

PTR 技术中空间分辨率的频率特性*

王磊 李佩赞

(苏州大学物理系, 江苏, 苏州, 215006)

摘要 给出了光热辐射测量 (PTR) 技术中空间分辨率的定义. 理论分析和实测结果表明, 空间分辨率随调制频率的升高而提高.

关键词 光热辐射测量 (PTR), 光热信号, 空间分辨率, 调制频率.

引言

光热辐射测量 (PTR) 技术作为一种新的无损检测方法, 已广泛应用于厚度测量^[1]、表面科学^[2]和缺陷探测^[3~4]等方面. 它不受样品尺寸限制, 测量时与样品不接触, 因此特别适用于样品表面、内表面或表面下伤痕、裂缝、空洞和材料不均匀结构等的探测. 在光声和光热偏转技术中, 文献 [5~7] 讨论了空间分辨率与调制频率的关系, 但在 PTR 技术中, 只有文献 [8] 在对光声与 PTR 探测缺陷进行实验对比时, 提到调制频率在 10~100 Hz 范围内, 空间分辨率对频率的依赖性并不显著. 理论及实验表明, 频率对空间分辨率的影响比较复杂. 本文对此进行了深入的理论分析, 并与实测结果进行了比较.

1 理论

一束受调制的激光 $I = I(r)[1 + \exp(j\omega t)]$ 入射于某样品 (见图 (1)). 为简化讨论, 设样品是厚为 l , 半径为 R 的圆柱体; 其光强为高斯分布, $I(r) = I_0 \exp(-\frac{r^2}{a^2})$, 其中 a 是激光束半径; 入射光的调制圆频率为 ω .

对于不透光样品和热导率远大于样品表面的热交换, 样品后表面的温度变化量是^[9]:

$$\delta T(r, l) = \sum_n \frac{2f_n \cdot J_0(K_n r)}{k\sigma_n \cdot [\exp(\sigma_n l) - \exp(-\sigma_n l)]}, \quad (1)$$

式 (1) 中 K_n 是满足样品侧面第 3 类边界条件 $J_0(K_n R)/J_1(K_n R) = K_n k/h_2$ 的本征值, 由于实际样品 $l \ll R$, 因此侧面热交换系数 $h_2 = 0$, 从而使 K_n 仅由 $J_1(K_n R) = 0$ 决定;

* 国家自然科学基金和江苏省科委、省教委自然科学基金资助项目
本文 1993 年 5 月 19 日收到, 修改稿 1994 年 1 月 22 日收到

f_n 是入射光光强度分布按本征函数 $J_0(K_n r)$ 展开的系数:

$$f_n = \begin{cases} \frac{a^2}{R^2} I_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{R^2}{a^2}\right) \right], & (n=0) \\ \frac{I_0}{J_0^2(K_n R)} \frac{a^2}{R^2} \exp\left(-\frac{K_n^2 a^2}{4}\right), & (n \neq 0) \end{cases} \quad (2)$$

$\sigma_n^2 = j \frac{\omega}{\alpha} + K_n^2$, α 是样品的热扩散系数, k 是样品的热导率.

探测器探测到的 PTR 信号的振幅正比于 δT 的模, 相位值等于 δT 的辐角. 我们以入射光光束半径 $a = 2 \text{ mm}$, 样品半径 $R = 30 \text{ mm}$ 及石墨的有关参数 ($k = 1.55 \text{ W/cm}\cdot\text{K}$, $\alpha = 1.03 \text{ cm}^2/\text{s}$) 代入式 (1) 和式 (2) 进行数值计算, 从理论上绘出不同频率下石墨样品的 PTR 振幅信号 (已进行归一) 的径向分布曲线 (见图 (2)).

