

由于表面粗糙引起的激光声表面波色散的实验和理论研究*

袁玲¹⁾²⁾ 孙凯华²⁾ 崔一平^{1)†} 沈中华²⁾ 倪晓武²⁾

1) (东南大学电子科学与工程学院, 南京 210096)

2) (南京理工大学理学院信息物理系, 南京 210094)

(2010年12月20日收到; 2011年5月5日收到修改稿)

表面粗糙是材料制造过程中必有的副产物, 粗糙表面会引起其中传播的声表面波的速度发生变化. 在利用激光声表面波对材料性质进行评估时, 常用宽带的激光声表面波速度频散特性对材料性质进行反演. 为了研究表面粗糙度是否能作为反演的特征参数之一, 本文建立了激光在表面粗糙样品中激发声表面波、聚偏氟乙烯换能器宽带接收声表面波的实验装置来研究不同粗糙度表面对声表面波速度的影响; 理论上建立了激光在粗糙表面中激发声表面波的计算模型, 利用有限元法得到声表面波的时域特征, 并进一步得到声表面波的速度色散曲线, 理论结果和实验结果能很好地拟合. 这为利用激光声表面波对表面粗糙的评估提供理论和实验依据.

关键词: 表面粗糙, 激光声表面波, 速度色散, 聚偏氟乙烯传感器, 有限元法

PACS: 42.62.-b, 43.35.+d

1 引言

激光超声技术^[1,2]是近年来新发展起来的一种无损评估技术, 由于其具有非接触、宽带、多模态激发等特性, 目前已经广泛地应用于缺陷的检测^[3,4]、各类复合材料和构件等的力学性质^[5]及薄膜厚度^[6]的评估、残余应力^[7]等的检测.

当材料受激光束辐照时, 材料由于吸收激光能量导致局部温升, 温升引起热膨胀, 能同时在固体中激发出纵波、横波、表面波. 当超声波在样品中传播时, 受到材料本身力学特性、组织结构、几何形状等特性的影响, 超声波的幅度、频谱、模式、速度会发生变化, 从而, 根据接收到的超声波的特性可以对材料进行无损评估. 在利用激光超声技术对固体的表面层特性进行评估时, 声表面波是最常用的一种波的模式. 因为声表面波主要渗透进样品表面以下约一个波长的深度, 因此它对于样品的表层性质及结构更加敏感. 声表面波被广泛地应用于薄膜性质、近表层材料特性、缺陷等的评估.

表面粗糙是材料和构件制造过程中必有的副产物, 无论是毛坯还是已经加工成型的材料表面都不可能是绝对光滑的. 对于表面粗糙度的测量^[8,9], 目前常用的方法主要有比较法、触针法、斜面法、声表面波法. 比较法即用标准样块, 通过肉眼或用手触摸, 对粗糙度进行定性评定, 该方法测量精度低. 触针法是利用触针直接在工件被测表面上轻轻划过时, 输出被测表面轮廓, 这种方法对于恶劣环境中的表面检测无能为力. 斜面法是检测精度最高的一种方法, 但需要将样品剖开. 对于粗糙的金属表面, 由于微晶相在晶体表面随机分布, 使得在固体表面传播的声表面波发生衰减、频移、色散和模式转换. 在利用激光声表面波对样品特性进行评估, 如在对冲击强化处理的样品进行检测时, 冲击后的近表面层的残余应力、位错密度和表面粗糙度都对激光声表面波的传播产生影响. 因此, 研究表面粗糙度对激光声表面波传播特性的影响, 可以在利用激光声表面波对样品力学、微观结构特性等进行评估的同时, 能够将表面粗糙度也作为

* 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20103219120040)、国家自然科学基金 (批准号: 61108013)、中国博士后科学基金 (批准号: 20100481087) 和江苏省自然科学基金 (批准号: BK2011695) 资助的课题.

