

# PTR 技术中光热信号的频率特性

钱 霖 李佩赞

(苏州大学物理系, 江苏, 苏州, 215006)

讨论了各种情况下样品前表面和后表面光热信号的频率特性, 并给出部份情况下的实验验证。

关键词: 光热辐射测量(PTR), 光热信号, 频率特性。

## 1 引 言

有关光热辐射测量(PTR)信号与调制光频率  $f$  关系的报道不完全一致, 有人认为  $f$  对 PTR 信号的影响不大, 有人认为 PTR 信号与  $f$  成反比关系<sup>[1]</sup>。文献[2]仅讨论了三种情况下前表面 PTR 信号对频率的依赖关系。本文对各种情况下前后表面 PTR 信号的频率特性进行了讨论, 并部份地加以实验验证。

## 2 理论分析

受调制光辐照的样品热辐射通量改变为

$$\delta W = 4\epsilon\sigma T_0^3\delta T, \quad (1)$$

其中  $\epsilon$  是样品表面发射率,  $\sigma$  是斯特藩-玻尔兹曼常数,  $T_0$  是受辐照样品达到动态平衡时的表面静态温度,  $\delta T$  是由于调制引起的温度涨落。用红外探测器探测样品的热辐射时, 输出的 PTR 信号正比于  $\delta W$ 。式(1)中仅  $\delta T$  项与调制频率  $f$  有关, 因此,  $\delta T$  的频率特性亦代表了 PTR 信号的频率特性。采用一维热传导模式处理, 可以得出前后表面温度改变量  $\delta T$  的表达式<sup>[3]</sup>。我们着重讨论各种情况下  $\delta T$  的频率特性。先定义临界频率

$$f_i = \frac{\alpha_s}{2\pi l^2},$$

这里  $\alpha_s$ 、 $l$  分别为样品的热扩散率和厚度。

### 2.1 不透明样品

即样品厚度远大于光吸收长度  $\beta^{-1}$  ( $\beta l \gg 1$ ), 以厚度 0.05 cm 的纯铜样品为例, 其  $f_i = 72$  Hz, 厚度相似的各种金属的  $f_i$  在  $10 \sim 10^2$  Hz 范围内。

如果样品是热薄的, 即样品厚度远小于样品的热扩散长度 ( $|\sigma_s l| \ll 1$ , 其中  $\sigma_s =$

$\left(\frac{j\omega}{\alpha_s}\right)^{1/2}$ ). 此时, 对调制频率  $f \ll f_l$ , 可得到样品前后表面的温度改变量为

$$\delta T(0) = \delta T(l) = \left| \frac{I_0}{k_s l \sigma_s^2} \right| = \frac{I_0}{2\pi \rho c l f}, \quad (2)$$

其中  $I_0$  为入射光强度,  $\rho$ ,  $c$ ,  $k_s$  分别为样品的浓度, 比热和热导率. 式(2)表明不透明热薄样品前后表面的 PTR 信号相同, 与调制频率成反比. 如果样品是热厚的, 即样品厚度远大于样品的热扩散长度 ( $|\sigma_s l| \gg 1$ ). 此时,  $f \gg f_l$ , 即当  $f \ll \frac{\alpha_s \beta^2}{2\pi}$  时, 得

$$\begin{cases} \delta T(0) = \left| \frac{I_0}{k_s \sigma_s} \right| = \frac{I_0}{(k_s 2\pi \rho c f)^{1/2}}, \\ \delta T(l) = \left| \frac{2I_0}{k_s \sigma_s} \exp(-\sigma_s l) \right| = \frac{2I_0}{(k_s 2\pi \rho c f)^{1/2}} \exp\left[-\left(\frac{\pi f}{\alpha_s}\right)^{1/2} l\right] \end{cases} \quad (3)$$

式(3)表明, 不透明热厚样品在  $f \ll \frac{\alpha_s \beta^2}{2\pi}$  时, 其前表面的 PTR 信号与  $1/\sqrt{f}$  成正比, 后表面的 PTR 信号与  $f$  的关系比较复杂; 当  $f \gg \frac{\alpha_s \beta^2}{2\pi}$  时, 前后表面的 PTR 信号与  $f$  均无简单关系. 由于金属样品的  $\frac{\alpha_s \beta^2}{2\pi}$  达到  $10^2$  kHz, 一般不采用如此高的调制频率, 故在此不作讨论.

