

光热辐射光谱探测灵敏度的研究

王桂芬 王 宣 马根源 张光寅

(南开大学物理系)

摘要——着重讨论了光热辐射光谱(PTR)技术的探测灵敏度问题,用该方法测量了 Cu_2O 和 GaAs 两种材料的吸收边。测出 Cu_2O 的吸收边在 631.5 nm 和 641.0 nm 处明显有两个拐点,但用于 GaAs 基本吸收边测量时,其信号约比 Cu_2O 的信号小一个数量级。分析指出,当所选红外探测器的响应波长范围刚好与被研究材料的红外强辐射带一致时,可大大提高 PTR 的探测灵敏度。

一、引 言

基于调制光吸收引起热效应的光声光谱技术近年来已有不少报道^[1,2] 其中包括使用光声室和压电陶瓷两种检测方法。由于光声探测方法简单、灵敏度高、适宜测量弱吸收的固体和粉末样品,所以被广泛用于从紫外到红外范围的气体、液体和固体的研究和分析。但是光声技术的两种检测方法都需要与样品保持物理接触,另外,样品的尺寸受到光声室或贴在样品上的压电陶瓷尺寸的限制。光热辐射光谱(PTR)技术是一种远距离检测信号的光谱学方法,通过测量调制光照射样品引起红外辐射的增加实现检测^[3]。PTR 技术是一种完全非接触的测量,除具有光声光谱技术的某些优点外,它还能够直接测量必须在远距离读数的高温样品和腐蚀性样品,并适用于测量尺寸太大或太小的样品和生产线上的样品,而这些用光声方法是无法实现的。本文通过对 Cu_2O 与 GaAs 两种样品的测量得出:采用这种方法时要特别注意所选择的红外探测器的响应波长范围与被测材料的红外高辐射带相匹配的问题,这样可以大大提高 PTR 的探测灵敏度。

二、基本 原 理

当用振幅调制光照射样品时,由于样品对光的吸收引起伴随的表面温度的脉动变化,从而产生对应的红外辐射。通过测量这种样品的脉动红外辐射变化,可以研究样品对光吸收的特性。

本文 1986 年 12 月 6 日收到。修改稿 1987 年 4 月 25 日收到。

温度为 T 时, 一个灰体的总辐射出射度为 $W = \varepsilon\sigma T^4$, 当表面温度发生 δT 的变化时, 辐射出射度的变化为

$$\delta W = 4\varepsilon\sigma T^3\delta T = \varepsilon\sigma I_0 T^3 (\pi f \rho c)^{-1} \alpha(\lambda), \quad (1)$$

其中 $\delta T = (\mu^2/4K) I_0 \alpha(\lambda)$, $\mu = (K/\pi f \rho c)^{1/2}$, T 为样品绝对温度, ρ 为样品密度, c 为比热, $\alpha(\lambda)$ 为光谱吸收系数, ε 为样品的比辐射率。公式(1)表示由波长为 λ 、峰值光强为 I_0 、斩波频率为 f 的正弦调制单色光照射该样品时的辐射变化幅度。这里, σ 是斯忒藩-玻耳兹曼常数, μ 是样品的热扩散长度, k 是热导率。当光吸收长度 $\alpha^{-1}(\lambda) \gg \mu$ 时, 也就是当辐射到介质中的穿透深度远大于材料的热扩散长度时, 公式(1)中的 δT 的表达式成立。由式(1)可以看出, 虽然由于高温下背景辐射, 信噪比下降(噪声约正比于 T^2)。但 PTR 信号正比于 T^3 , 所以 PTR 信噪比正比于 T , 这不同于 PA 技术^[4]。普朗克黑体辐射公式为:

$$r_{\lambda, T} d\lambda = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda, \quad (2)$$

对于非黑体情况, 从 λ_1 到 λ_2 的辐射出射度为

$$W_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r_{\lambda T} \varepsilon_{\lambda} d\lambda, \quad (3)$$

由式(2)可知: 对不太高的 T 和较小的 $(\lambda_2 - \lambda_1)$ 在红外区, $r_{\lambda, T}$ 基本为常数, 所以式(3)可简化为

$$W_{\lambda_1 \lambda_2} \doteq r_{\lambda T} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} d\lambda. \quad (4)$$

由于红外探测器具有一定的响应范围的 $(\lambda_1 \sim \lambda_2)$, 所以 PTR 信号在很大程度上决定于在探测器响应范围内的积分 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} d\lambda$ 。此外, PTR 信号还依赖于样品的温度、热扩散长度、表面热损耗等。