† E-mail: cyp@seu.edu.cn

评估参数之一进行评估.

利用聚偏氟乙烯 (PVDF) 压电换能器接收激光激发的声表面波对样品进行无损评估是常用的一种实验方法, 目前已成功地应用于表面缺陷的检测和表层材料力学特性的研究. 本文建立了利用激光在标准粗糙度比对板中激发声表面波、PVDF 压电传感器对声表面波进行探测的实验装置, 讨论了不同粗糙度对声表面波传播特性的影响, 结果表明此探测方法对于表面粗糙度具有较高的灵敏度. 在理论方面, Maradudin 和 Mills^[10] 利用 Green 函数法对声表面波在各向同性材料粗糙表面发生衰减的机制进行了研究. Eguiluz 和 Maradudin^[11] 分别用 Rayleigh 法对声表面波在各向同性粗糙表面发生频散和衰减进行了研究. 但是这些半解析的方法仅讨论了表面粗糙度对声表面波的传播特性的影响, 很难结合样品的几何特性、非均匀力学特性对样品中传播的声表面波进行研究. 本文利用有限元法研究了表面粗糙对激光声表面波传播的影响. 有限元法能够很方便地处理复杂的结构, 并能够得到全场的数值解. 迄今为止, 有限元法^[12] 已成功地用于利用声表面波对样品中的缺陷、复合材料材料性质、薄膜材料的厚度等特征进行表征. 本文建立表面粗糙样品中激光声表面波传播的理论模型, 得到声表面的速度色散特性, 实验结果和理论结果符合得很好. 本文的工作为利用此实验和理论方法对样品进行激光超声无损评估时, 将表面粗糙度作为评估参数之一提供了理论和实验依据.

2 实验研究

2.1 实验样品及实验系统

实验样品是 GB6060.5 抛 (喷) 丸表面粗糙度比较样块, 该样块用以与抛 (喷) 丸、喷砂加工的表面进行比较, 通过视觉和触觉评定表面粗糙度, 作为加工工件表面粗糙度数值的参考依据. 该样块具有多个粗糙度等级, 样块材料为镍合金.

搭建了激光在粗糙度比较样块上激发声表面波、利用自制的 PVDF 压电传感器^[13] 接收声表面波的实验装置, 如图 1 所示. 激发用的激光为波长 $1064\text{ }\mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 激光, 脉宽为 1 ns , 能量为 $100\text{ }\mu\text{J}$. 经衰减片后的激光束有小部分光经分束镜反射进入光电二极管 (上升时间为 100 ps), 光电二极管直接与示波器相连, 作为触发信号. 经分束

镜后的大部分光束经三棱镜改变方向后, 再经柱面镜聚焦在样品上, 通过计算机控制电控平移台来实现光源的扫描. 探测用的 PVDF 压电传感器与前置放大器相连, 固定在实验台上. 利用该传感器进行激光超声检测中, PVDF 薄膜直接与样品表面接触, 无需耦合剂耦合, 由于刀口宽度为微米量级, 长度为毫米量级, 相差 1000 数量级, 可以认为是线检测, 能接收到宽频带的超声信号. 当激光辐照在样品表面激发声表面波时, 声表面波沿表面传播至探测点, 由于声扰动导致材料表面发生微小变形, 对 PVDF 薄膜产生机械应力, 由 PVDF 薄膜将其转换为电荷信号, 经过前置放大器放大输入到 TDS3054B 数字示波器. 通过固定探测位置、改变激发位置来实现不同传播距离的声表面波的探测.

