

# PTR 系统空间分辨率受光斑尺寸影响的理论和实验研究\*

王 磊 李佩赞

(苏州大学物理系, 苏州 215006)

**摘 要** 给出了光热辐射测量(PTR)系统空间分辨率的定义. 研究了入射光光斑尺寸对空间分辨率的影响. 理论分析及实验研究表明, 聚焦后的入射光能大大提高系统的空间分辨率.

**关键词** 光热辐射测量, 空间分辨率, 光斑尺寸.

## 1 引 言

光热辐射测量技术与光声技术(PAS)相比, 具有不受样品尺寸限制, 不与样品接触的特点, 因此它尤其适用于检测各种非透明材料的表面及人眼无法直接观察和仪器不能接触的表面、内表面等处的缺陷(如伤痕、裂缝和空洞)及材料的不均匀性. 其应用于无损检测时的主要目的是准确地掌握缺陷的位置、间距和尺寸等, 而这些量与系统的空间分辨率是密切相关的. 入射光的光斑尺寸是影响空间分辨率的一个重要因素. 在光声及光热偏转技术中, 文献[1~3]对此问题已作过一些讨论, 但在光热辐射测量技术中, 对此尚未有过实验或理论的分析研究. 本文将首次给出光热辐射测量系统中光斑尺寸影响空间分辨率的理论分析及实验结果, 得出入射光经聚焦后大大提高了空间分辨率的结论.

## 2 理 论

从激光器出射的高斯光束, 光强  $I(r) = I_0 e^{-r^2/a^2}$ ,  $a$  为光斑半径,  $I_0$  为中心光强. 由文献[4]可知: 对于不透光样品, 当其热传导远大于样品表面的热交换时, 样品后表面各点的温度变化量为:

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

式中  $f_n$  是入射光强度分布按其本征函数即零阶贝塞耳函数  $J_0(K_n r)$  展开的系数. 对于高斯光束,

\* 国家自然科学基金会、江苏省科委、省教委自然科学基金会、苏州大学学生科研基金等资助项目.

收稿日期: 1993年6月29日; 收到修改稿日期: 1993年10月7日

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

$\sigma_n^2 = j \frac{\omega}{\alpha} + K_n^2$ ,  $\alpha$  是样品的热扩散系数;  $K_n$  是满足样品侧面第三类边界条件  $J_0(K_n R)/J_1(K_n R) = K_n K/h_2$  的本征值, 由于实际样品  $l \ll R$ , 因此侧面热交换系数  $h_2 \approx 0$ , 从而使  $K_n$  仅由  $J_1(K_n R) = 0$  决定。探测器探测到的光热辐射信号的振幅正比于  $\delta T$  的模, 相位值等于  $\delta T$  的幅角。

实验中用焦距为 25 mm 的锗透镜来改变光斑的半径。经实验测量, 聚焦前入射光斑半径为 2 mm, 按文献[5]可计算出聚焦后的光斑半径约为 0.035 mm。以  $R=30$  mm 的石墨及铜样品的有关参数代入公式(1)、(2), 对两种光斑半径进行数值计算, 并以最佳收敛时对应的  $n$  作为求和次数, 从理论上给出各样品对应的振幅信号的径向分布曲线如图(1)、图(2)所示。

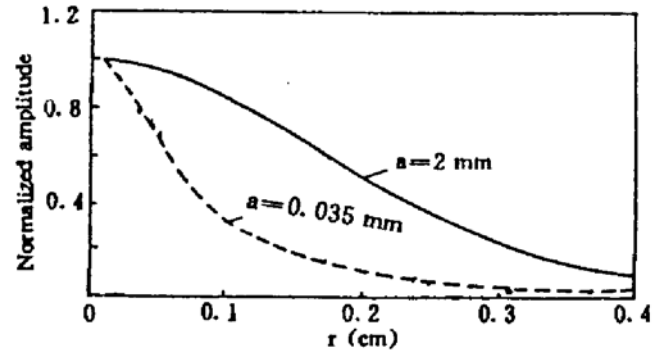
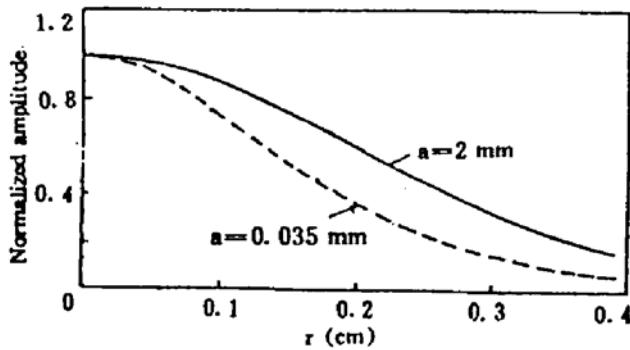


Fig. 1 Normalized amplitude vs samples radius ( $f = 21$  Hz)

Fig. 2 Normalized amplitude vs. samples radius ( $f = 21$  Hz)

