

〈测量技术〉

## 红外傅里叶光谱仪用于红外探测器 相对光谱响应曲线测试的几个问题

程有度, 李立华, 姬玉龙, 洪建堂, 戴诺, 姜炜波, 杨登全, 赵薇薇

(昆明物理研究所 云南 昆明 650223)

**摘要:** 在使用红外傅里叶光谱仪进行红外探测器相对光谱响应曲线测试过程中, 遇到了标准探测器如何选择和扫描速度(频率)参数如何设置的问题。通过分析测试原理、测试方法和测试仪器的工作原理, 找到了问题的实质和解决问题的方向。

**关键词:** 红外探测器; 光谱响应; 红外傅里叶光谱仪; 扫描速度

中图分类号: TN219 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2013)12-0813-05

## Some Problems for Measurement of the IR Detector's Relative Spectral Response Curve by IR Fourier Spectroscopy

CHENG You-du, LI Li-hua, JI Yu-long, HONG Jian-tang  
DAI Nuo, JIANG Wei-bo, YANG Deng-quan, ZHAO Wei-wei  
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** When measuring the IR detector's relative spectral response curve by IR Fourier spectroscopy, we have encountered the problem how to configure the scanning speed (frequency) parameters of IR Fourier spectroscopy according to the selected standard detector. In this paper, by analysing the testing principle, the testing method and the working principle of instrument, a solution has been proposed after the essentials of the problem was found.

**Key words:** infrared detector, spectral response, infrared Fourier spectroscopy, scanning speed

### 0 引言

红外傅里叶光谱仪在红外探测器相对光谱响应曲线(相对光谱响应率、相对光谱响应函数)测试中, 与通常测试样本透过率时一样, 需要先用红外傅里叶光谱仪所配的标准TGS(硫酸三甘肽)探测器或碲铬汞探测器(通常使用TGS标准探测器)获取光谱仪的本底光谱曲线用于计算被测探测器相对光谱响应曲线<sup>[1-2]</sup>, 而光谱仪的测试软件中在获取光谱仪的本底光谱曲线时, 有一个扫描速度参数设置选项, 但其单位是频率单位赫兹, 其取值范围是1~60 kHz, 但是在实际测试中发现, 当改变这个参数时, 所获得的本底光谱曲线不仅幅度会变化<sup>[3]</sup>, 而且重要的问题是归一化本底光谱曲线形状也会变化, 这必然会影响到对红外探测器相对光谱响应曲线测试的准确度。那么这个扫描速度参数是何含

义? 到底应该如何选取? 标准探测器类型又该如何选?

在测试使用的德国Bruker公司vertex70红外傅里叶光谱仪附带的文档<sup>[4]</sup>中未找到描述说明, 网上也搜不到“光谱仪扫描速度”相关信息。咨询光谱仪生产厂家售后服务, 也未得到该参数含义的答案, 只说就用软件缺省参数即可。

### 1 问题分析及结果

#### 1.1 问题的初步分析判断

扫描速度到底指什么? 从红外傅里叶干涉光谱仪的结构看, 有一个运动的扫描动镜, 与扫描速度沾边, 但其扫描周期是秒级的; 另一个是对干涉曲线进行采样的AD变换速度, 即AD变换频率, 其频率范围符合软件中给出的选择范围, 那么扫描速度应该就是指AD变换频率。AD变换频率也就是

单光敏元标准探测器(在光谱仪术语中称为检测器)的工作频率。

从图 1<sup>[4]</sup>扫描速度参数在光谱仪操作软件设置页面中的位置看,紧接着探测器选项;而在图 2<sup>[4]</sup>采样频率设置页面中看到,采样频率影响激光波数、干涉图大小(点数)。在光谱仪操作软件使用手册中

对扫描速度的描述是<sup>[4]</sup>:“最佳的扫描速度与检测器种类和实际实验有关。光声实验可用较低的速度(<10 kHz),10 kHz 用于 DTGS 和光二级管类检测器。对 MCT 或 InSb 检测器可用更高的速度(>10 kHz)”。因此可以佐证扫描速度应该是标准探测器的参数:工作频率。



