

文章编号: 1001-3806(2007)01-0029-02

# 基于激光光热位移技术纳米材料热扩散率的测量

杨淑连

(山东理工大学 电气与工程学院, 淄博 255049)

摘要: 为了测量纳米材料的热扩散率, 采用激光光热位移技术测量了不同频率下热位移的相位, 由相位的拟合曲线得到材料热扩散率的方法, 得到了不同退火温度下纳米 TiO<sub>2</sub> 热扩散率。结果表明, 纳米 TiO<sub>2</sub> 的热扩散率随退火温度升高而减小。

关键词: 激光技术; 热扩散率测量; 光热位移技术; 纳米材料

中图分类号: TN 247 文献标识码: A

## Measurement of diffusivity of nanometer material by means of laser photothermal displacement technique

YANG Shu-lian

(School of Electric and Electronic Engineering Shandong University of Technology Zibo 255049 China)

**Abstract** A method for measuring diffusivity of nanometer material by means of laser photothermal displacement technique is presented, which measures the phase of the thermal displacement in different frequencies and gives the diffusivity of material by fitted curves of phase. Experimental results of the diffusivity of nanometer TiO<sub>2</sub> at different annealing temperatures are given and the results indicate that the diffusivity of nanometer TiO<sub>2</sub> decreases while the annealing temperature rises.

**Key words** laser technique; thermal diffusivity measurement; photothermal displacement technique; nanometer material

### 引 言

激光光热技术是近十几年来发展起来的一种非接触式无损检测技术, 它已被广泛应用于光谱分析<sup>[1, 2]</sup>、材料的性能测量与结构分析<sup>[3-6]</sup>等各方面的检测, 如材料的热扩散率的测量<sup>[7-9]</sup>。1982年, MARTIN 提出了光热位移技术, 探测由激光束照射试样表面所引起的位移<sup>[10]</sup>。由于光热位移技术具有区分表面和体吸收的能力, 同时检测又是非接触的, 因此, 它能在恶劣的环境下对试样进行检测。另外, 由于光热位移检测技术比其它光热技术具有更强的定位性, 因此, 它也是一种能用于显微镜、光热成像和进行深度分布无损检测的新技术。本文中研究了利用光热位移技术测量材料性能的原理与实验技术, 测量了 TiO<sub>2</sub> 材料的热扩散率, 并对测量结果进行了理论分析。

### 1 原 理

一束光强为以频率调制的抽运光束入射到均匀固体的试样表面上, 用一维热传导模型处理, 可得到薄试

样的光热位移为<sup>[11]</sup>:

$$\Delta l = [\eta\beta I_0 / 2\kappa_s (\beta^2 - \sigma_s^2)] \cdot (1 - \beta l - e^{-\beta l}) / \beta l \quad (1)$$

由此得薄试样信号的相位为:  $\varphi = -\omega / \alpha_s \beta^2$  (2)

式中,  $\sigma_s = (1 + i) \sqrt{\omega / 2\alpha_s}$ ,  $\alpha_s = \kappa_s / \rho_s c_s$  为试样的热扩散率,  $\rho_s$ ,  $c_s$ ,  $\kappa_s$  分别为试样的密度、比热容、热导率;  $l$  为试样厚度,  $\beta$  为试样的光吸收系数,  $\beta_l$  为试样的体积热膨胀系数,  $\eta$  为光能转换为热能的效率。在不同频率下测得试样光位移信号的相位, 根据 (2) 式, 利用最小二乘法非线性拟合, 即可得到材料的热扩散率。

### 2 实验装置

整个实验测量系统如图 1 所示, 入射激光采用功率为 1W 的 Ar<sup>+</sup> 激光器, 输出光束经 PAR192 型斩波器调制后, 经透镜聚焦在纳米材料 TiO<sub>2</sub> 试样表面上, 试样由于被加热导致其表面膨胀和产生位移, 而位移量

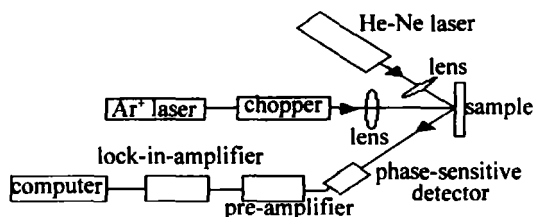


Fig 1 Schematic of the laser photothermal displacement for diffusivity measurement of sample

作者简介: 杨淑连 (1963-), 男, 副教授, 研究方向为光电检测、传感技术。

Email: yangsl1cn@163.com

收稿日期: 2005-11-18 收到修改稿日期: 2006-02-25

的大小经由另一未加调制的 5mW He-Ne 激光束 (探测光束) 的偏转量来确定, 探测光束偏斜的相位由一相敏探测器 (CD505R2) 进行探测。检测到的热位移信号经前置放大器后进入 PAR5204 型锁相放大器, 最后由计算机对数据进行处理。

为了获得最佳测量结果, 实验中抽运光束和探测光束照射在试样表面的相对位置对测量工作至关重要, 为了获得最大信噪比, 参考光束需定位在试样表面的最大位移处; 同时探测光束的聚焦点尽可能的小于抽运光束的聚焦点; 而且应防止抽运光束由试样表面反射直接进入光电二极管中。

