

# 激光在材料中感生的瞬态光声波和光热波

周复正 沈寿彭\* 于月华\*\*

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

**提要** 研究了锁模激光在材料中产生频率达 GHz 的光声波和相应探测技术, 用回波分析法无损测量了薄材料的厚度。研究了激光在材料中感生的光热波, 热沉测量可用于解释材料的破坏机理。

**关键词** 光声波, 压电传感器, 光热波, 热电探测器

## Laser-induced transient photoacoustic and photothermal waves in thin films of material

*Zhou Fuzheng, Shen Shoupeng, Yu Yuehua*

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract** Photoacoustic wave with frequency of GHz and corresponding detection were researched. The PA in materials was excited by a mode-locked laser. The thickness of thin material was measured non-destructively by echo analysis. Also the laser induced photothermal wave studied. The measurement of sink energy can be used to illustrate damage mechanism of material.

**Key word** photoacoustic wave (PA), piezoelectric transducer, photothermal wave (PT), pyroelectric detector

## 1 引 言

通常用于材料内部探伤的超声波探测技术, 受其声源频率和传感器响应的限制, 其空间分辨率很难超越 0.1 mm。近几年来, 国际上对激光感生的光声波研究十分活跃<sup>[1]</sup>, 超短脉冲激光在材料中产生的光声波频率高达 GHz, 相应发展起来的非破坏测量技术和非接触光测技术, 其响应时间达 1 ps, 回波法测量了材料内部结构精度达 0.2  $\mu\text{m}$ , 已应用于薄膜的厚度、复合材料

收稿日期: 1992 年 1 月 3 日; 收到修改稿日期: 1992 年 8 月 4 日。

\* 中国科学院上海有机所; \*\* 中国科学院上海技术物理所。

的层结构、界面、气泡和杂质的位置、形态测量<sup>[1]</sup>。激光激发光声波的同时,也感生了光热波。弹性光热波和材料热沉的测量,可进一步了解从材料吸收到破坏的动力学过程,分析激光对物质的作用机理。

## 2 激光在薄材料中激发的瞬态光声波

光声波的产生和测量实验装置如图 1 所示。激励源为 Nd:YAG 锁模倍频固体激光器,输出 1 mJ,重复频率 10 pps,用分辨率为 2 ps 的条纹相机测量激光脉冲宽度为 25 ps,经透镜会聚到不锈钢样品上,样品厚 10~100  $\mu\text{m}$ 。用 PIN 探测器监视激光作用功率变化。超声传感器为 PVDF 有机薄膜,厚 10  $\mu\text{m}$ ,两面镀铝电极。用 4 mm 厚的有机玻璃作为声阻抗匹配器,分别与样品、传感器接触,为了消除面间声波反射和接触应力,用胶水为过渡层。整个探测器用银导电胶直接封接在 50  $\Omega$  电缆头上,与 1 GHz 快速示波器良好电匹配。当入射激光功率低于材料破坏阈值时,感生的光声波为对称双极波,如图 2(a)所示。光声脉冲响应时间为 0.2 ns,周期脉冲宽度为 1 ns,波幅为 400 mV。当激光功率高于破坏阈值时,光声脉冲为畸变的双极波,如图 2(b)所示。光声脉冲及其回波信号如图 3 所示,相应的声回波时间间隔实验值为 3.5 ns、17 ns 和 34 ns,对应的材料厚度分别为 10.5、50.1 和 102  $\mu\text{m}$ ,与精密机械测定厚度  $10 \pm 1$ ,  $50 \pm 2$  和  $100 \pm 2$   $\mu\text{m}$  相符,如表 1 所示。

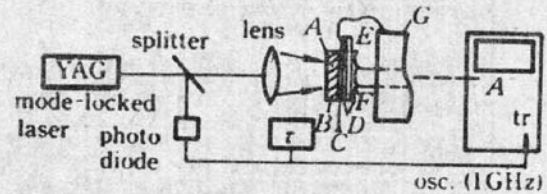


Fig. 1 Generation and detection of photoacoustic waves in thin films

- A—absorber (black lacquer, 1-3  $\mu\text{m}$ );
- B—sample (metal, 1-100  $\mu\text{m}$ ); C—glue;
- D—electrodes (Al-1000 nm);
- E—materials of PA (LiTaO<sub>3</sub>-20  $\mu\text{m}$ , PVDF-20  $\mu\text{m}$ )
- F—silver glue; G—connector (50  $\Omega$ , BNC)