## 2.2 光透明样品

即样品厚度小于光吸收长度  $\beta^{-1}$ , ( $\beta l < 1$ ). 以厚度 1 mm 的砷化镓样品为例, 其  $\beta l = 0.25$ ,  $f_l = 175$  Hz.

如果样品是热薄的, 即  $f \ll f_l$ , 可得

$$\delta T(0) = \delta T(l) = \left| \frac{1 - (1 - \beta')^2 (1 - \beta l)}{k_s l \sigma_s^2} I_0 \right| = \frac{1 - (1 - \beta')^2 (1 - \beta l)}{2\pi \rho c l f} I_0 \quad (4)$$

式中  $\beta'$  为样品表面吸收率. 式(4)表明透明热薄样品前后表面的 PTR 信号公式相同, 与调制频率成反比. 与不透明热薄样品不同的是透明热薄样品的 PTR 信号还与表面吸收系数有关.

如果样品是热厚的, 即  $f \gg f_l$ , 可得到

$$\begin{cases} \delta T(0) = \left| \frac{I_0 (1 - \beta') \beta}{k_s \sigma_s^2} + \frac{I_0 \beta'}{k_s \sigma_s} \right| \\ = \left[ \frac{(1 - \beta')^2 \beta^2}{(2\pi \rho c f)^2} + \frac{\beta'^2}{k_s 2\pi \rho c f} + \frac{\sqrt{2} (1 - \beta') \beta \beta'}{k_s^{1/2} (2\pi \rho c f)^{3/2}} \right]^{1/2} I_0, \\ \delta T(l) = \left| \frac{(1 - \beta') (\beta + \beta' \sigma_s)}{k_s \sigma_s^2} (1 - \beta l) I_0 \right| \\ = \left[ \frac{\beta^2}{(2\pi \rho c f)^2} + \frac{\beta'^2}{k_s 2\pi \rho c f} + \frac{\sqrt{2} \beta \beta'}{k_s^{1/2} (2\pi \rho c f)^{3/2}} \right]^{1/2} (1 - \beta') (1 - \beta l) I_0. \end{cases} \quad (5)$$

式(5)表明透明热厚样品前后表面的 PTR 信号公式不同, 与  $f$  的关系复杂.

综上所述, 凡热薄样品 ( $f \ll f_l$ ) 前后表面的 PTR 信号均与调制频率  $f$  成反比, 而热厚样品的情况则比较复杂, 分别由式(3)和(5)决定. 必须强调指出, 对于某些相同的样品, 随着调制频率的改变, 热薄或热厚的属性是可以转化的, 调制频率一定时, 不同材料的样品和同一材料不同厚度的样品, 其热薄或热厚的属性亦不同.

### 3 实验和讨论

实验测量装置如图 1 所示。图 2 和图 3 为测得的几种样品的频率特性。样品都是光不透明的，厚度为 0.03~0.3 cm，热扩散率为 0.1~1.3 cm<sup>2</sup>/s，测量分别在 12~300 Hz 和 74~1500 Hz 两个频率范围进行。

