

用光热光偏转方法测量 材料的红外吸收系数

王桂芬 马根源 张光寅

(南开大学物理系)

摘要——用简单的超高灵敏度光热光偏转方法研究 GaAs、NaCl、N 型单晶 Ge 和 Si 等材料在 $10.6\ \mu\text{m}$ 的吸收特性,测得以上几种材料的吸收系数。实验结果与国内外报道符合得较好。

一、引 言

我们曾提出了用光声(PAS)方法测量材料的红外低吸收系数,测得了电阻率不同的 N 型 Ge^[1]、各种类型的 GaAs^[2] 等材料的低吸收系数及镀金反射镜的高反射率^[3], PAS 方法是一种很好的测量材料的低吸收系数的方法,但这种方法要求探测器与样品保持接触,受样品尺寸的限制,而且测量很低的吸收系数时,很难找到吸收系数更低(低两个数量级)的材料作为光声室窗。另外,光声室测量受周围环境的影响很大,限制了灵敏度的进一步提高。而且, PAS 方法以一种材料作为标准样品测量另一种材料的吸收系数,不仅需要知道两种材料的密度、比热和热膨胀系数,还需要知道两种材料的泊松比,致使有些材料根本不能用该法进行测量。而光热光偏转(PDS)方法,只需要知道两种材料的比热和密度即可。

二、基本 原 理

当一束强度可调制的光束(激发光束)照射到样品上时,随着样品上光学加热区温度的变化,样品内或贴近样品表面的薄层(气体或液体)的折射率发生梯度变化,当探测光束经过这一折射率变化的区域时,将发生偏转。使用位置探测器可探测这一偏转,测得的偏转与样品对激发光束的吸收系数直接相关。这种测量吸收系数的方法即为光热光偏转(PDS)方法。

如图 1 所示,设样品位于 $x-y$ 平面内,探测光束位于 $x-z$ 平面内,且与 x 轴成 ψ 角, ϕ 为探测光束的偏转角, y_0 为探测光束与激发光束最大强度之间的距离, l 是样品厚度, ω 是高斯型激发光束的 $1/e^2$ 的光斑半径。

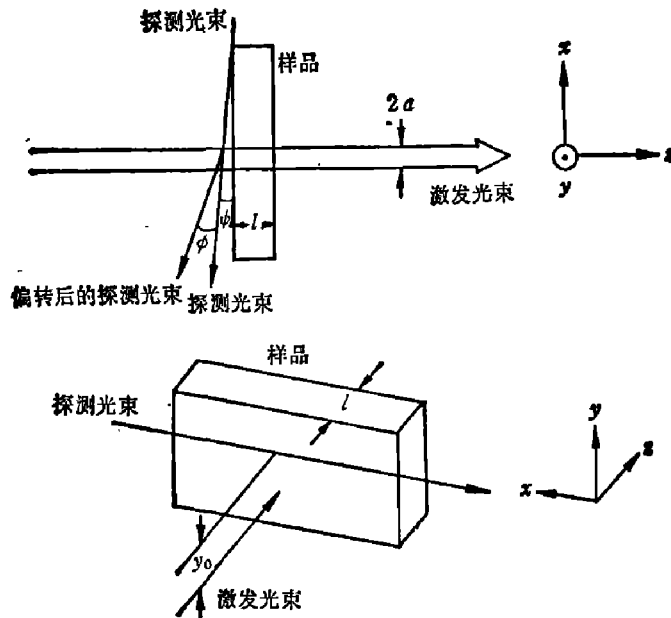


图1 PDS方法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of photothermal deflection spectroscopy method.

根据吸收介质引起光束偏转的一般理论,得到探测光束的偏转角为^[4]

$$\phi = \frac{dn}{dT} \frac{P}{\omega \rho c \pi a^2} [1 - \exp(-\alpha l)] \left[-2 \left(\frac{y_0}{a^2} \right) \exp\left(-\frac{y_0^2}{a^2}\right) \right], \quad (1)$$

其中 $\frac{dn}{dT}$ 是介质折射率的温度系数, P 是入射激光功率, ω 、 ρ 、 c 、 α 分别是激发光束的角调制频率, 样品密度、比热和光吸收系数。对于我们在实验中使用的两象限硅光电池象限接收器, PDS 信号与偏转角成正比^[5], 有

$$\Delta V \propto \phi d,$$

式中 d 为激发光束照射在样品上的落点到探测光束在接收器上的光斑之间的垂直距离。所以 PDS 信号为

$$\Delta V \propto \frac{dn}{dT} \frac{Pd}{\omega \rho c \pi a^2} [1 - \exp(-\alpha l)] \left[-2 \left(\frac{y_0}{a^2} \right) \exp\left(-\frac{y_0^2}{a^2}\right) \right]. \quad (3)$$

三、吸收系数的测量

我们使用的实验装置如图 2 所示。用波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 、功率为 4 W 的 CO_2 激光器作激