Figure 93: 测量 - 光学选项

图 1 光谱仪操作软件扫描速度设置页面

Fig.1 Spectrometer operating software scanning speed settings page



Figure 94: 测量 - 采样选项

图 2 光谱仪操作软件采样频率设置页面

Fig.2 Spectrometer operating software sampling frequency settings page

如果扫描速度就是指标准探测器的工作频率,那么应该选什么值?我们再分析一下红外傅里叶光谱仪在红外探测器相对光谱响应曲线测试中获取本底的目的及与测试样本透过率时有何异同。获取本底的目的是为了获得光源通过干涉仪光路后,在探测器处的光谱强度曲线,用于计算透过率或响应率曲线时的除法计算,本底曲线相当于光源发射光谱曲线传函、光路透过率曲线传函(如:光路中的水汽吸收、镜面反射率、透镜透过率等)及标准探测器的光谱响应曲线传函的乘积。在测试样本透过率时,测试样本与获取本底使用的是同样的光源、光路,同一只标准探测器,因此在相除计算透过率时,同时消掉了这3个因子,可以得到正确的透过率。而在红外探测器相对光谱响应曲线测试中,光源是相同的,光路的差异影响很小,可以认为是相同的,而我们采集样本时使用的是被测探测器,采集本底时使用的是TGS标准探测器,即两支探测器的光谱响应曲线是不同的,因此在用除法计算相对光谱响应曲线时无法消除标准探测器的光谱响应曲线因子的影响。因此,从测试原理来讲,我们是要用标准探测器的光谱响应曲线来标定被测探测器的光谱响应曲线,因而标准探测器的光谱响应曲线应该是已知确定的(参见下面(6)式),或者其光谱响应曲线最好是水平的直线(参见下面(7)式),至少在红外光谱频段的光谱响应要大、要平。大,则测试结果的信噪比高;平,则不同光谱频率响应率的测试精度一致。

从TGS标准探测器的工作原理上讲,是热探测器,理论上其光谱响应曲线应该是水平的直线;但TGS探测器工作时的信号响应特性受其热时间常数的影响,当其工作在相应的最佳信号输出频率时,其信号响应幅度(信噪比)、线性度及光谱响应曲线的平直度是综合最佳的。因此我们在选择扫描速度参数时,就选这个最佳频率。红外探测器光谱响应的定义是:对任一频率 $f$ 的单色光,探测器的响应输出信号值与该单色光辐照功率的比值,与辐照时间长短无关,这使我们能在较宽的范围优选扫描速度参数。这个标准探测器的最佳工作频率和光谱响应曲线的最好来源应该是红外傅里叶光谱仪的生产厂家,或者是TGS标准探测器的生产厂家。如果厂家提供困难,我们只好通过变换不同的频率来摸索试验(扫频),最好有一支已知光谱响应曲线(可能不是全波段响应的,如果是全波段响应的,就可以拿它当标准探测器用,或者拿它来标定标准探测器的光谱响应曲线)的对比参考探测器来做扫频试验,

当在某个频率下测得的参考探测器的光谱响应曲线与其已知的光谱响应曲线最接近时,即可认为这个频率就是标准探测器的最佳工作频率,此时只能假设TGS标准探测器的光谱响应曲线足够平直,满足测量精度要求。若仅从不同扫描速度下采集的TGS标准探测器本底光谱信号响应曲线来比较判断,应该选信号响应曲线的峰值响应最大、归一化的相对响应曲线接近于光源归一化的相对光谱发射曲线时的扫描速度设置值。

需要说明的是被测探测器有自己的最佳或设计工作频率,标准探测器有标准探测器的最佳工作频率,因此在测试过程中,本底的采集要用标准探测器的最佳工作频率;样本的采集要用被测探测器的最佳或设计工作频率。

## 1.2 红外傅里叶光谱仪中TGS探测器工作原理、信号响应分析

由于红外傅里叶光谱仪中TGS探测器的工作特点(光热探测器,电信号交流耦合输出):

当探测器工作频率远低于信号响应曲线的峰值响应最大时的工作频率时,探测器工作周期远大于光敏元的热时间常数,在一个工作周期内,可近似为恒定光照强度,光敏元的温度会变化到接近稳定的新平衡温度,而此时探测器输出的电信号响应大小由光敏元的温度变化率起主要作用,因此过长的探测器工作周期其电信号响应反而会减小;另外,当探测器工作在最佳工作频率时,电信号响应最大,且光敏元的温度也会足够接近稳定的新平衡温度,而平衡温度线性地正比于光照强度,因此探测器的电信号响应大且线性度好;探测器工作频率远低于最佳工作频率时,当光敏元的温度进入稳定的新平衡温度区后,探测器输出的电信号响应反而会从最大开始衰减。