三、实验及其结果

我们的 PTR 光谱实验装置如图 1。光源为卤钨灯(250 W), 通过单色仪和斩波器得到调制的单色光。当样品被这种脉动单色光照射时, 由于吸收产生相应的红外辐射, 这种辐射

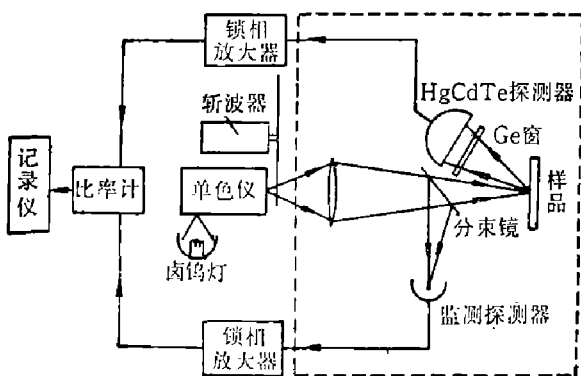


图 1 光热辐射光谱实验装置图
Fig. 1 Experimental arrangement for PTR spectroscopy.

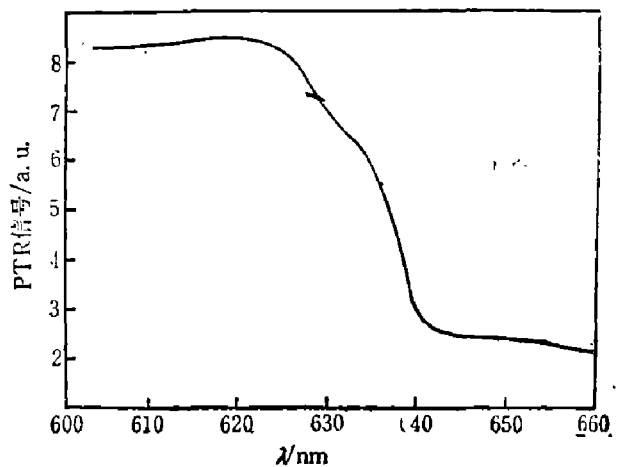


图 2 Cu_2O 的光热辐射光谱
Fig. 2 PTR spectrum of Cu_2O .

经过 Ge 窗口滤波被 HgCdTe 红外探测器接收。在样品前放置分束镜，以监测单色光的光强。图 1 中虚线内表示电光屏蔽区，并在单色仪的出射狭缝上安装一红外滤光片，以消除散射光和电磁干扰。在实验中我们发现当波长在 620.0~645.0 nm 范围时，卤钨灯单色仪系统光强变化小于 6%。所以我们对 Cu₂O 样品采用单光路测量，以简化实验装置。

我们在室温下测得厚度为 0.30 mm、表面抛光 Cu₂O 样品的 PTR 谱如图 2 所示，图中明显地显示出由于吸收和释放声子所表现出的两个拐点，它们的位置分别为 631.5 nm 和 641.0 nm。我们用 UV-365 紫外可见分光光度计测量了 Cu₂O 的吸收光谱作为对照，如图 3 所示。从图 3 中可以看出两个拐点分别在 631.2 nm 和 640.5 nm。参考文献曾报道厚 0.5 mm、20°C 时的 Cu₂O 吸收谱中拐点分别在 637.1、628.4 nm^[5]和 640.0、630.9 nm^[6]。可见用光热辐射法测量的结果与分光光度计的结果和国外报道的结果是一致的。我们还用 OAS-400 光声光谱仪进行了测量，由于信号很微弱，噪声很大，看不出在吸收边上有拐点。因此，PTR 光谱不仅精度高，而且灵敏度也高于光声光谱。

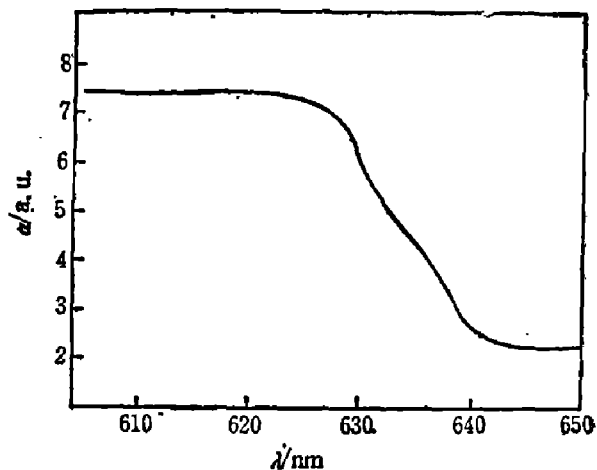


图 3 用 UV-365 分光光度计测得的 Cu₂O 吸收谱
Fig. 3 Absorption spectrum of Cu₂O measured with UV-365 spectrophotometer.