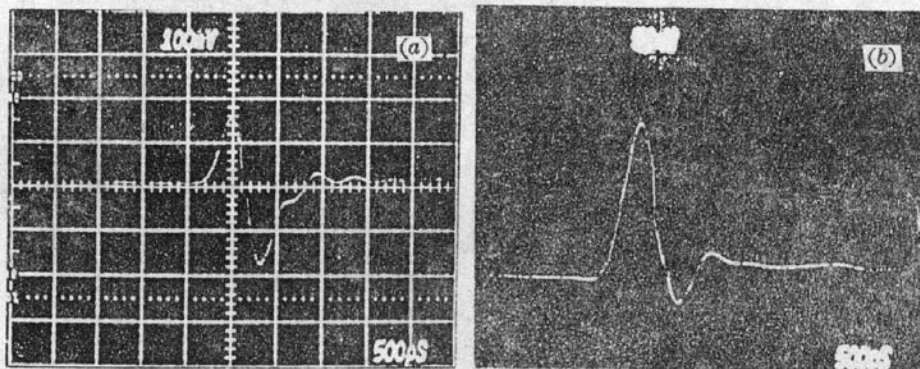


Fig. 2 Laser-induced ultrashort photoacoustic pulse in steel sheet

- (a) PA bipolar pulse;
- (b) PA distorted pulse

光声对称双极波形可用激光辐照固体表面动力传递形成的辐射压力和材料表层对激光的吸收形成的局部热应力理论解释。而非对称双极光声波的产生,是由于激光功率增加到使材料破坏时,材料表面形成的局部等离子体对材料表层附加了一个很高的脉冲压力所致。光声波脉冲宽度取决于激光脉冲宽度和声在材料中层吸收的渡越时间<sup>[2]</sup>



$$\tau_a = [\tau_L^2 + (l/V_a)]^{1/2}$$

式中  $\tau_a$  为光声脉冲宽度,  $\tau_L$  为激光脉冲宽度,  $l$  为材料的光吸收长度,  $V_a$  为固体中的声速。对固体锁模倍频激光作用于不锈钢,  $\tau_L = 25 \text{ ps}$ ,  $l = 10^{-4} \text{ cm}$ ,  $V_a = 8 \times 10^5 \text{ cm/s}$ , 代入上式得  $\tau_a = 0.13 \text{ ns}$ , 与实验结果基本一致。

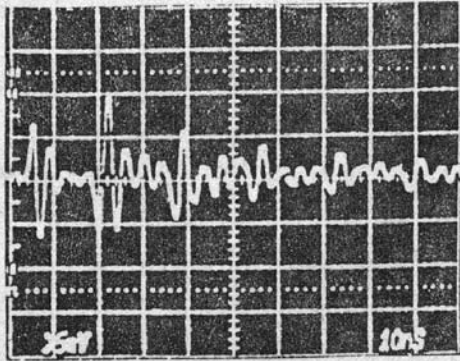


Fig. 3 PA and echos in steel sheet excited by mode-locked laser

Table 1 Thickness of stainless steel measured in compare with standard

Measured ( $\mu\text{m}$ )	Standard ( $\mu\text{m}$ )
102	100.0+2
50.1	50.0+2
10.5	10.0+1

用 PVDF 薄膜作为压电传感器, 感生的光声电压为<sup>[3]</sup>

$$V_t = d_t F_t / (C_b + C_L)$$

式中  $d_t$  为 PVDF 的应力常数,  $F$  为光压力,  $C_b$  为传感器电容,  $C_L$  为负载电容。对 ps 脉冲激光作用于不锈钢在破坏阈值附近,  $F_t \approx 5 \times 10^7 \text{ Pa}$ ,  $d_t = 20 \text{ PCN}^{-1}$ ,  $C_L = 2 \text{ pF}$ ,  $C_b = 2 \text{ nF}$ , 代入上式得传感器输出的光声电压  $V_t = 0.5 \text{ V}$ , 与实验结果相符。

为了确定激光脉冲宽度和材料吸收长度对光声波的影响, 进行了 Q 开关红宝石激光对聚合物  $\text{CF}_2$  的辐照实验。激光脉宽为 3 ~ 20 ns, 能量为 1 ~ 150 mJ, 激发起 MHz 量级(脉宽  $\mu\text{s}$ )的光声波, 实验结果如图 4 所示。 $\text{CF}_2$  对激光基波(694.3 nm)吸收较小, 因此, 光声波幅度较小, 脉宽较大, 且伴随很强的指数衰减本底。而  $\text{CF}_2$  对激光二次谐波(347.1 nm)吸收很大, 故光声