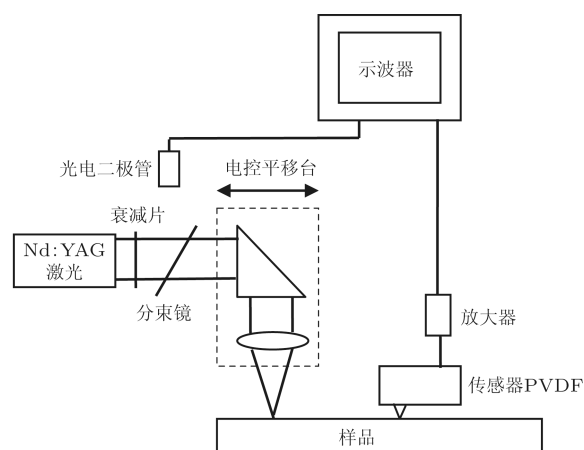


图 1 粗糙样品上的激光声表面波的激发和接收装置示意图

2.2 实验结果和讨论

控制入射激光的能量密度来保证声表面波的热弹激发, 使样品表面不被破坏. 在利用激光声表面波对样品进行检测时, 无论是光学还是非光学的接收方法, 如我们这里用到的 PVDF 传感器技术, 都不适用于过于粗糙的表面. 因此我们在表面轮廓算术平均偏差 R_a 最小的 3 个样品上进行了实验, R_a 分别为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.8\text{ }\mu\text{m}$.

在表面粗糙度为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 的比对块表面上, 相距 5 mm 的两点接收到的时域波形见图 2. 在整个检测过程中, 保证 PVDF 传感器位置固定, 通过电控平移台移动光源来改变激发点与接收点的距离. 在均匀而光滑的样品上利用 PVDF 传感器探测到的声表面波信号是一个双极信号, 而从图 2 的波形中可以看到, 接收到的声表面波呈现一定的色散趋

势,并且随着传播距离的增加,声表面波色散也越来越大.随着传播距离的增加,声表面波的幅度明显减小,表面粗糙使得声表面波发生散射而衰减.在粗糙度不同的其他样品上传播的激光声表面波有相同的特性.

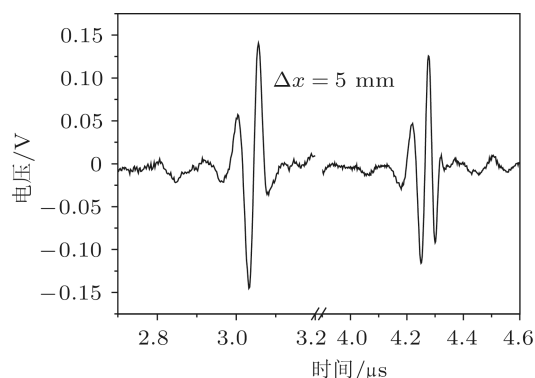


图2 R_a 为 $0.8\ \mu\text{m}$ 的粗糙样品中不同传播距离处接收的时域波形

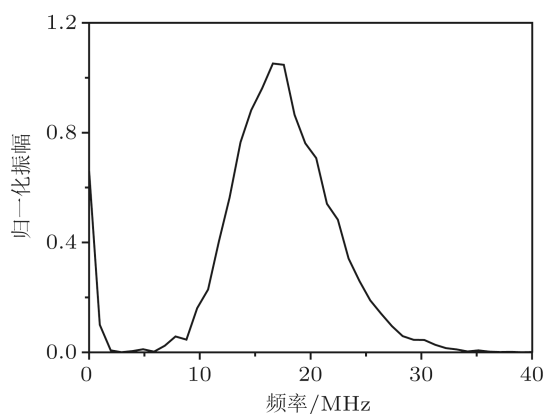


图3 粗糙样品中传播的激光声表面波的频谱

对在不同点接收到的时域信号,用相位谱法得到在样品中传播的激光声表面波的频率谱和速度谱.图3为由时域波形经FFT所得的频谱图.一般来说,探测的声表面波信号频带宽度主要由激光脉宽、沿着传播方向的线源的尺寸、材料的散射和PVDF探测器的响应带宽等因素决定.在这些因素中,PVDF传感器的响应带宽约在百兆赫兹,激光的脉宽1 ns,因此探测到的声表面波的带宽主要取决于激光线源的宽度及材料的散射.在本实验中,激光在粗糙样品中激发的声表面波的频谱范围约在30 MHz以内,中心频率约在17 MHz.由于表面粗糙是样品制备过程中的副产物,因此,实际在利用激光声表面波的色散特性对样品表层性质进行评估时,要根据待评估的深度确定宽带声表面波的中心波长,根据中心波长和样品的特性确定使用激