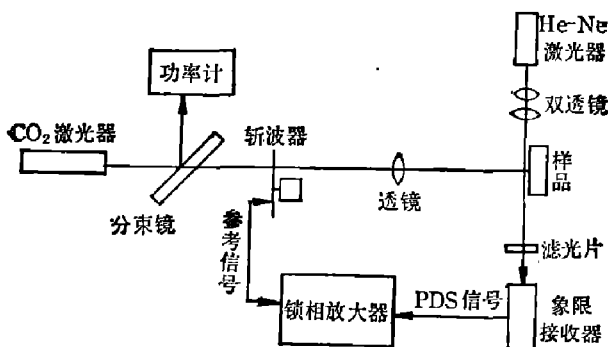


图2 PDS方法的实验装置

Fig. 2 Experimental system for photothermal deflection spectroscopy method.

发光束, CO_2 激光束经斩波器斩波后, 成为音频调制的光束。为减小激发光束的光斑半径, 在样品前加一锲透镜, 使 CO_2 激光束在样品上聚焦。探测光束是功率为 0.5 mW 、波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器, 为了使探测光斑半径小于激发光斑半径, 并尽可能延长象限接收器到样品间的距离, 以提高 PDS 信号的灵敏度, 我们用双透镜减小探测光斑, 并将 He-Ne 激光束腰向远离样品方向移动。为便于用激光功率

计监测输入功率的变化,以修正功率起伏引起的误差,在样品前加半透半反 GaAs 分束镜。用直径为 25mm 的两象限硅光电池象限接收器探测光束偏转,用 5205 锁相放大器放大测量 PDS 信号,为了减少象限接收器上的杂散光,在象限接收器前加一滤光片。

实验中,利用我们以前用光声法测出吸收系数的掺 Cr-GaAs 样品 ($\alpha_0 = 0.0128 \text{ cm}^{-1}$) 作为标准样品^[2],用复合型 GaAs、NaCl、电阻率不同的 N 型单晶 Ge 和 Si 作为待测样品,在激光功率 P' 、激发光束光斑半径 a 、激发光束与探测光束最大强度之间的距离 y_0 都不变的情况下,将样品放在空气中,分别测出标准样品和待测样品的 PDS 信号。根据以上条件,将 $P = P'(1-R)$ 代入式(3),得到

$$\frac{\Delta V_0}{\Delta V} = \left[\frac{P'(1-R_0)}{c_0\rho_0} / \frac{P'(1-R)}{c\rho} \right] \frac{1-e^{-\alpha_0 l_0}}{1-e^{-\alpha l}} = \frac{(1-R_0)c\rho}{(1-R)c_0\rho_0} \frac{1-e^{-\alpha_0 l_0}}{1-e^{-\alpha l}}, \quad (4)$$

$$\alpha = -\frac{1}{l} \ln \left[1 - \frac{(1-R_0)c\rho}{(1-R)c_0\rho_0} (1-e^{-\alpha_0 l_0}) \frac{\Delta V}{\Delta V_0} \right].$$

再利用垂直入射时

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}, \quad (5)$$

即可求出待测样品的吸收系数 α 。

表 1 列出了几种材料的一些物理常数。将表 1 的数据代入式(4)和式(5),即可计算出

表 1 几种待测材料的一些物理常数^[6]

Table 1 Some physical constants of several materials to be measured.

| 参 数 | 比热 (cal/g·°C) | 密 度 (g/cm ³) | 折射率 ($\lambda=10.6 \mu\text{m}$) |
|------|---------------|--------------------------|------------------------------------|
| GaAs | 0.083 | 5.316 | 3.09 |
| NaCl | 0.204 | 2.165 | 1.49 |
| Ge | 0.074 | 5.327 | 4.00 |
| Si | 0.181 | 2.330 | 3.42 |

表 2 几种材料在 10.6 μm 的红外吸收系数

Table 2 Infrared absorption coefficients of several materials at 10.6 μm .

| 样 品 | 规 格 | 吸 收 系 数 | | |
|---------|-----------|--|---------|-----------------------|
| | | 本文结果 | 报 道 结 果 | |
| 标 准 样 品 | 掺 Cr-GaAs | $\rho=10^7 \Omega \cdot \text{cm}, n=10^6 \text{ cm}^{-3}$ | 0.0128 | |
| 待 测 样 品 | 复合型 GaAs* | $\rho=10^8 \Omega \cdot \text{cm}, n=10^6 \text{ cm}^{-3}$ | 0.0089 | 0.0088 ^[2] |
| | NaCl | | 0.0048 | 0.005 ^[7] |
| | N 型单晶 Ge | $\rho=16 \Omega \cdot \text{cm}$ | 0.021 | 0.021 ^{**} |
| | N 型单晶 Ge | $\rho=40 \Omega \cdot \text{cm}$ | 0.032 | 0.032 ^{**} |
| | N 型单晶 Si | $\rho=1.0 \Omega \cdot \text{cm}$ | 0.422 | 0.41 ^{***} |
| | N 型单晶 Si | $\rho=0.8 \Omega \cdot \text{cm}$ | 0.545 | 0.55 ^{***} |