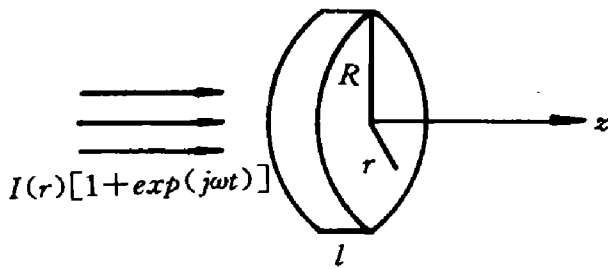


图 1 三维结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the three-dimensional configuration

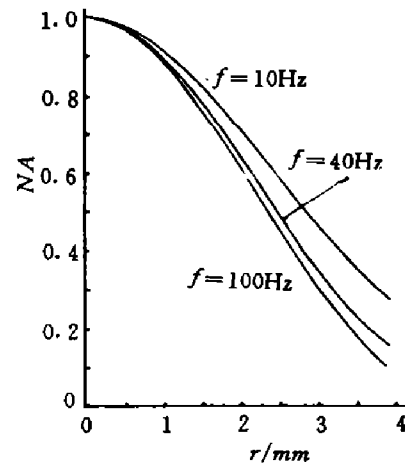


图 2 石墨样品归一化振幅径向分布曲线

Fig. 2 Normalized amplitude of graphite sample vs. sample's radius

由图 2 可见, 样品 PTR 信号的振幅随着半径的增大而减小, 靠近入射光中心点处的衰减比较缓慢, 以后衰减很快. 值得注意的是样品振幅的减小随频率的升高而加快. 若定义样品中心最大振幅为 A_0 , 振幅衰减至 $\frac{A_0}{e}$ 时对应的半径为 R^* . 在探测条件一定的情况下, 一般认为信号降至最大振幅的 $\frac{1}{e}$ 后便可忽略, 所以与 $\frac{A_0}{e}$ 对应的 R^* 范围内的平均温度大小便是探测点的实测振幅信号. R^* 越小, 样品中两点被同时探测的机会越少, 即越易于分辨. 因此 R^* 是 PTR 技术探测系统中分辨两点的极限距离, 可定义 $\lambda = \frac{1}{R^*}$ 为空间分辨率. 由图 2 可见, 频率越高, R^* 越小. 这也可从热扩散长度 μ 来分析: $\mu = \left(\frac{\alpha}{\pi f}\right)^{\frac{1}{2}}$, f 增加时, μ 将减小, 即 R^* 也减小.

综上所述, 可得出结论: 当入射光束直径、激光器与样品间距及探测器与样品间距都保持不变时, 若频率升高, 则 R^* 减小, λ 随之提高.

2 实验

实验装置如图 3 所示. 波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 、功率约为 $10\ \text{W}$ 的 CO_2 激光束经调制后照射到样品的前表面, 样品由步进马达带动, 在与入射光垂直的方向平移. 在透射方向用致冷 HgCdTe 红外探测器探测样品的热辐射变化量. 记录仪记录 PTR 信号的振幅和相位. 为了尽量减小入射光的光斑尺寸, 调制器和样品尽量与激光器靠近.

测量中采用的样品是面积为 $55 \times 70\ \text{mm}^2$, 厚为 $2.5\ \text{mm}$ 的石墨片, 在中心处有间距为 $2.88\ \text{mm}$ 的两条刻痕. 由图 4 可见, 石墨刻痕在低频 ($14.85\ \text{Hz}$) 处的振幅信号是单峰, 此时无法分辨两刻痕; 当频率升高到 $46.2\ \text{Hz}$ 时, 信号已能显示双峰, 但并不明显; 在频率升至 $94.4\ \text{Hz}$ 时, 信号显示出非常清晰的双峰特征, 两刻痕完全被分辨, 分辨率大为提高. 利用式 (1) 和式 (2) 计算, 当 $f = 14.85\ \text{Hz}$ 时, $R^* = 3.13\ \text{mm}$, 大于刻痕间距, 无法分辨; 当 $f = 46.2\ \text{Hz}$ 时, $R^* = 2.7\ \text{mm}$, 小于刻痕间距, 已能分辨两刻痕. 随着频率的升高, R^* 减小, λ 逐步提高; $f = 94.4\ \text{Hz}$ 时, $R^* = 2.5\ \text{mm}$, 两刻痕被清晰分辨. 理论分析与实验结果符合得很好.

