

采用光热辐射计量术测量固体材料的光谱吸收系数

崔岩 刘景生

(长春光学精密机械学院光学物理系)

提 要

本文采用一种新的测试技术——光热辐射计量术(PTR),对固体材料进行非接触式光谱研究,文中介绍了光热辐射计量理论,并在实验上获得 Ce_2O_3 粉末和果树叶的相对光谱吸收系数。

关键词:光热辐射计量术;吸收系数。

一、引 言

光热辐射计量术的基本原理是,用调制单色光照射被测样品,样品对照射光产生吸收,并由其内部的非辐射过程将吸收的光能部分或全部地转变为热能,从而引起样品被辐照区的温度变化。通过样品受辐照区的热辐射变化量与样品材料的光热特性参量之间的关系即可对材料的光谱特性进行研究。光热辐射计量术不仅能作为强有力的光谱分析手段^[1,2],而且能够对金属材料的尺寸、表面结构和内部缺陷进行测量和探测^[3~5],此外,它还可以利用信号幅值和相位的变化测量镀膜的厚度和探测其表面缺陷^[6,7]。

二、光热辐射计量术理论

图1给出了光热辐射计量术理论推导的一维模型示意图,图中 l 为样品的厚度。在该模型下得到样品表面温升的解析表达式为^[8]:

$$\delta T = \frac{1}{4}(\pi f \rho c)^{-1} E_0 \beta(\lambda), \quad (1)$$

式中 f 为照射光的调制频率, ρ 为样品的密度, c 为样品的比热容, E_0 是波长为 λ 的单色照射光的峰值照度; $\beta(\lambda)$ 是样品对单色光的吸收系数。由样品的表面温升 δT 可以计算出样品被辐照区域的热辐射变化量 δM 。而光热辐射计量术的信号正比于热辐射变化量 δM ,所以有下式成立

$$\text{PTR 信号} = K \cdot \delta M = K \cdot 4\epsilon\sigma T^3 \delta T = K \epsilon\sigma T^3 (\pi f \rho c)^{-1} E_0 \beta(\lambda), \quad (2)$$

式中 K 为比例系数,它由收集热辐射的光学系统和探测器决定; ϵ 为样品的发射率; σ 为斯忒藩-波尔兹曼常数; T 为样品的温度。由(2)式可知,在测得不同波长下的照度值 E_0 和光热辐射计量术信号后,即可确定样品的相对光谱吸收系数。

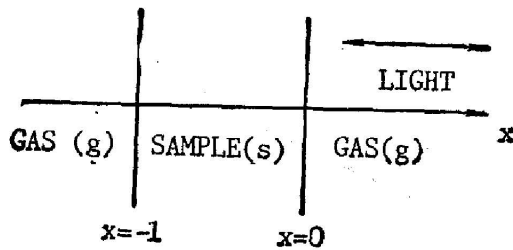


Fig. 1 Schematic diagram of the one-dimensional configuration

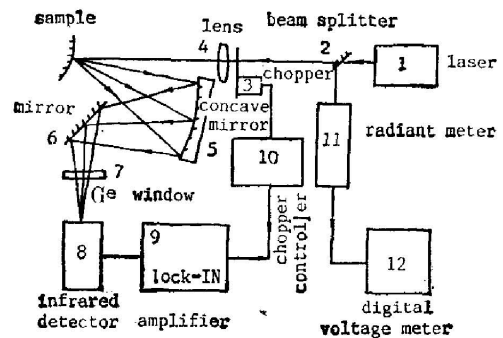


Fig. 2 Experimental arrangement for PTR spectroscopy

三、实验原理和装置

根据光热辐射计量术的基本原理,建立了一套测量固体材料吸收系数的装置。图2为装置原理图,测量时选用氩离子激光器和染料激光器作为光源1,其输出光由分束器2分为两束。其中一束由绝对辐射计11接收,通过数字电压表12的读数确定激光器的输出功率。另外一束光经调制盘3调制后,由透镜4会聚到样品上。样品的热辐射由球面反射镜5收集并成像到HgCdTe探测器8上。平面反射镜6将会聚光束的轴线转向90°以利于探测器的制冷。为了滤掉样品漫射的照射光,在探测器前加一块锗片7。探测器的输出信号由锁相放大器9显示,锁相放大器的参考信号由斩波器控制器10提供。