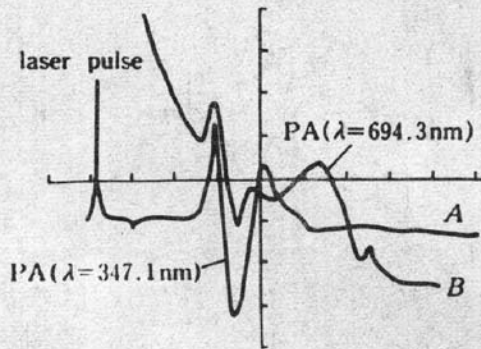


Fig. 4 PA sig. in teflon film excited by Q-switched laser

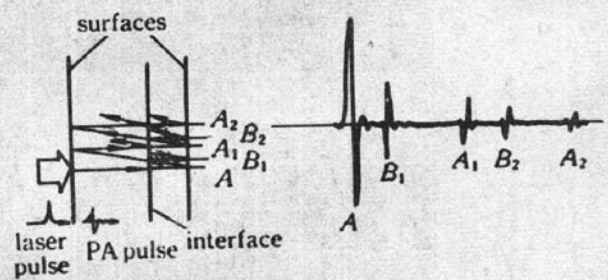


Fig. 5 Echos analysis in two-layers of material

波幅度较高, 脉宽较窄。由此可知, 为了获得窄的光声波, 必须使用超短脉冲激光激励, 并尽量减少吸收深度, 一种简单有效的办法是在样品表面上涂高吸收材料薄层。对高吸收材料,  $l \sim 10^{-5} \text{ cm}$ , 超短激光脉冲宽度  $\tau_L \sim \text{fs}$ , 激发的纵向光声波脉冲宽度  $\tau_a \sim \text{ps}$ , 声回波空间分辨率为  $\Delta l \sim 2\tau_a \cdot V_a = 0.02 \mu\text{m}$ , 可用于材料内部精细结构非损伤测量。分析多层复合材料表面和界面间的多次回波反射, 可以确定组分的厚度。二层混合材料的光声回波法分析如图 5 所示, 图中 A 为光声波,  $A_1, A_2$  为表面间的回波信号,  $B_1, B_2$  为界面—表面间的回波信号。对材料内的



杂质、气泡也可用类似分析法测量。

### 3 激光在薄材料中激发的瞬态光热波

激光辐照物质产生光声波的同时,总是伴随激发弹性光热波。但通常的热探测器响应时间大于  $1 \mu\text{s}$ ,且灵敏度较低,很难分辨瞬态光热波形。热释电材料是一种优良的热敏元件,瞬间加热导致材料内部的热—电偶极子变化,其感生的材料表面电荷变化率极限为 ps 量级。为此研制了光热波和热沉探测器,实验装置仍如图 1 所示。热释电元件为  $20 \mu\text{m}$  厚的钽酸锂晶体 ( $\text{LiTaO}_3$ ),两面涂  $\sim 100 \text{ nm}$  厚金电极,一面与实验样品用导热胶合,另一面用导电胶与  $50 \Omega$  电缆头直接连结,接快速示波器 ( $1 \text{ GHz}$ )。锁模激光辐照  $10 \mu\text{m}$  厚不锈钢薄片,激发的光热波实验结果如图 6 所示,弹性光热波呈周期性指数衰减,响应小于  $4 \text{ ns}$ ,热波周期频率  $\sim 100 \text{ MHz}$ ,热释电峰值电压约为  $0.8 \text{ V}$

热释电探测器的时间响应和热电峰值电压可表示为<sup>[4]</sup>

$$T_s = \rho C_p d_a^2 / K_p$$

$$U_p = \xi E_a C_s / AC$$

式中  $T_s$  为热释电探测器的响应时间, $\rho$ 、 $C_p$ 、 $K_p$  和  $d_a$  分别为吸收体的密度、比热、热导和厚度, $U_p$  为热释电峰值电压, $\xi$  为热释电常数, $E_a$  为被吸收的激光能量, $C_s$  为热电元件的极间电容, $A$  为电极面积, $C$  为热电探测器电容。代入参数  $E_a = 1 \text{ mJ}$ , $\xi = 4600$ , $d_a = 20 \mu\text{m}$ , $A = 0.5 \text{ cm}^2$ , $C = 100 \text{ pF}$ ,得  $T_s = 2 \text{ ns}$ , $U_p = 1 \text{ V}$ 。与实验结果基本一致。