当探测器工作频率远高于信号响应曲线的峰值响应最大时的工作频率时,探测器工作周期远小于光敏元的热时间常数,在一个工作周期内,光敏元的温度变化幅度小,不能接近与相应光照强度对应的新平衡温度,而此时探测器输出的电信号响应大小由光敏元的温度变化幅度起主要作用,因此过短的探测器工作周期其电信号响应也会减小。另外,在每一个工作周期的开始时刻,光敏元的初始温度,受其以前的动态光照历史影响,不是某确定的平衡温度,因此探测器的电信号响应小且线性度不好(与采样速率和实际干涉曲线有关)。

从图3与图5看,干涉曲线最大峰值大,解出的本底光谱曲线的最大峰值也大;从图3与图4看

探测器工作频率为375 Hz、300 Hz的光谱曲线,本底光谱曲线的最大峰值下降速度快、幅度大;而归一化本底光谱曲线的形状变化不大。这说明探测器工作频率远低于最佳工作频率时,探测器输出的电信号响应对强、弱信号的衰减一致性好,衰减比例系数很接近。

从图3与图4看探测器工作频率为375 Hz、800 Hz、1600 Hz的光谱曲线,本底光谱曲线的最大峰值正比于探测器工作周期但非线性,而归一化本底光谱曲线的形状变化大、峰值位置右移。这说明探测器工作频率远高于最佳工作频率时,探测器输出的电信号响应对强、弱信号的线性失真大,即对干涉曲线的采样线性失真大。

即使探测器工作在最佳工作频率,超强变化的入射光,是否会造成信号响应饱和或信号响应非线性,有待进一步研究考证。

上述分析结果可以从非制冷热探测器理论推导公式得到解释。参考文献[5]给出了混合铁电热探测器通过调制频率为 $\omega$ 的斩波器调制后的响应率理论推导公式:

$$\mathfrak{R} = \frac{\delta V}{\delta \rho} = \frac{\eta_{\text{abs}}}{C_{\text{th}}} \frac{pA_d}{C_d + C_L} \frac{\omega \tau_e}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_e^2}} \frac{\tau_{\text{th}}}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_{\text{th}}^2}} \quad (1)$$

式中:  $\tau_{\text{th}}$  为热时间常数;  $\tau_e$  为电时间常数; 其它都是探测器参数,此处不讨论。当热探测器设计制造完成后,除调制频率 $\omega$ 外,其它参数就都确定了。

另外参考文献[5]对于Johnson噪声的结论是:高频频时为 $1/f$ 噪声,低频时噪声谱线变平。从(1)式可以看出,当 $\omega \rightarrow 0$ 时,  $\mathfrak{R} \downarrow 0$ ;  $\omega \rightarrow \infty$ 时,  $\mathfrak{R} \downarrow 0$ ;当 $\omega = 1/\sqrt{\tau_{\text{th}} \tau_e}$ 时,  $\mathfrak{R}$ 最大。这个频率应该对应于探测器的最佳工作频率。高频频时 $\mathfrak{R}$ 与 $\omega$ 成反比,从信噪比的角度看,依然是 $\mathfrak{R}$ 越大越好。

对于无斩波器调制的工作模式,探测器输出信号的产生,依赖于入射光强的变化。探测器工作频率为 $f$ 时,我们可以把它近似看作斩波器调制频率 $\omega = 2\pi f/2$ 来套用(1)式估计响应率 $\mathfrak{R}$ 。

### 1.3 红外傅里叶光谱仪测试原理分析

下面我们忽略傅里叶光谱仪由采集到的干涉曲线通过傅里叶逆变换得到探测器的光谱信号响应曲线 $v_s(f)$ 、 $v_o(f)$ 和 $v_p(f)$ 的原理细节,可以认为探测器采集的信号等价于单色仪的光源,其输出光经过光路照到探测器光敏元上所采集到的光谱信号响应曲线,不会影响最终计算结果。