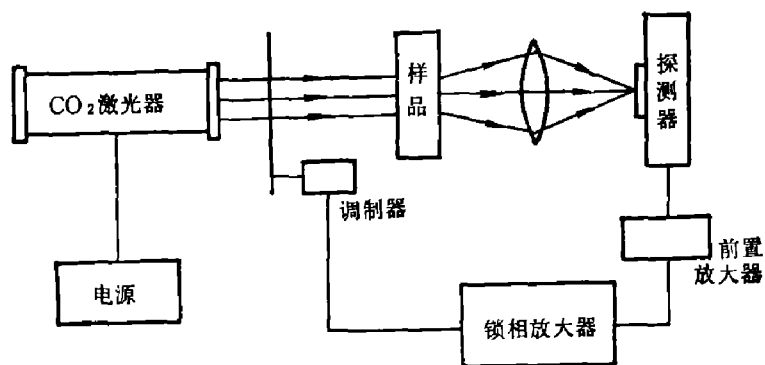


图 1 实验装置

Fig. 1 The experimental arrangement

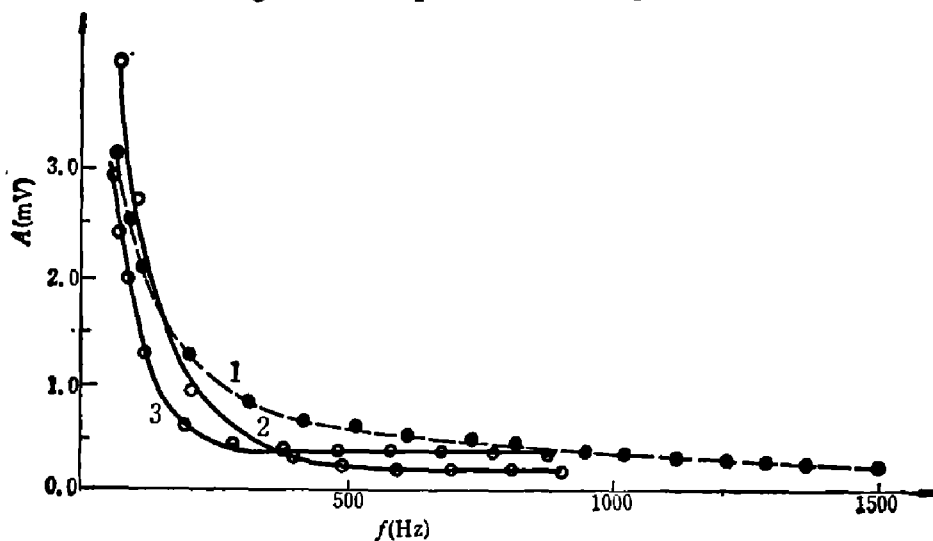


图 2 几种样品的频率特性曲线

1—合金钢, 2—铜, 3—08F 结构钢

Fig. 2 The frequency dependence of PTR signal

1—alloy steel, 2—copper, 3—08F structural steel

当调制频率  $f$  比临界频率  $f_i$  小得多时，样品属于热薄型，PTR 信号依  $1/f$  的规律变化。随着  $f$  增大， $|\sigma_l|$  逐渐增大，样品逐渐转化为热厚型，后表面的 PTR 信号按式 (3) 以指数规律迅速下降。由于区分热薄、热厚的临界频率  $f_i$  与样品的厚度及热扩散率有关，因此 PTR 信号随频率衰减的速度因样品而异。图 2、3 所示不同样品的频率特性完全说明了这一点。

热扩散率小而较厚的样品，其临界频率  $f_i$  较小，当调制频率  $f$  较低时，PTR 信号就衰减到很小，反之， $f_i$  大的样品，在  $f > 1\text{kHz}$  时，仍可测量到后面的 PTR 信号。

