数据点进行线性拟合,可以得到表面波在钼膜中的传播速度 C_R ,拟合结果如图 5 所示。拟合得到的单次脉冲光抽运下表面波声速测量值为 $C_{R_s} = 2.07 \pm 0.09$ km/s,连续 20 次脉冲光抽运下表面波声速测量值为 $C_{R_a} = 2.25 \pm 0.16$ km/s。相对于单次脉冲抽运,20 次脉冲抽运下由于每发实验无法保证测量条件完全相同,导致信号展宽,影响测量信号的判读,使得两个实验结果略有偏差。另外,由于探测光和抽运光的波长相同,所以在触发后 100 ns 内,弱的超声信号淹没在抽运光的强散射光中,导致图 3 中在第 5 步未采集到特征明显的表面波信号。为了验证实验结果的准确性,利用测量的表面波声速 C_R 来计算横波声速 C_T 。根据超声声速与剪切模量 G 之间的关系,以及使用 Viktorov 提出的近似解推导表面波速度 C_R 和横波声速 C_T 之间的关系满足^[16]

$$\frac{C_R}{C_T} = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma}, \quad (5)$$

式中 σ 为材料的泊松比。将钼的泊松比 $\sigma = 0.35$ 和测量的表面波声速 C_R 代入(5)式中,可以得到钼的横波声速为 $C_{T_s} = 2.22 \pm 0.10$ km/s, $C_{T_a} = 2.41 \pm 0.17$ km/s,结果与美国洛斯阿拉莫斯国家实验室测量的钼的常压横波声速 $C_T = 2.09$ km/s 结果相近^[17]。

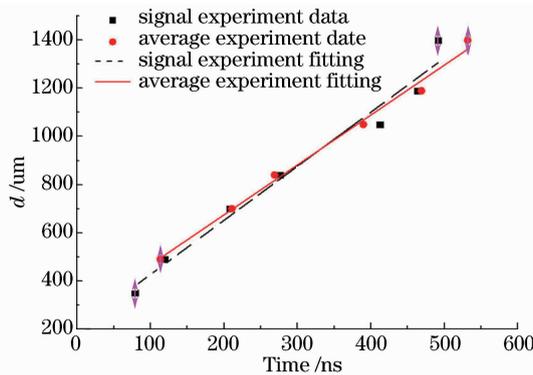


图 5 线性拟合结果

Fig. 5 Result of linear fitting

4 结 论

采用迈克耳孙干涉系统成功测量了非镜面钼膜在纳秒激光脉冲加载烧蚀机制下产生的表面波速度。由于在测量光路中控制了多条干涉支路的光强以及采用了会聚光照射探测点,使从非镜面钼膜反射的信号光与参考光匹配,从干涉光强信号中可以明显地观察到表面波到达时的特征信号。通过对不同探测距离 d 处测量到的传播时间 t 进行线性拟合,可以获得表面波声速。单次脉冲光抽运下表面波声速测量值为 $C_{R_s} = 2.07 \pm 0.09$ km/s,连续 20 次脉冲光抽运下表面波声速测量值为 $C_{R_a} = 2.25 \pm 0.16$ km/s。利用表面波与横波声速之间的关系可以计算出横波声速,单次脉冲光抽运下钼的横波声速计算值为 $C_{T_s} = 2.22 \pm 0.10$ km/s,20 次连续脉冲抽运下钼的横波声速计算值为 $C_{T_a} = 2.41 \pm 0.17$ km/s,其结果与相关测量结果 $C_T = 2.09$ km/s 相近,表明了这种方法的可靠性。

参 考 文 献

- Dong Liming, NiChenyin, Shen Zhonghua, *et al.*. Determination of elastic constants of materials based on the velocity measurement of laser-generated multi-mode ultrasound[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4):0408004.
董利明,倪辰荫,沈中华,等. 基于激光激发多模态超声波速测量的材料弹性常数测定[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0408004.
- J P Monchalin. Optical detection of ultrasound at a distance using a confocal Fabry-Pérot interferometer[J]. Appl Phys

- Lett, 1985, 47(1):14-16.
- 3 J P Monchalin, R Heon. Laser ultrasonic generation and optical-detection with a confocal Fabry-Pérot interferometer[J]. Mater Eval, 1986, 44(9): 1231-1237.
- 4 J P Monchalin, R Heon, P Bouchard, *et al.*. Broad band optical detection of ultrasound by optical sideband stripping with a confocal Fabry-Pérot[J]. Appl Phys Lett, 1989, 55(16): 1612-1614.
- 5 Kong Lingjian, Zhu Guifang, Jiang Congqun. New detection application of laser ultrasonic[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(1): 011203.
孔令剑, 朱桂芳, 姜从群. 激光超声光学检测应用[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(1): 011203.
- 6 M P Petrov, S I Stepanov, G S Trofimov. Non-steady-state EMF in nonuniformly illuminated photo conductor[J]. Pis'ma Zh Tekh Fiz, 1986, 12: 916-921.
- 7 J W Wagner. Optical Detection of Ultrasound. in R N Thurston, A D Pierce (eds.) Ultrasonic Measurement Methods[M]. San Diego: Academic, 1990. 201-266.
- 8 Xu Rongqin, Chen Xiao, Zhao Rui, *et al.*. Optical detector for laser ultrasonic[J]. Instrument Technique and Sensor, 2005, (2): 20-22.
徐荣青, 陈笑, 赵瑞, 等. 激光超声光学测试仪[J]. 仪表技术与传感器, 2005, (2): 20-22.
- 9 N Chigarev, P Zinin, L C Ming, *et al.*. Laser generation and detection of longitudinal and shear acoustic waves in a diamond anvil cell[J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(18): 181905.
- 10 H Ogi, M Hira, T Ohtani. Line-focusing electromagnetic acoustic transducers for the detection of slit defects[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Frequency Control, 1999, 46(2): 341-346.
- 11 A S Murfin, R A J Soden, D Hatrick. Laser-ultrasound detection systems: a comparative study with Rayleigh waves[J]. Meas Sci Technol, 2000, 11(8): 1208-1219.
- 12 C B Scruby, L E Drain. Laser Ultrasonics: Techniques and Applications[M]. New York: Adam Hilger, 1990.
- 13 Gong Yuliang, Zhang Yongzhi, Liang Haiyan, *et al.*. Research of detection of solid surface laser ultrasonic pulses using a laser heterodyne interferometric method[J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(9): 819-822.
龚育良, 张永智, 梁海岩, 等. 用外差干涉法探测固体表面激光超声的研究[J]. 中国激光, 1997, 24(9): 819-822.
- 14 Tan Xianglin, Pan Mengchun, Luo Shitu, *et al.*. Testing method for mechanical properties of materials based on laser-generated ultrasonic[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(11): 1183-1187.
谭项林, 潘孟春, 罗诗途, 等. 基于激光超声的材料力学性能测试方法研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(11): 1183-1187.
- 15 He Cunfu, Zhou Xingeng. Non-contact generation and reception of surface waves[J]. J Tsinghua University (Science and Technology), 1998, 38(8): 76-78.
何存富, 周辛庚. 表面波的非接触式产生与接收[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(8): 76-78.
- 16 L Viktorov. Rayleigh and Lamb Wave[M]. New York: Plenum Press, 1967. 35-40.
- 17 C L Mader, T R Gibbs, J W Hopson, *et al.*. LASL Shock Hugoniot Data[M]. Berkeley: University of California Press, 1980. 136.