

红外探测器光谱响应自动测量

林 林、牟燮润、孙健邦、吴冰洁

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——本文主要阐述红外探测器光谱响应自动测量的方法，扼要地介绍了测试系统及其性能、测量原理和系统设计。测量结果表明，这套系统能消除光源和环境变化的影响，提高测量的精度和速度。

一、引 言

红外探测器光谱响应是红外探测器的主要特性之一，它描述了探测器响应率与波长的关系。探测器的响应率随波长变化的曲线是系统设计的主要依据之一。

过去，红外探测器相对光谱响应的测量一般在单色仪上进行，采用逐点测量的方法。红外光源经过调制后，进入单色仪分光，得到调制的单色光，先用无选择性的热探测器，例如真空热电偶，热释电探测器等进行接收，得到一组随波长变化的电输出数据，再由被测探测器进行接收，同样得到一组数据，将这两组数据一一对应进行比较，就可计算出一组被测探测器的光谱响应数据。这种方法比较繁琐，不但花费的时间较多，而且由于两组数据不是同时测量，光源的不稳定性，测量设备的不稳定性和测量过程中环境的变化等都会给测量带来较大的误差。

为了方便、准确而又迅速地得到红外探测器光谱响应曲线，我们改进了测量方法，即采用实时比较测量方法，把单色仪出射狭缝出来的光，用光学系统分成两束，一束光由热探测器接收，另一束光由被测探测器接收，把这两个探测器同时接收到的信号进行比较，经过比率计处理就能直接自动记录下红外探测器的等功率光谱响应曲线。实验结果表明，这样记录下来的等功率光谱响应曲线能消除光源的不稳定性和环境变化的影响。提高测量精度和速度。

二、测量的基本原理

在调制单色光源的作用下，参考探测器输出的电动势 $V_{\text{ref}}(\lambda)$ 与光源的光谱功率分布 $\phi(\lambda)$ 、单色仪的仪器函数 $N(\lambda)$ 、单色仪的透射比 $\tau(\lambda)$ ，以及参考探测器本身的光谱响应 $G_{\text{ref}}(\lambda)$ 成正比，即：

本文 1981 年 11 月 19 日收到。

$$V_{sth}(\lambda) \propto \phi(\lambda) N(\lambda) \tau(\lambda) G_{th}(\lambda), \quad (1)$$

在同样的条件下, 被测探测器输出的电动势 $V_s(\lambda)$ 类似地为:

$$V_s(\lambda) \propto \phi(\lambda) N(\lambda) \tau(\lambda) G(\lambda), \quad (2)$$

其中 $G(\lambda)$ 为被测探测器本身的光谱响应。

比较上述两式并整理后得:

$$G(\lambda) = \frac{G_{th}(\lambda) V_s(\lambda)}{V_{sth}(\lambda)}. \quad (3)$$

如果 $G_{th}(\lambda)$ 是与波长无关的常数, 则只要测量出 $V_s(\lambda)/V_{sth}(\lambda)$, 就可得出探测器的相对光谱响应, 我们研制的装置就是根据这样的原理做成的(对于 $G_{th}(\lambda)$ 的修正问题, 本文暂不作讨论)。测量装置原理见图 1。