光的脉宽、线源尺寸及探测器的响应带宽等因素.同时控制激光的能量和光斑的聚焦尺寸,以实现激光声表面的热弹激发.

图4是由相位谱法得到的不同粗糙度样品中传播的激光声表面波的速度色散曲线,纵坐标是速度的变化,表面粗糙使得激光声表面波的速度减小,表面晶粒的无序排列使得小波长波散射严重,即高频成分的波受表面粗糙度影响大,速度减小大.对于粗糙度较小的情况, $R_a = 0.2\ \mu\text{m}$,速度的变化随频率的增加近似呈线性变化的趋势;对于表面粗糙度较大的情况 $R_a = 0.4, 0.8\ \mu\text{m}$,在频率较高时速度色散曲线呈现非线性变化趋势,主要是因为大的粗糙度比对板在制作过程中引入了更大的表面残余应力,因此使得这里得到的激光声表面波的速度色散不再仅仅是由表面粗糙引起的,表面残余应力对其速度的影响也不可忽略.由此可以看出,此实验装置对样品的表面粗糙特性非常敏感,当样品的表面粗糙度不同时,样品中传播的相同频率的声表面波,其速度变化的大小也不同.因此利用此实验装置对样品特性进行激光超声进行评估时,表面粗糙度可作为评估参数之一.

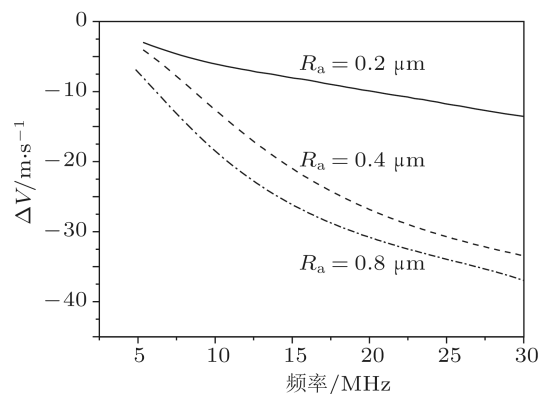


图4 粗糙样品中传播的激光声表面波的速度色散曲线

3 理论研究

有限元法是近年来发展起来的一种求解偏微分方程的数值计算方法.由于利用该方法能方便地处理复杂的结构,并且能够有效、方便地研究物体的力学、热学等参数对波的传播特性的影响,因此目前已广泛用于研究波的传播问题.由于表面粗糙是物体的基本特性之一,粗糙表面对波的传播特性会产生影响.本文利用有限元法研究激光在粗糙表面激发的声表面波的传播特性.

3.1 有限元理论

激光束辐照在样品表面, 样品吸收激光能量产生局部瞬态温度场, 该过程满足热传导方程^[12]

$$\rho c \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right) + q, \quad (1)$$

式中 $T(r, z, t)$ 表示 t 时刻的温度分布; ρ , c 和 k 分别是密度、热容量和热传导系数; q 为热源项, 计算所采用的激光光束的时间和空间分布均为 Gauss 分布. 对于金属当激光脉冲垂直照射到其表面时, 由于趋肤效应热影响区深度约几十微米. 激光在金属中热弹激发超声波时, 激光对样品加热产生的温度场已有较多文献讨论^[6], 这里不做赘述. 粗糙表面不影响激光辐照在金属中的温度场分布, 边界按绝热边界条件处理.