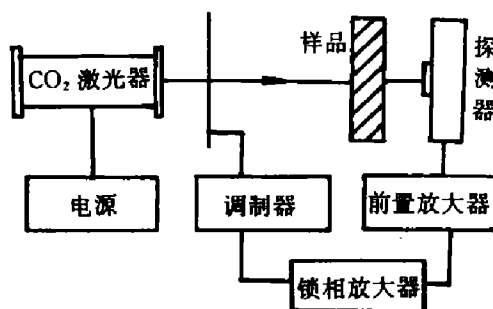


图 3 实验装置图

Fig. 3 The experimental arrangement

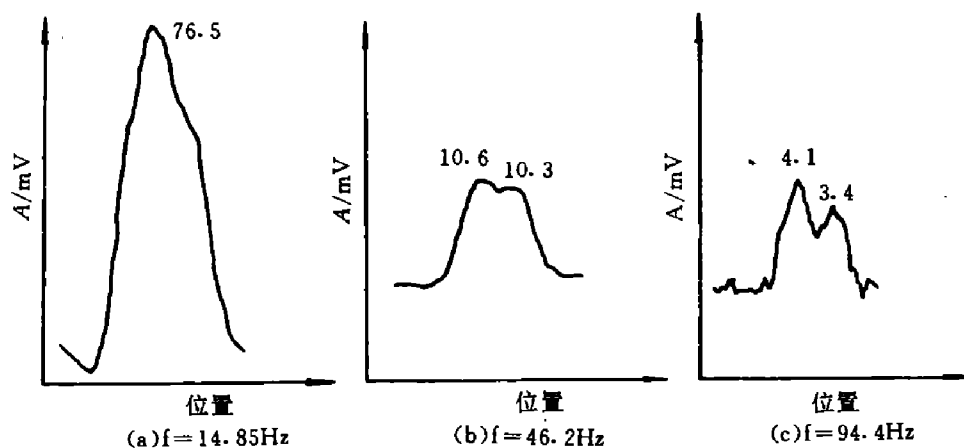


图 4 石墨伤痕在不同频率下的光热信号

Fig. 4 PTR signal vs. position at different frequencies for graphite sample with two scars

3 结语

从上面的讨论可得到空间分辨率随频率的升高而提高的结论, 此结论与实验测量结果符合得很好. 因此在保证有足够的测量信噪比时 ($f < 100\ \text{Hz}$), 应采用较高的调制频率. 对于热物理参数和光学性质不同的各种样品, 由式 (1) 和式 (2) 可知, 空间分辨率的频率特性不尽相同.

参考文献

- 1 Busse G. *Infrared Phys.*, 1980,20:419
- 2 Nordal P E, Kcanned S O. *Scanned Image Microscopy*. London: Ash. E., 1980.331
- 3 Li Peizan, Zhou Genyuan. *Appl. Optics*, 1992,31(19):3731
- 4 李佩赞, 钱霖. 无损检测, 1989,11(11):315
- 5 Grover C, Wetsel, Jr, McDonald F A. *J. Appl. Phys.*, 1984,56(11):3081
- 6 McDonald F A, Grover C, Wetsel, Jr, et al. *Effects of Frequency on Definition and Resolution in Photothermal Imaging of Subsurface Structure*. B R McAroy ed. IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, New York: 1983. 672
- 7 Grover C, Wetsel, Jr, McDonald F A. *Appl. Phys. Lett.*, 1982,41(10):926
- 8 Busse G. *Appl. Opt.*, 1982,21(1):107
- 9 钱霖, 李佩赞. 光学学报, 1990,10(3):276

FREQUENCY CHARACTERISTICS OF SPATIAL RESOLUTION IN PTR TECHNIQUE*

Wang Lei Li Peizan

(Department of Physics, Suzhou University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract The definition of the spatial resolution in the photothermal radiometry (PTR) technique is given. The theoretical analysis and practical measurements show that the spatial resolution is improved as the modulation frequency is increased.

Key words photothermal radiometry (PTR), photothermal signal, spatial resolution, modulation frequency.

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China, Natural Science Foundation of Science and Technology Committee and Educational Committee of Jiangsu Province, China