Table 1 dependence of  $R^*$  on  $a$  ( $f=21$  Hz)

sample	$R^*$ (mm)	
	$a$ (mm)	
	2.0	0.035
graphite	2.85	1.98
copper	2.45	0.888

由图可见, 无论哪种样品, 光热辐射信号的振幅最大值都在中心, 并随样品径向增大而减小, 光斑半径减小后, 振幅减小显著加快, 尤以铜样品更为突出。

当探测条件一定时, 一般认为信号降至最大振幅的  $(1/e)$  后便可忽略。设最大振幅为  $A_0$ , 与  $A_0/e$  对应的径向距离为  $R^*$ , 则  $R^*$  范围内的平均温度涨落便是探测点的实测振幅信号。  $R^*$  越小, 样品中相邻两点被

分别探测的机会越大, 即越易于分辨。因此可定义  $\lambda = 1/R^*$  为光热辐射探测系统中分辨两点的极限距离, 称为空间分辨率。利用(1)、(2)式进行数值计算, 即可得出铜及石墨随光斑半径  $a$  变化的  $R^*$  值。如表 1 所列。由表 1 可得出:  $R^*$  随着入射光斑半径的减小而减小, 因此入射光经聚焦后, 光斑减小, 空间分辨率随之提高。当然, 以上分析是以调制频率、激光器与样品间距及探测器与样品间距都保持不变为条件的。

### 3 实 验

实验装置如图 3 所示。  $CO_2$  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，信号的振幅和位相由记录仪记录。

当样品尺寸满足  $l \ll R$  时， $h_2 \approx 0$ ，侧面对信号的影响可以忽略，所以当样品的长宽不小于  $2R$  时，样品不必为圆柱形。实验测量采用：1) 石墨样品，长宽为  $55 \times 70 \text{ mm}^2$ ，厚为  $2.0 \text{ mm}$ ，上刻两组刻痕，间距分别为  $2.30 \text{ mm}$  及  $2.89 \text{ mm}$ ；2) 同样面积的石墨空洞样品，厚为  $2.5 \text{ mm}$  (理论曲线与图 2 十分接近，不另给出)，内部有两组  $\phi = 1.5 \text{ mm}$  的空洞，间距分别为  $3.8 \text{ mm}$  及  $2.5 \text{ mm}$ ；3) 铜样品，长宽为  $70 \times 80 \text{ mm}^2$ ，厚为  $0.36 \text{ mm}$ ，上刻间距为  $2.08 \text{ mm}$  及  $1.93 \text{ mm}$  的三条刻痕及间距为  $3.45 \text{ mm}$  的二条刻痕。

由图 4 可见，两组石墨刻痕在光束未经聚焦前都是单峰，刻痕对应的信号重叠在一起，无法分辨刻痕的位置，而聚焦后各条刻痕均被清晰分辨。对照表 1， $a = 2 \text{ mm}$  时， $R^* = 2.85 \text{ mm}$ ，大于  $2.30 \text{ mm}$ ，接近  $2.89 \text{ mm}$ ，两组刻痕都无法分辨；当  $a = 0.035 \text{ mm}$  时， $R^* = 1.98 \text{ mm}$ ，小于任何一组刻痕间距，因此双峰显示非常清楚。

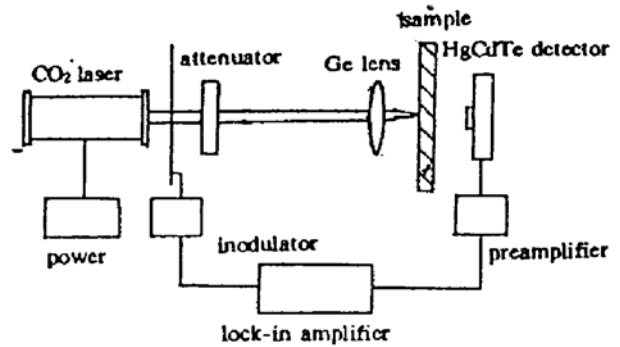


Fig. 3 Experiment set-up

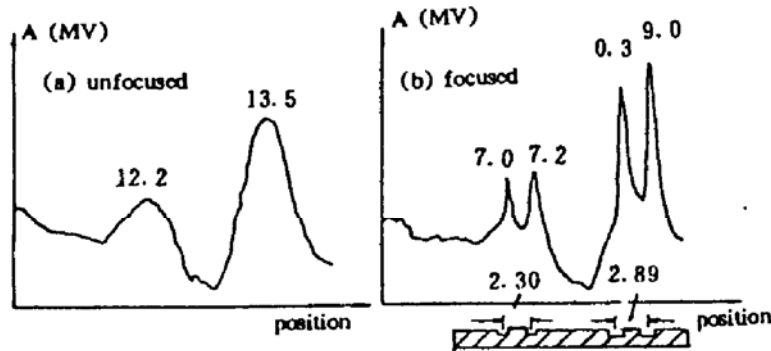


Fig. 4 PTR signal of graphite sample's scars ( $f = 21\text{Hz}$ )