当脉冲激光的辐照能量低于样品的熔融阈值时, 样品吸收激光能量导致局部热膨胀, 产生瞬态位移场, 声波的传播满足 Navier-Stokes 方程:

$$(\lambda + 2\mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{U}) - \mu \nabla \times \nabla \times \mathbf{U} - \alpha (3\lambda + 2\mu) \nabla T(r, z, t) = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2}, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{U}(r, z, t)$ 是声场的瞬态位移分布, μ 是 Lamé 常数, ρ 是密度, α 是样品的热膨胀系数. 上表面满足自由边界条件, 初始位移和应力为零.

3.2 理论计算模型、结果及讨论

基于上面的基本理论利用有限元法对粗糙表面中的激光声表面波进行了研究. 首先建立了 Gauss 型随机粗糙表面, 如图 5 所示, 该粗糙表面的 $R_a = 0.2 \mu\text{m}$, 相关长度 $L = 3.13 \mu\text{m}$. 该相关长度由上文中提到的 GB6060.5 抛(喷)丸表面粗糙度比较样块中粗糙度为 $0.2 \mu\text{m}$ 的样块检测得到(经南京市计量测试所先进的机械轮廓仪进行检测标定).

计算时所采用的激光脉宽为 1 ns , 光斑半径为 $5 \mu\text{m}$, 样品的热学和力学参数均取镍合金的参数. 将通过求解热传导方程得到的温度场作为载荷进行结构分析, 得到在表面粗糙样品中传播的宽带的激光声表面波. 图 6(a) 和 (b) 分别是由有限元法计算得到的在光滑表面和表面粗糙度为 $0.2 \mu\text{m}$ 的样品中传播的激光超声波的时域波形, 图中的 L 是掠面纵波, R 是声