在上述实验装置下,取典型的样品参量^[1]和系统参量值, $\rho=1.5\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; $c=1\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\text{K}^{-1}$; $\beta=10^2\text{cm}^{-1}$; $E_0=2.5\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$; $f=46\text{Hz}$; $\epsilon=0.8$; $T=300\text{K}$; $K=1.8\times 10^{-1}\text{V}\cdot\text{W}^{-1}\text{cm}^2$,由(1)、(2)两式计算得PTR信号 $=27\mu\text{V}$ 。再由探测器的噪声等效功率 $\text{NEP}=4\times 10^{-12}\text{W}$ 和响应率 $R=1.5\times 10^4\text{V}\cdot\text{W}^{-1}$ 计算出信噪比值为 $(S/N)=320^*$ 。

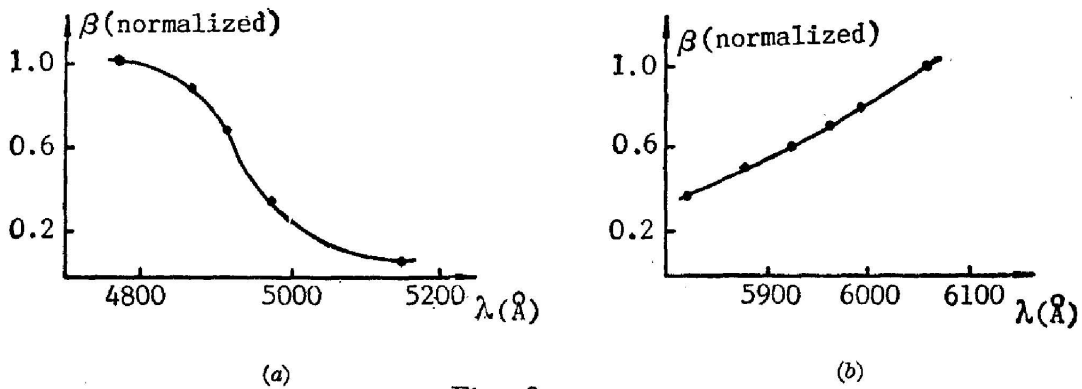
在实际测试中,当 $\lambda=6328\text{\AA}$ 、 $E_0=2.5\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,果树叶和 Ce_2O_3 粉末的PTR信号值分别为 $18\mu\text{V}$ 和 $15\mu\text{V}$;噪声均为 $0.05\mu\text{V}$,所以信噪比分别为360和300。理论计算与实验结果的一致,说明实验装置达到了设计要求。

四、结果及其讨论

采用光热辐射计量术测量装置对风干后显淡草绿色的果树叶和A-1型氧化铈粉末进行测试。图3给出了果树叶的相对光谱吸收曲线,从图3可以看出,在 $4750\text{\AA}\sim 5150\text{\AA}$ 波长范围内,果树叶的吸收系数单调下降;而在 $5800\text{\AA}\sim 6100\text{\AA}$ 波长范围内,果树叶的吸收系数单调上升。这种变化规律说明,干果树叶对蓝光和红光的吸收较强,而对绿光的吸收较弱。这是绿色植物所共有的规律,绿色植物在可见光谱区域的吸收峰分别在红光和蓝光区域,对绿光的吸收则很小。上述测试结果与有关文献[1]报道的测试结果是一致的。

图4中所示曲线为A-1型氧化铈粉末的相对光谱吸收系数曲线。测试波长范围为

* 计算时,考虑到交流信号的均方根值引入 $1/\sqrt{2}$ 。



(a), (b) Relative absorption coefficient spectrum of a dried fruit leaf

5738Å~6312Å。图中曲线为典型的稀土元素氧化物吸收系数曲线，其峰值位置在 5910Å。将此测试结果与有关文献[1]报道的氧化铈粉末吸收系数谱相比较，发现它们具有相同的变化规律，所不同之处是氧化铈的吸收峰位于 6000 Å 处。吸收峰位置的微小差异是与铈和铈元素原子结构中的细微差别相对应的。