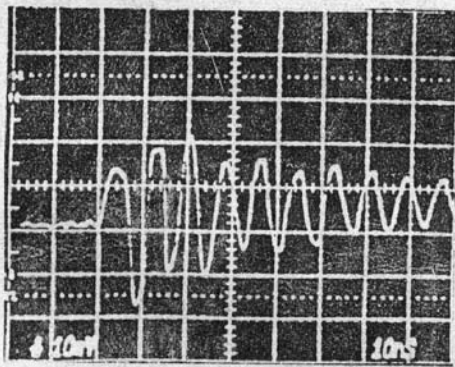


Fig. 6 Transient PT sig. using low impedance ( $50 \Omega$ )

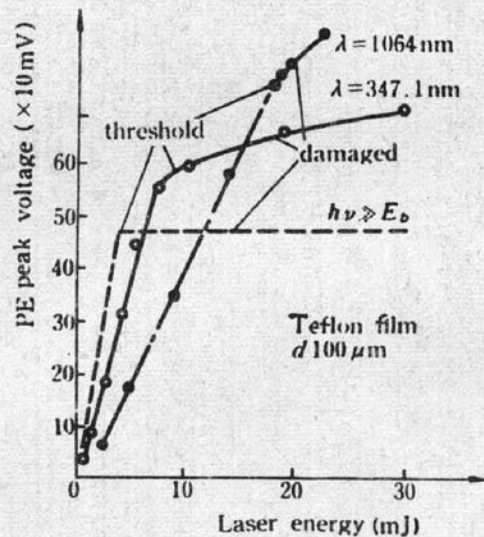


Fig. 7 Thermal signal as a function of incidence laser energy

当热电探测器输出负载改为  $1 \text{ M}\Omega$  与高抗示波器匹配时,光热波信号在负载上被积累成为热沉上的积分能量,热电探测器相当于一个灵敏能量计,热沉能量测量可解释激光辐照材料的破坏机理。用调  $Q$ -Nd:YAG 基波激光 ( $1.06 \mu\text{m}$ ) 和调  $Q$ -红宝石谐波激光 ( $347.1 \text{ nm}$ ) 辐照  $100 \mu\text{m}$  厚的  $\text{CF}_2$  薄膜,测量材料上的热电积分信号,实验结果如图 7 所示。在破坏阈值以下,热释电信号随入射激光能量线性增加,这是由于在入射激光能量较小时,激光被材料吸收转化为分子热振动内能,热电信号与激光能量成正比。当激光能量增加到材料的破坏阈值时,对波长  $1.06 \mu\text{m}$  激光辐照,曲线无明显拐点。而对波长  $347.1 \text{ nm}$  激光辐照,曲线有明显拐点。实验

结果支持了激光与物质相互作用的光热和光化学模型。聚合物的键能  $E_b \sim 4 \text{ eV}^{(5)}$ , 对  $1.06 \mu\text{m}$  激光,  $h\nu \ll E_b$ , 构成光热过程: 发生双光子或多光子吸收, 材料分子的热振动、碰撞能量转移使一小部分获得足够动能的分子离开表面溅射, 大部分入射激光能量仍被保留在材料上, 温度继续上升, 至使热释电信号在破坏阈值无明显拐点, 且随入射光能非线性增加。而对  $347.1 \text{ nm}$  激光,  $h\nu \simeq E_b$ , 产生光化学过程: 一部分分子键被打断, 具有较大动能的热分子和热离子快速向后喷射, 带走大部分吸收的光能, 保持在材料上的能量不与入射激光成正比, 使热释电信号在破坏阈值出现拐点, 材料温升缓慢, 热电信号平缓。作为进一步实验研究, 将考虑紫外短波长激光辐照聚合物, 使  $h\nu \gg E_b$ , 可望得到图 7 平直虚线的实验结果。

陈绍和、史珺参加了部分研究工作; 部分实验是在意大利进行的, E. Rimini 教授和 G. Foti 教授给予热情帮助和合作, 谨此表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- 1 K. A. Svinarich *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **57**(12), 1185(1990)
- 2 A. C. Tam *et al.*, *Appl. Lett.*, **45**(5), 510(1984)
- 3 P. E. Dyer *et al.*, *Appl. Lett.*, **48**(6), 445(1986)
- 4 周复正 *et al.*, 中国激光, **18**(10), 743(1991)
- 5 G. Gorodetsky *et al.*, *Appl. Lett.*, **46**(9), 828(1985)