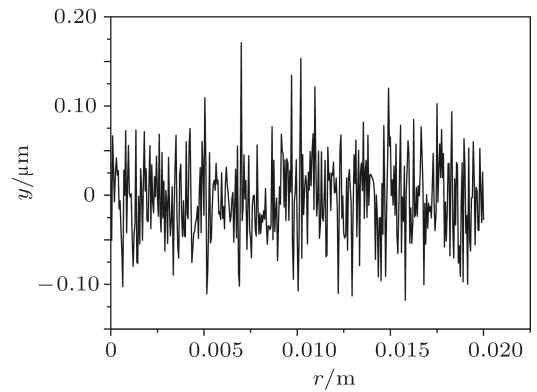


图 5 Gauss 分布的随机粗糙表面形貌

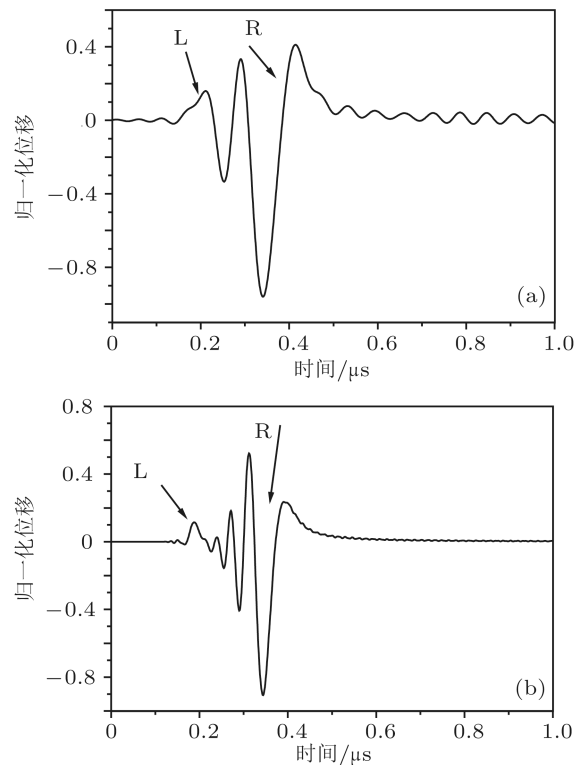


图 6 有限元法得到的接收距离为 1 mm 时的宽带的激光超声信号 (a) 光滑表面; (b) R_a 为 $0.2 \mu\text{m}$

表面波. 掠面纵波的速度约是声表面波的 2 倍, 故掠面纵波先到达; 由图 6(a), (b) 可知表面粗糙度明显地对声表面波的速度和色散特征产生影响. 在利用有限元法进行计算时, 由于粗糙表面的表面形貌过于不规则, 在进行离散和网格划分时, 这种形状的不规则导致了一定的离散误差, 从图 6 的时域波形中可以看出, 低频成分的波速度慢, 而高频成分的波传播速度快, 从而声表面波出现反常色散趋势. 为了准确地研究表面粗糙对激光声表面波速度的影响, 在讨论激光声表面波的频域特性时, 我们建

立了一个参考模型来消去离散误差. 我们先建立了一个 $R_a = 0 \mu\text{m}$ 的模型, 对该模型进行同样的网格划分进行离散, 计算得到该模型中声表面波传播的时域信号, 进而得到频域信号. 在计算由于表面粗糙引起的声表面波的速度色散时, 将 R_a 不为 0 时得到的速度色散信号与由该参考模型得到的速度色散信号相减, 从而消去由于离散引起的离散误差.

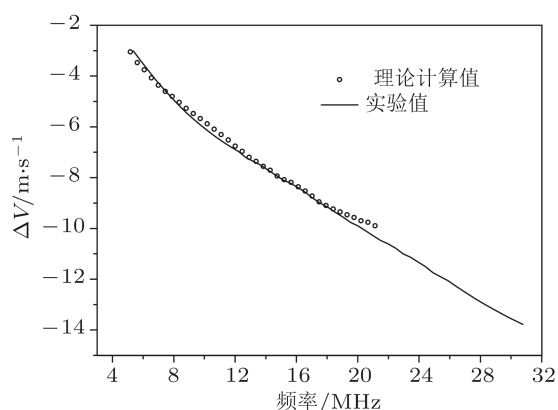


图 7 $R_a = 0.2 \mu\text{m}$ 的样品中传播的激光声表面波的速度频散曲线

利用相位谱法由时域信号计算得到样品中传播的激光声表面波的频谱和速度色散曲线, 频谱范围在 20 MHz 以内, 中心频率约在 10 MHz. 图 7 中圆点表示的理论计算得到的表面粗糙度为 $0.2 \mu\text{m}$ 的镍合金中传播的激光声表面波的速度色散曲线. 由于声表面波的能量主要集中在样品表面下约几个波长的范围内, 因此声表面波的传播特征取决于

表层材料的性质和结构. 对于粗糙表面, 粗糙度与粗糙样品表面的凹凸深度有关, 而相关长度反映了粗糙单元的平均周期, 表面样品表面形貌的不均匀性使得在其中传播的声表面散射, 从而影响了声表面波的传播速度. 实线是前面实验得到的表面粗糙度为 $0.2 \mu\text{m}$ 的镍合金粗糙度比对板中传播的激光声表面波的速度色散曲线. 由图 7 可以看出理论和实验结果拟合得很好. 在研究样品中传播的激光声表面波或利用激光声表面波对样品特性进行无损评估时, 常用到的有限元理论研究方法和 PVDF 压电换能器宽带接收声表面波的实验方法, 都可敏锐地得到表面粗糙度对声表面波速度频散特性的影响. 因此可以将表面粗糙度作为待评估地特征参数之一进行研究.