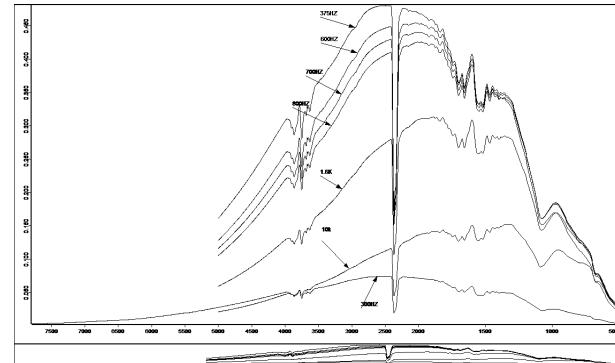


图3 不同扫描速度下采集的本底光谱曲线

Fig. 3 Different scanning speed acquisition background spectral curve

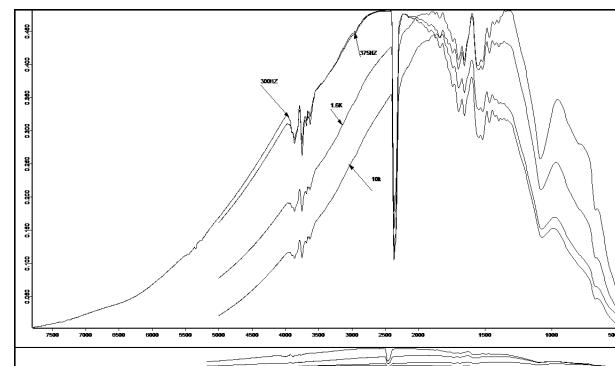


图4 不同扫描速度下采集的归一化本底光谱曲线

Fig. 4 Different scanning speed acquisition normalized background spectral curve

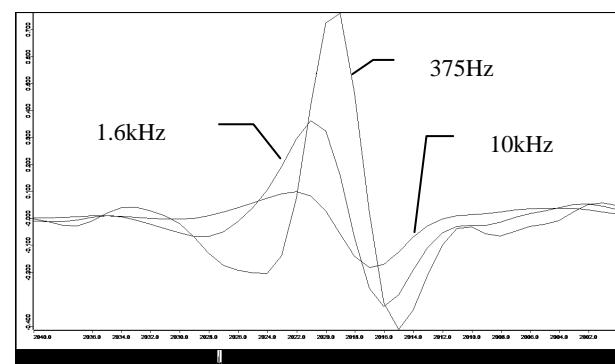


图5 不同扫描速度下采集的本底干涉曲线

(局部, 最大峰值附近)

Fig. 5 Different scanning speed acquisition background interference curves

我们将上面的论述用公式表达如下:

设:  $f$  为光谱频率;  $s(f)$  为光源在光谱仪内干涉仪入射平行光处的光谱强度曲线(功率/单位面积);  $p_i(f)$  为光谱仪内光路的光谱透过率曲线(包括光束汇聚光强修正, 无量纲);  $v_{ps}(f)$  为标准探测器光敏元的单位功率光谱信号电压响应系数曲线, 包含探测

器光敏元面积因素(电压/(功率/单位面积));

则内光路中标准探测器输出的信号电压响应曲线为(读者可对比与文献[6]中公式的异同):

$$v_s(f) = s(f) \cdot p_i(f) \cdot v_{ps}(f) \quad (2)$$

设: $s(f)$ 为光源在干涉仪入射平行光处的光谱强度曲线,与前面的 $s(f)$ 相同; $p_e(f)$ 为光谱仪外光路的光谱透过率曲线(包括光束汇聚光强修正,无量纲); $v_{po}(f)$ 为被测探测器光敏元的单位功率光谱信号电压响应系数曲线,包含探测器光敏元面积因素(电压/(功率/单位面积)); $p_s(f)$ 为样本光谱透过率曲线(无量纲)。

则外光路中被测探测器输出的信号电压响应曲线为:

$$v_o(f) = s(f) \cdot p_e(f) \cdot v_{po}(f) \quad (3)$$

(2)、(3)两式左端为测量值,两式左右相除:

$$\begin{aligned} v_o(f) / v_s(f) &= s(f) \cdot p_e(f) \cdot v_{po}(f) / (s(f) \cdot p_i(f) \cdot v_{ps}(f)) \\ &= p_e(f) \cdot v_{po}(f) / (p_i(f) \cdot v_{ps}(f)) \end{aligned} \quad (4)$$