* 复合型 GaAs 样品由北京有色金属研究总院研制。

、* 分别由参考文献[1]和[8]中的吸收系数与电阻率的关系曲线得到。

待测样品的吸收系数 α 。我们测得几种材料在波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的红外吸收系数列于表 2。

由表 2 可知, PDS 方法的结果与以前报道的结果符合得较好^[1,2,7,8]。

必须指出的是, 如果改变光源波长, 用 PDS 方法原则上可以测量从紫外到红外波段的光学材料的低吸收系数, 但由于待测材料的超低吸收系数, 需要较强的连续光源作为激发光束, 尤其是测量材料的红外吸收系数, 受到红外激光器波长的限制, 目前只能测量 $10.6 \mu\text{m}$ 、 $3.39 \mu\text{m}$ 等少数波长的吸收系数。本文只介绍了用比较法测量材料的红外吸收系数, 但就 PDS 方法本身来说, 没有标准样品同样可以测量光吸收系数, 因为式(1)中 $\frac{dn}{dT}$ 、 P 、 ω 、 ρc 、 a 和 y_0 都是已知常数, 只要知道偏转角 ϕ , 即可求出吸收系数 α , 而式(2)中的比例系数是由象限接收器本身性能决定的一个常数, 实验上测出 PDS 电压信号, 由式(2)即可求出偏转角 ϕ 。另外, 为了减少机械振动, 我们对光源、透镜、样品架及象限接收器等均采取了防震措施。实验时实验室基本保持密封, 空调器也停止运转, 使空气的对流和湍流减到最小。采取了这些措施后, 我们测得 NaCl 样品的 PDS 信号为 $700 \mu\text{V}$ 左右 ($\alpha = 5 \times 10^{-8} \text{cm}^{-1}$), 而噪声电压仅为 $1 \mu\text{V}$ 左右, 测量误差约为 0.1% 。升高调制频率, 使 PDS 信号下降到 $10 \mu\text{V}$ 时, 噪声电压仍为 $1 \mu\text{V}$ 左右。因而, 用我们的实验装置, 可测量 10^{-5}cm^{-1} 的吸收系数, 测量误差约为 10% 。我们的测量是在空气中进行的, 如果在液体(例如硅油)中测量, 可望进一步提高灵敏度。

四、结 论

我们用一种简单的 PDS 方法测量了复合型 GaAs、NaCl、电阻率不同的 N 型单晶 Ge 和 Si 等材料在 $10.6 \mu\text{m}$ 的吸收系数, 实验结果与以前报道的理论和实验结果一致。

PDS 方法测量的是由样品的光吸收引起的全部的介质温度的空间梯度变化, 而不仅仅是光吸收产生的部分信号, 因而大大提高了测量灵敏度, PDS 方法采用的样品不需要密封, 不受样品尺寸的限制, 探测器不接触样品, 不受周围环境中声音和振动的影响, 消除了由于窗材料光吸收引起的噪声。它的唯一缺点是调试比较困难。总之 PDS 方法简单, 灵敏度高, 对样品无破坏性, 是一种很好的测量材料超低吸收系数的方法。

参 考 文 献

- [1] 王桂芬、李增发、张光寅、激光, **8**(1981), 33.
- [2] 王桂芬、张光寅、张春平, 半导体学报, **3**(1982), 2301.
- [3] 王桂芬、张春平、张光寅, 计量学报, **3**(1982), 234.
- [4] Boccara. A. C. and Fournier. D., *Opt. lett.*, **5**(1980), 377.
- [5] W. C. Jackson et al., *Appl. Opt.*, **20**(1981), 1333.
- [6] E. M. 沃伦科娃等著, 红外光学材料手册, 北京玻璃研究所情报组译, 天津《国外红外与激光技术》编辑组出版, 1973.
- [7] Patel. B. S., *Appl. Opt.*, **16**(1977), 1232.
- [8] 吴仲辉等, 半导体学报, **8**(1985), 317.

MEASUREMENT OF INFRARED ABSORPTION COEFFICIENT OF MATERIALS BY PHOTOTHERMAL DEFLECTION SPECTROSCOPY METHOD

WANG GUIFEN, MA GENYUAN, ZHANG GUANGYIN

(Department of Physics, Nankai University)

ABSTRACT

Infrared absorption coefficients of GaAs, NaCl, N-type single crystals Ge and Si are measured at $10.6\mu\text{m}$ by photothermal deflection spectroscopy method which is simple and supersensitive. The experimental results are in good agreement with those measured by photoacoustic spectroscopy and other data.