### 3 实验结果

由于部分试样在制作、加工的过程中, 其边缘部分往往存在微应力, 从而造成试样内部结构的差异, 这势必影响材料的热扩散率。因此, 实验时应尽量使激光入射在试样的中心位置上, 然后在不同的频率下测得试样中心点附近的相位, 并根据 (2) 式, 利用最小二乘法线性拟合, 拟合出光热位移信号的相位随频率变化的曲线, 从而得到试样的热扩散率。从 (2) 式可以看出, 试样光热位移信号的相位不仅与试样的热扩散率有关, 而且与试样的光吸收系数有关。为了求出试样的热扩散率, 首先测出试样的光吸收系数。然后, 根据 (2) 式, 利用最小二乘法线性拟合, 得到每个测量点上的热扩散率, 取其平均, 得到试样的热扩散率。

测量试样的光吸收系数  $\beta$  的具体方法为<sup>[10]</sup>。用一束截面积为  $A$ 、强度为  $I_0$ 、以频率  $f$  调制的抽运光束入射到试样表面上。忽略试样向周围媒质的热扩散, 这时试样的温度增量  $\Delta T_s$  为:  $\Delta T_s = \beta I_0 A / (2f \rho_s c_s V)$  (3) 式中,  $l$ ,  $\rho_s$ ,  $c_s$  和  $V$  分别为试样的厚度、密度、比热容和体积。若已知试样的厚度  $l$ 、密度  $\rho_s$ 、比热容  $c_s$  和体积  $V$  以及抽运光束的强度  $I_0$  和调制频率  $f$ , 通过测量试样的温度增量  $\Delta T_s$ , 进而得到试样的光吸收系数  $\beta$ 。

图 2 中给出了试样的相位随频率变化的拟合曲线, 表 1 中给出了纳米  $TiO_2$  在不同退火温度下的热扩散率的拟合结果。实验结果表明, 纳米  $TiO_2$  材料的热扩散率随退火温度的升高而减少, 因为退火温度升高,

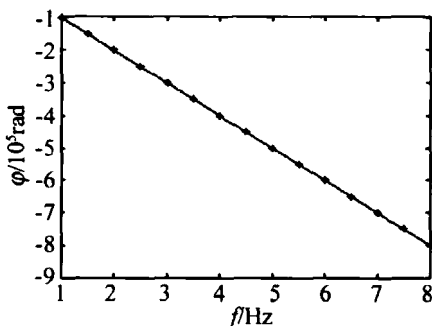


Fig 2 Fitted curves of phase with frequency for sample

Table 1 Results at different annealing temperature for nanometer  $TiO_2$

sample	1	2	3	4	5
thickness/ $10^{-3}$ m	1.20	1.18	1.15	1.13	1.21
sintering temperature/ $^{\circ}$ C	100	200	300	400	500
diffusivity/ $(10^{-7}m^2 \cdot s^{-1})$	7.95	5.78	4.93	4.25	4.10
absorption coefficient					
ent/ $10^2 m^{-1}$	8.89	6.56	5.75	5.25	5.10
fitting error/%	1.20	1.28	2.02	1.89	2.31

材料的晶粒减小, 密度增大。因此,  $TiO_2$  的热扩散率减小, 这与理论分析是一致的。

### 4 结 论

利用激光光热散射技术对纳米  $TiO_2$  的热扩散率进行了测量, 结果表明, 该方法是一种十分有效的检测手段。调节入射激光束位置的变化, 检测试样不同位置上热位移信号的相位, 进而对试样的表面结构、性能等方面进行检测, 故激光光热位移技术能够准确地测量出材料的热扩散率, 提供了一种测量材料热扩散率的新方法, 可望成为无损检测技术中新的有力工具。

#### 参 考 文 献

- [1] ZHANG Zh J. Sensitive photothermal displacement spectroscopy for GaTe properties measuring [J]. Acta Photonica Sinica 1997, 26(1): 52~55 (in Chinese).
- [2] ZHANG Zh J. A new method for the study of optical and thermal properties of surface photothermal displacement spectroscopy [J]. Acta Photonica Sinica 1996, 25(7): 585~588 (in Chinese).
- [3] WANG P J, FAN S H. Using laser photothermal technique measurement the initial stress of material [J]. Applied Laser 1999, 19(6): 353~355 (in Chinese).
- [4] WANG P J, ZHANG Zh, FAN S H. Influence of stress on thermal diffusivity by laser photothermal technique [J]. Chinese Journal of Lasers 2003, 30(3): 252~254 (in Chinese).
- [5] CHEN Y, WANG Y L, ZHOU D F. Faint signal processing of lidar based on wavelet multiresolution analysis [J]. Laser Technology 2005, 29(3): 278~280 (in Chinese).
- [6] WANG Ch, ZIY, ZHANG G Y et al. Analysis of laser measurement for thin stress [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 98~100 (in Chinese).
- [7] WANG P J, FAN S H. Laser photothermal scattering technique to measure thermal diffusivity of materials [J]. Chinese Journal of Lasers 1998, 25(8): 703~710 (in Chinese).
- [8] WANG P J, FAN S H. Research of nanometer material using laser photothermal effect [J]. Chinese Journal of Lasers 1997, 24(11): 981~984 (in Chinese).
- [9] WANG P J, FAN S H. Laser photothermal radiometry technique to measure thermal diffusivity of opaque complex materials [J]. Chinese Journal of Lasers 2000, 27(12): 1130~1132 (in Chinese).
- [10] MIRANDA L C M. Photo displacement spectroscopy of solids theory [J]. Appl Opt 1993, 22(6): 2882~2886.
- [11] XING J H, GU J H, LU X. Analysis of photothermal displacement phase signal [J]. Journal of Suzhou University (Nature Science), 1999, 15(1): 28~31 (in Chinese).
- [12] ROSENCEWA G A, HINDLEG T W. The measurement for light absorption coefficient with photothermal techniques [J]. Appl Opt 1995, 20(4): 606~608.