对上述两种样品的测量数据的相对误差为 $<2.5\%$ ；波长精度为 2Å 。产生 PTR 信号误差的主要原因是持续光照所引起的样品静态温度变化量 ΔT 。由光热辐射计量术理论知，PTR 信号正比于样品静态温度的立方。在依次测量时，样品的静态温度变化将导致 PTR 信号值的变化。样品的静态温升表达式为^[9]

$$\Delta T = E_0 l / 2K_s, \quad (3)$$

式中 K_s 为样品的热导率。取各参量的典型值， $K_s = 0.1 \text{Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ， $l = 0.2 \text{cm}$ ， $E_0 = 4 \text{Wcm}^{-2}$ ，由 (3) 式计算得 $\Delta T = 4\text{K}$ 。所以由静态温升引起的 PTR 信号值相对变化为 $3(\Delta T/T) = 4\%$ 。样品的静态温度在光照开始时，有一上升阶段，而后随着新的热平衡条件的建立趋于一稳定值。因此，测试时避开静态温度的上升阶段，就可使 PTR 信号的相对误差 $<4\%$ 。

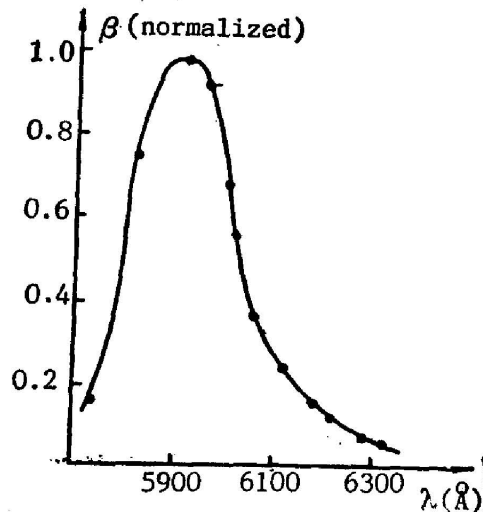


Fig. 4 Relative absorption coefficient spectrum of Ce_2O_3 powder

五、结 束 语

应用光热辐射计量技术对果树叶和氧化铈粉末光谱吸收系数的研究表明，该技术适用于研究不透明和强烈散射的样品。由于它采用非接触、非损伤式探测，克服了许多常规测试方法的局限性，具有适用于高温、高真空等极端条件下进行测试的优点，对测试样品的尺寸也没有要求。此外，由于在光热辐射计量技术中，样品受到光照到产生热辐射之间的过程是

一个瞬态过程,所以利用这一技术可以进行瞬态光谱研究。

根据光热辐射计量术的特点和目前的研究结果可以预言,光热辐射计量术是一种具有发展前途的测试技术。此方法有能够研制出专门的测试仪器以满足科研和生产的需要。因此,对光热辐射计量术在理论和实验上的研究,使之趋于成熟和完善是一件有实用意义的工作。在本文实验过程中,曾得到长春光机所禹秉熙、金锡峰等同志的指导和帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] P. E. Nordal, S. O. Kanstad; *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**, No. 7 (Apr), 486~488.
- [2] A. C. Tam, B. Sullivan; *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**, No. 4 (Aug), 333~335.
- [3] G. Busse; *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **42**, No. 4 (Feb), 366~368.
- [4] G. Busse; *J. de Phys.*, 1983, Colloque c6, Supplement au No. 10, Tome. 44 (Oct), 427~436.
- [5] G. Busse; *J. de Phys.*, 1983, Colloque c6, Supplement au No. 10, Tome 44 (Oct), 471~477.
- [6] D. P. Almond, P. M. Patel *et al.*; *J. de Phys.*, 1983, Colloque c6, Supplement au No. 10, Tome 44 (Oct), 491~495.
- [7] G. Busse, P. Eyerer; *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**, No. 4 (Aug), 355~357.
- [8] R. Santos, L. C. M. Miranda; *J. Appl. Phys.*, 1981, **52**, No. 6 (Jun), 4194~4198.
- [9] P. E. Nordal, S. O. Kanstad; *Phys. Scripta*, 1979, **20**, No. 5/6 (Nov/Dec), 659~662.

Measurement of absorption coefficient for solid material by photothermal radiometry

CUI YAN AND LIU JINGSHENG

(Department of Optical Physics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics)

(Received 15 April 1988; revised 14 May 1989)

Abstract

A new analytical technique—Photothermal Radiometry (PTR) is introduced in this paper. We set up a PTR measurement system and obtained the optical absorption spectrum of solids by using Ce_2O_3 powder and a green leaf as the testing sample. Calculated PTR signal-to-noise ratios are found comparable with those observed.

Key words: photothermal radiometry; absorption coefficient.