若内外光路的光谱透过率曲线比值为常数 $k = p_e(f)/p_i(f)$ ,或者差异很小可以忽略: $k=1$ ,即 $p_i(f) \approx p_e(f)$ ,或者内外光路的光谱透过率曲线与频率 $f$ 无关为常数, $k=p_e/p_i$ ,则:

$$v_o(f) / v_s(f) = k \cdot v_{po}(f) / v_{ps}(f) \quad (5)$$

有: $v_{po}(f) = v_{ps}(f) \cdot (v_o(f) / v_s(f)) / k$  (6)

(6)式除以最大值,可得到归一化的相对光谱响应曲线。

当 $v_{ps}(f)=v_{psc}$ 是常数时(即:标准探测器的光谱响应曲线足够平直)有:

$$v_{po}(f) = v_{psc} \cdot (v_o(f) / v_s(f)) / k \quad (7)$$

则(7)式的最大值归一化曲线,等于 $(v_o(f) / v_s(f))$ 的最大值归一化曲线,即我们不必知道 $k$ 、 $v_{psc}$ 的具体值。(6)式或(7)式的最大值归一化曲线就是被测探测器的相对光谱响应曲线。

对于样本光谱透过率曲线 $p_s(f)$ 测试而言,有样本时的测量信号电压曲线为:

$$v_p(f) = s(f) \cdot p_i(f) \cdot p_s(f) \cdot v_{ps}(f) \quad (8)$$

(2)、(8)两式左右相除:

$$\begin{aligned} v_p(f) / v_s(f) &= s(f) \cdot p_i(f) \cdot p_s(f) \cdot v_{ps}(f) / (s(f) \cdot p_i(f) \cdot v_{ps}(f)) \\ &= p_s(f) \end{aligned} \quad (9)$$

(9)式就是样本光谱透过率曲线。

## 2 总结

通过上述分析,得到了红外傅里叶光谱仪用于红外探测器相对光谱响应曲线测试时需要注意的几个关键技术问题,并给出了简化问题的条件。标准探测器首选光谱响应曲线平直的TGS热探测器;相应的光谱响应曲线、最佳扫描速度值及光源的光谱曲线要从光谱仪或探测器的生产厂家获取,或者从厂家确认就是软件缺省设置值,未果,只好认为其光谱信号响应曲线足够平直,通过扫频试验比较,选取最佳扫描速度值。通过本底光谱曲线峰值最大化(参考对比文献[7]的频率响应最大)来确定标准探测器的最佳扫描速度值,对于单光源的傅里叶光谱仪(参考对比双温黑体标定方法<sup>[8-9]</sup>)来说是有相当可信度的简单办法。标准探测器工作在非最佳扫描速度值时,对样品透过率的测试精度的影响,有待进一步研究验证。

上述分析结果,希望得到相关专家的指正,以利于改进测试方法,获得更准确的测试结果。

## 参考文献:

- [1] 赵建忠, 刘建伟, 李进武, 等. GB/T 13584-2011 红外探测器参数测试方法[S]. 北京: 2012: 1-28.
- [2] 张佩. 量子阱红外探测器光谱响应测试系统研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2011.
- [3] 彭晶, 孟超. 傅里叶光谱仪扫描速度对测试的影响[J]. 光谱实验室, 2009, 26(6): 1504-1507.
- [4] 德国 Bruker 公司. vertex70 红外傅里叶光谱仪中文说明书: 技术说明书, 使用说明书[M]. 2006.
- [5] Robert Willardson, Eicke Weber, David Skatrud. *Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems*[M]. 1997.
- [6] 范纪红, 侯西旗, 杨照金, 等. 红外探测器光谱响应度测试技术研究[J]. 应用光学, 2006, 27(5): 460-462.
- [7] 秦玉伟. 一种红外探测器的光谱响应研究[J]. 渭南师范学院学报, 2012, 27(2): 52-54.
- [8] 冯明春, 徐亮, 高闽光, 等. 傅里叶变换红外光谱辐射定标方法的研究[J]. 红外技术, 2012, 34(6): 366-370.
- [9] 占春连, 李燕梅, 刘建平, 等. 红外探测器光谱响应度的均匀性及直线性测试研究[J]. 应用光学, 2004, 25(6): 34-37.