4 结论

建立了利用 PVDF 压电换能器宽带接收粗糙表面传播的激光声表面波的实验装置, 研究了不同表面粗糙度对激光声表面波传播速度的影响; 并利用有限元法从理论上研究了粗糙表面传播的激光声表面波的特性. 理论计算结果和实验结果具有很好的一致性. 因此, 在利用激光声表面波的速度色散特性对材料性质进行反演时, 表面粗糙度能够作为特征参数之一. 本文的研究工作为表面粗糙度的评估提供了实验和理论依据.

- [1] Han Q B, Qian M L, Zhu C P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 313 (in Chinese) [韩庆邦, 钱梦禄, 朱昌平 2007 物理学报 **56** 313]
- [2] Yuan L, Shen Z H, Ni X W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7058 (in Chinese) [袁玲, 沈中华, 倪晓武 2007 物理学报 **56** 7058]
- [3] Pantano A, Cerniglia D 2008 *Appl. Phys. A* **91** 521
- [4] Wang J S, Xu X D, Liu X J, Xu G C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7765 (in Chinese) [王敬时, 徐晓东, 刘晓峻, 许钢灿 2008 物理学报 **57** 7765]
- [5] Hurley D H, Reese S J, Park S K, Utegulov Z, Kennedy J R, Telschow K L 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 063510-1
- [6] Xu B Q, Shen Z H, Ni X W 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 6161
- [7] Karabutov A, Devichensky A, Ivochkin A, Lyamshev M, Pelivanov I, Rohadgi U, Solomatin V, Subudhi M 2008 *Ultrasonics* **48** 631
- [8] Hassan W, Blodgett M, Bondok S 2004 *Rev. Quant. Nondestruct. Eval.* **23** 262
- [9] Chen J C, Sun T, Wang J H 2010 *Proc. SPIE* **7656** 76562D-1
- [10] Maradudin A A, Mills D L 1976 *Ann. Phys.* **100** 262
- [11] Eguiluz A G, Maradudin A A 1983 *Phys. Rev. B* **28** 728
- [12] Sun H X, Xu B Q, Wang J J, Xu G D, Xu C G, Wang F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6344 (in Chinese) [孙宏祥, 许伯强, 王纪俊, 徐桂东, 徐晨光, 王峰 2009 物理学报 **58** 6344]
- [13] Shen Z H, Hess P, Huang J P, Lin Y C, Chen K H, Chen L C, Lin S T 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 124302/1

Experimental and theoretical analysis of the dispersion of laser-induced surface acoustic wave due to surface roughness*

Yuan Ling¹⁾²⁾ Sun Kai-Hua²⁾ Cui Yi-Ping^{1)†} Shen Zhong-Hua²⁾ Ni Xiao-Wu²⁾

1) (*Department of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

2) (*Department of Information Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

(Received 20 December 2010; revised manuscript received 5 May 2011)

Abstract

In the process of producing materials, the surface roughness always exists. And it can change the velocity of surface acoustic wave (SAW) which propagates in the material. To assess the properties of materials by laser induced SAW, an inverse method based on the wide-band velocity dispersion characteristic of laser-induced SAW is most commonly used. To study whether the surface roughness can be one of the inversion characteristic parameters, an experimental apparatus is constructed in this article. In the apparatus, the SAW is induced in the surface roughness sample by laser, and it is received by a polyvinylidene fluoride transducer with wide frequency band. Using this apparatus, we study the influences of different surface roughnesses on SAW velocity. In the paper a physical model of laser-induced SAW propagating in roughness surface is established theoretically. The time domain characteristic of SAW is obtained by the finite element method, and then the velocity dispersion curve of SAW is achieved. It is concluded that the theoretical result and the experimental result are in good agreement with each other. The studies in this article form theoretical and experimental bases for assessing surface roughness by means of laser-induced SAW technique.

Keywords: surface roughness, laser surface acoustic wave, velocity dispersion, polyvinylidene fluoride transducer, finite element method

PACS: 42.62.-b, 43.35.+d

* Project supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20103219120040), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61108013), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 20100481087) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK2011695).

† E-mail: cyp@seu.edu.cn