由图 5 可见，对于间距  $2.5 \text{ mm}$  的空洞，聚焦后  $R^* < 2.5 \text{ mm}$ ，使聚焦前无法分辨的双洞位置在聚焦后清楚地显示出来了。（由于空气的热导率小于石墨的热导率，因此空洞对应的峰是倒的）。对于间距为  $3.8 \text{ mm}$  的那一组，虽然聚焦前  $R^*$  已小于  $3.8 \text{ mm}$ ，双峰已能分辨，但经聚焦后，重叠部分减小，两峰分开得更为清楚，说明聚焦后进一步提高了空间分辨率。由于空洞为半径较大的圆形，故峰并不尖锐。

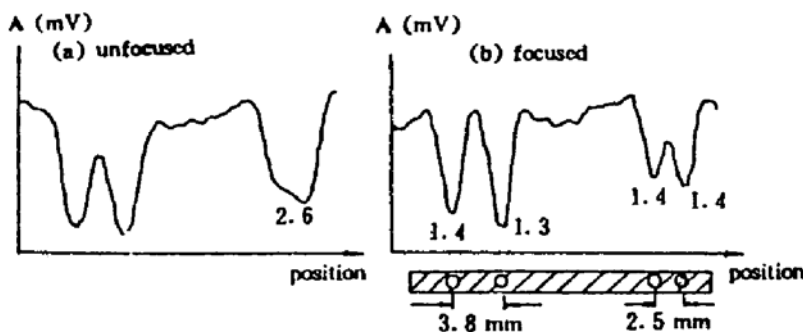


Fig. 5 PTR signal of graphite sample's holes ( $f = 21\text{Hz}$ )

对于铜样品,理论与实验也完全符合,如图6所示.当 $a=2\text{ mm}$ 时, $R^*=2.45\text{ mm}$ ,大于 $2.08\text{ mm}$ 及 $1.93\text{ mm}$ ,刻痕无法分辨.聚焦后, $R^*=0.888\text{ mm}$ ,远小于刻痕间距,三条刻痕全被分辨.另一组刻痕虽然聚焦前已能分辨,但聚焦后分辨率大大提高.

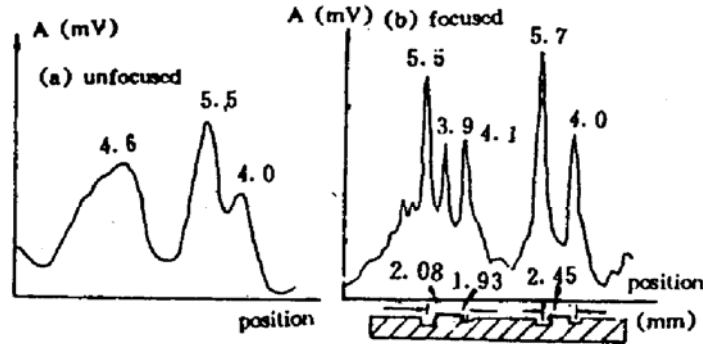


Fig. 6 PTR signal of copper samples scars

**结 论** 对于透射光热辐射测量系统的空间分辨率,在光束聚焦后明显提高的理论分析与实验结果完全符合.对于表面刻痕,以前的工作已得出结论,调制频率越高,分辨率越好,但是信噪比却随频率的升高而减小,因此,在实际测量中,为保证有足够的测量信噪比,调制频率的提高受到一定的限制,此时,通过对光束聚焦是提高空间分辨率的有效方法.

### 参 考 文 献

- [1] Mauri Luukkla, Photoacoustic microscopy at low modulation frequencies. *In Scanned Image Microscopy* edited by Ash E. London 1980, : 273
- [2] Grover C, Wetsel. Jr, F. Alan McDonald, Resolution and definition in photothermal imaging. *J. Appl. Phys.*, 1984, **56**(11): 3081
- [3] L. C. Aamodt, J. C. Murphy, Photothermal measurements using a localized excitation source. *J. Appl. Phys.*, 1981, **52**(8): 4903
- [4] 钱霖,李佩赞,连续调制光热辐射测量技术的三维理论模型. *光学学报*,1990, **10**(3): 276
- [5] 陈钰清、王静环,激光原理,杭州,浙江大学出版社,1992: 180

## Effect of Beam Size on Spatial Resolution of the PTR Systems

Wang Lei Li Peizan

(Department of Physics, Suzhou University, Suzhou 215006)

(Received 29 June 1993; revised 7 October 1993)

**Abstract** The definition of spatial resolution in the PTR (photothermal radiometry) system is given. The influence of incident beam size on spatial resolution is investigated. The theoretical analysis and practical measurements show that focused incident beam improves the spatial resolution of the system greatly.

**Key words** photothermal radiometry, spatial resolution, beam size.