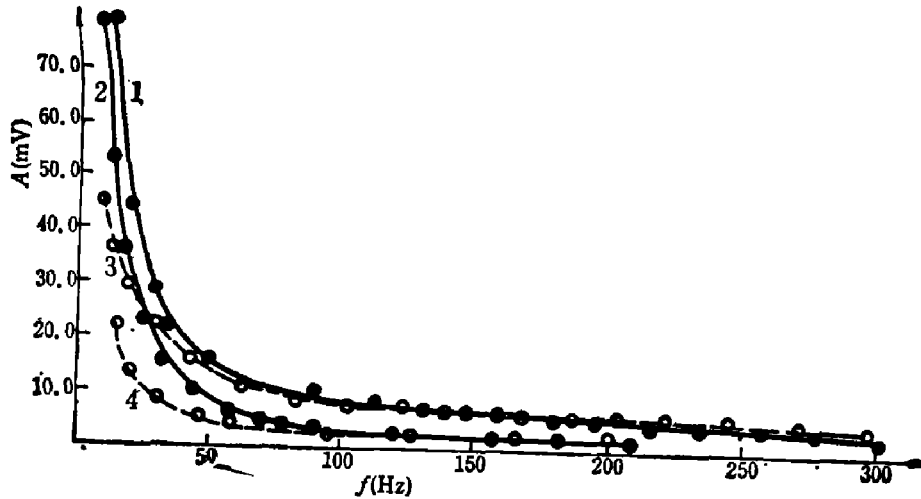


图3 几种样品的频率特性曲线

1—铁, 2—氧化铁, 3—铜, 4—石墨

Fig. 3 The frequency dependence of PTR signal

1—iron, 2—iron oxide, 3—copper, 4—graphite

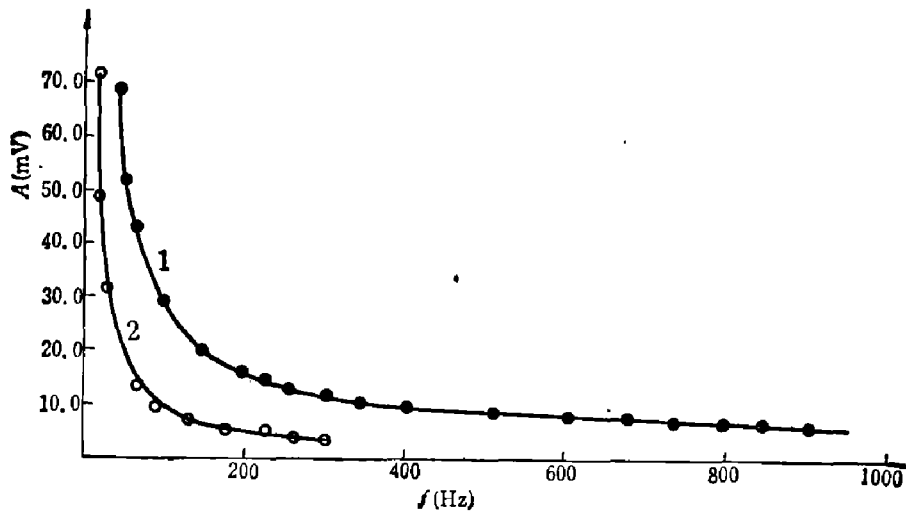


图4 铜和铁样品频率特性的比较

1—Cu,  $l=0.0364$  cm,  $\alpha_s=1.123$  cm<sup>2</sup>/s; 2—Fe,  $l=0.0461$  cm,  $\alpha_s=0.283$  cm<sup>2</sup>/s; 实线为理论曲线

Fig. 4 Comparison of frequency dependence between copper and iron

图4是测得的紫铜和铁后表面PTR信号的频率特性,紫铜和铁的临界频率 $f_i$ 分别为150 Hz和12 Hz,即紫铜的临界频率比铁的临界频率大得多,图中曲线表明紫铜后表面的PTR信号随调制频率下降的速度比铁缓慢得多。