我们发现 PTR 信号对调制频率的改变不灵敏，我们采用的调制频率为 1 kHz。由于 PTR 谱对频率的升高没有象光声光谱的指数衰减，所以在用 PTR 谱扫描成像中可以用提高调制频率的方法提高时间分辨率和空间分辨率。

四、提高 PTR 灵敏度的探索

实验中，我们用液氮温度下工作的 HgCdTe 红外探测器作为辐射接收器，其探测峰值波长为 8~14 μm。我们分别测量了 Cu₂O、GaAs 样品的吸收边光谱，发现 GaAs 的 PTR 信号很小，比 Cu₂O 的 PTR 信号约小一个数量级。我们又用光声法分别测量了这两种样品的吸收谱，发现 GaAs 的光声信号比 Cu₂O 的还要大。出现这种相反的结果的原因可分析如下。由公式(1)，(4)看出，PTR 信号与材料的比辐射率成正比，因此我们对材料的辐射特性进行了分析。我们又用 DS-701G 红外分光光度计分别测量了 GaAs 和 Cu₂O 的透射和反射光谱，如图 4、图 5 所示。

王宝明等人^[7]指出：由于剩余反射带对辐射的阻抑作用以及极性振动的非谐效应，材料的强辐射带并非对应于基本振动的强吸收带，而是对应于中等强度的两声子组合吸收带。而强辐射带几乎全部落在振动吸收带基频及其倍频之间的频率范围内。从图 4 可以看出，GaAs 的振动吸收带在 40 μm 附近，所以其强辐射带在 20~40 μm 之间；从图 5 可以看出，Cu₂O 的振动吸收带在 16 μm 附近，所以其强辐射带应在 8~16 μm 之间，由此得出如图 4 和图 5 中曲线 c 所示 GaAs 和 Cu₂O 的辐射光谱。我们也使用 NICOLET-5DX-FTIR 光谱仪测量了 200°C 时的 Cu₂O 和 GaAs 的辐射谱，测得的 Cu₂O 的辐射谱如图 6 所示，与图 5

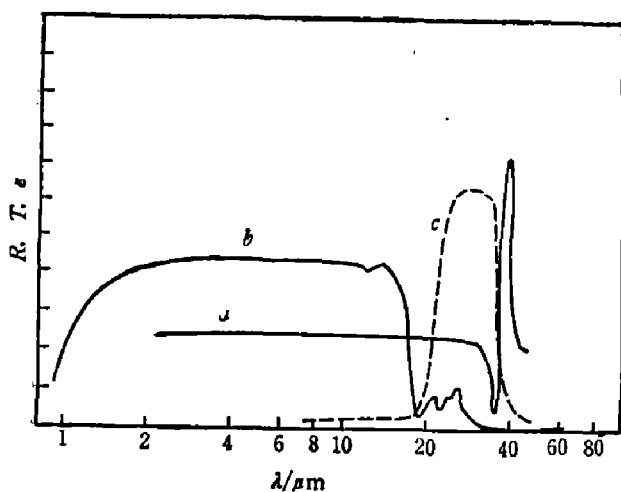


图4 GaAs的反射(a)透射(b)和辐射(c)光谱
Fig. 4 Spectra of reflection(a), transmission (b) and radiation(c) of Ga As.

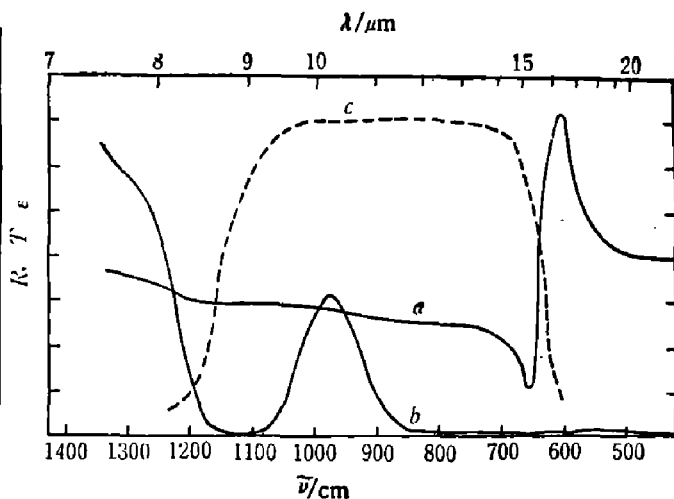


图5 Cu₂O的反射(a)透射(b)和辐射(c)光谱
Fig. 5 Spectra of reflection(a), transmission (b) and radiation(c) of Cu₂O.

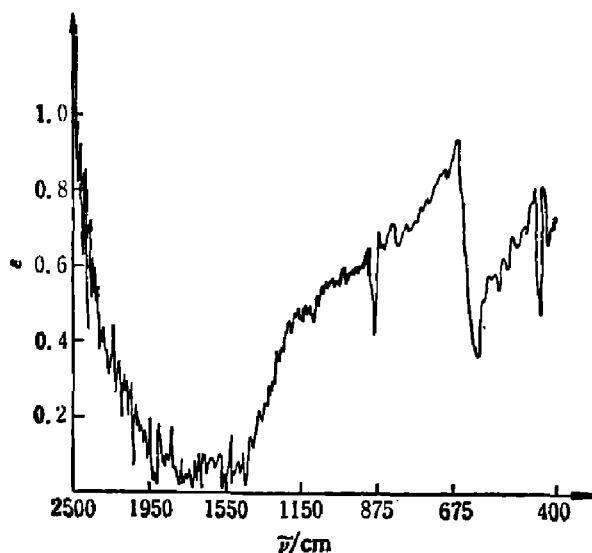


图6 实验测得的Cu₂O的辐射谱(200°C)
Fig. 6 Measured radiation spectra of Cu₂O(200°C).

曲线c所示的辐射峰位置一致。由于仪器使用范围的限制,在此波段没有测出GaAs的辐射峰,也与前面的分析一致。我们认为:Cu₂O的强辐射带(8~16 μm)正好在红外探测器HgCdTe的响应波长范围内(8~14 μm),因而Cu₂O的PTR信号很大;而GaAs的强辐射带(20~40 μm)不在HgCdTe的响应波长范围内,PTR信号就很小。

五、结 论

本文用PTR光谱方法研究了Cu₂O的吸收光谱,并得到了由于吸收和释放声子所产生的拐点的精确位置。初步探索了提高PTR光谱探测灵敏度的一个途径。所有适用于光声光谱方法研究的样品都适用于PTR光谱方法,例如粉末、血液、骨骼及绿色植物都可以用光热辐射方法测试。PTR光谱具有很高的灵敏度,可以实现无接触的光谱测量,也可实现高温样品的远距离监测,是一种很有发展前途的光谱技术。

参 考 文 献

- [1] Busse G. and Ograbek A., *J. Appl. Phys.*, **51**(1980), 3576.
- [2] Rosenwaig A. and Busse G., *Appl. Phys. Lett.*, **36**(1980), 725.
- [3] Kanstad S. O. and Nordal P. E., *Phys. Technol.*, **11**(1980), 142.
- [4] Nordal P. E. and Kanstad S. O., *Appl. Phys. Lett.*, **38**(1981), 486.
- [5] Гросс Е. ф., *Успехи физических Наук*, 63(1957), 575.
- [6] Горбань И. С. И Тимофеев В. Б., *Физика Твёрдого Тела*, **3**(196), 3584.
- [7] 王宝明、苏大昭、张光寅, *红外研究*, **2**(1983), 55.

STUDY ON DETECTIVE SENSITIVITY OF PHOTOTHERMAL RADIOMETRY SPECTROSCOPY

WANG GUIFEN, WANG XUAN
MA GENYUAN, ZHANG GUANGYIN
(*Department of Physics, Nankai University*)

ABSTRACT

The detective sensitivity of the photothermal radiometry (PTR) spectrum technique is discussed and the absorption edges of Cu_2O and GaAs are measured. The absorption edge of Cu_2O shows two shoulders obviously in 632nm and 641nm, The fundamental absorption edge of GaAs is measured with PTR. The signal amplitude of GaAs is an order of magnitude less than that of Cu_2O . By comparison and analysis, it is found that the detective sensitivity of PTR can be improved obviously when the responsive wavelength range of infrared detector lies in the strong infrared radiation band of the specimen.