图5是不同厚度的两个石墨样品的频率特性。可以看出,厚度大的样品,PTR信号衰减较快,与前面的分析一致。

除定性分析外,我们还进行了定量分析。从文献[3]有关公式出发,我们推得整个频率范围的频率依赖关系式(即适用于热薄和热厚两种情况),对于光不透明样品,后表面的温度涨落为

$$\delta T(l) = \sqrt{2} I_0 \left\{ \exp 2l \left( \frac{\pi f}{\alpha_s} \right)^{1/2} + \left[ \exp -2l \left( \frac{\pi f}{\alpha_s} \right)^{1/2} \right] - 2 \cos 2l \left( \frac{\pi f}{\alpha_s} \right)^{1/2} \right\}^{1/2} (k_s \rho c \pi f)^{1/2}, \quad (6)$$

将铜和铁样品的厚度  $l$  和热扩散率  $\alpha_s$  分别代入式(6), 得到频率特性的理论曲线如图 4 所示, 它们与实验值符合良好。

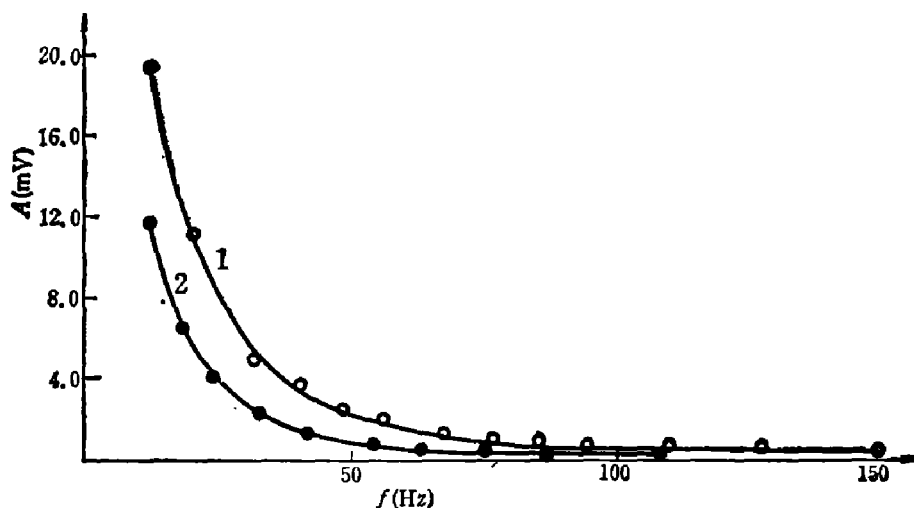


图 5 两个不同厚度石墨样品的频率特性比较

1— $l=0.265$  cm, 2— $l=0.337$  cm

Fig. 5 Comparison of frequency dependence between two graphite samples with various thicknesses

## 4 结 语

(1) 一般情况下, PTR 信号随着调制频率的增大而下降, 下降的速度因样品而异, 但热薄型样品的 PTR 信号与调制频率呈反比关系。

(2) 进行 PTR 测量时应综合考虑各种因素, 选择适当的调制频率, 以提高信噪比, 而不应简单地采用探测器  $D^*$  最高时的调制频率。

(3) 不透明热厚样品后表面的 PTR 信号在  $f > f_i$  之后以指数规律很快下降, 而前表面无此现象, 因此, 对这种样品应测量其前表面的 PTR 信号。

## 参 考 文 献

- 1 Nordal P E, Kanstad S O. *Infrared Phys.*, 1985; 25: 295
- 2 Santos R, Miranda L C M. *J. Appl. Phys.*, 1981; 52: 4194
- 3 管国兴, 郑小明, 李佩赞. 红外研究, 7A(1988); 201

## FREQUENCY CHARACTERISTICS OF PHOTOTHERMAL SIGNALS IN PTR

QIAN LIN, LI PEIZAN

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

Frequency characteristics of photothermal signals on the front and rear surfaces are discussed for various cases. The experimental results and relevant discussion of some optically opaque samples are given.

**Key words:** photothermal radiometry(PTR), photothermal signal, frequency characteristics.