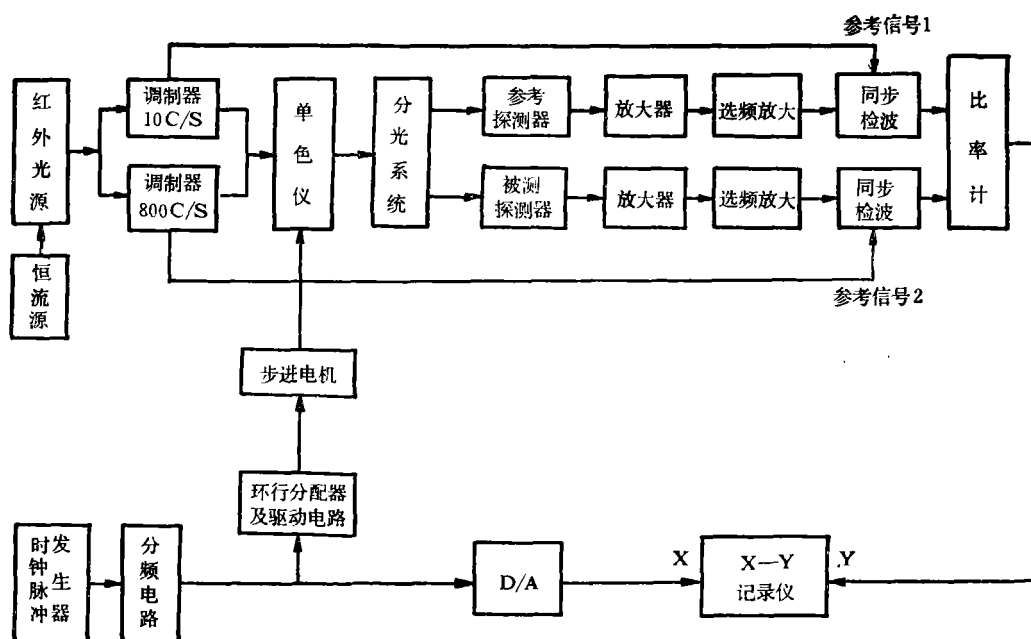


图1 自动测量装置原理图

红外光源聚焦后分成上下两路, 分别调制成两种不同的频率, 经过单色仪分光, 得到两种调制频率的单色光束, 再将不同调制频率的光束分成两路, 分别被参考探测器和被测探测器接收。经过放大, 相敏检波后, 将两个探测器同时接收到的能量信号在比率计上相除, 并且将单色仪棱镜转动和绘图仪的 X 笔同步, 就可以连续画出被测探测器相对光谱响应曲线。

三、系统设计

仪器由光学系统, 信号处理系统, 波长扫描系统和绘图仪等几部分组成。

1. 光学系统

光学系统包括光源, 调制器, 单色仪和分光系统, 如图 2 所示。

我们用能斯特灯源作为红外光源, 它在较宽波段上均有辐射。光源的工作电流由稳流源提供, 光源的工作电流连续可调, 一般工作在 0.6 A。

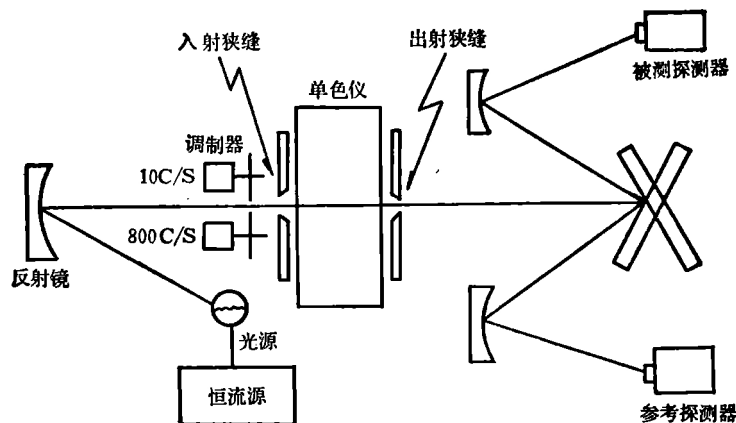


图2 光学系统原理图

能斯特光源经反射镜聚焦以后,光束落在单色仪的入射狭缝上,形状是狭长的。机械调制装置放置在光源和单色仪入射狭缝之间,在光束上下各取一半进行调制。每个调制盘的两边都分别装有一个小灯泡和硅光电二极管,调制盘转动时,同时调制小灯泡的光,使硅光二极管接收到调制盘的同步信号,用来作为相敏检波的参考信号,以便得到较大的信噪比。调制频率取决于探测器,如果参考探测器采用TGS热释电器件,被测探测器为光电型探测器,则根据这两类器件的特点,调制频率分别取为10C/S和800C/S。

单色仪采用Carl Zeiss SPM-2型单色仪。根据被测探测器光谱响应的要求,采用相应的棱镜进行分光,波长扫描由步进电机带动。

从单色仪出射狭缝出来的10C/S和800C/S上下两束调制的单色光,分别落在交叉成 45° 的上下两块平面镜上,由两块平面镜分别反射到对应的两块凹面镜上,聚焦在参考探测器和被测探测器的响应元上。这样,两个探测器同时接收到同一个光源的信号,如果两个光路上反射镜的反射特性基本一致,则两个光路上光束的单色性是一致的,而其能量大小之比在整个测量的光谱范围内是不变的。所有的光学元件和探测器都安装在三轴可调的微调架上,便于测量时精确地调整其位置。

2. 信号处理系统

信号处理系统包括信号接收电路和比率计两个部分。

参考探测器和被测探测器采用两个相应的不同的前置放大器进行弱信号检测,经两路主放大器和R-O选频放大器,分别进行放大和选频。选频放大器的中心频率与相应的调制频率一致,放大器具有较宽的动态范围,对整个光谱波段上接收到的能量信号,放大器具有固定的增益。为了提高电路检测信号的能力,采用了鉴相器原理,分别对信号进行了相敏检波,将探测器接收到的交流信号转变为直流信号,供比率计作信号处理。相敏检波的参考信号由调制盘上的硅光二极管输出,为了调整参考信号和接收信号之间的相位关系,电路中设计了可调移相电路,分别对两路参考信号进行相位调整。整个电路的时间常数主要取决于相敏检波的积分时间 τ ,为取得较好的相敏检波效果,积分时间选为2.5秒,两路的时间常数相等。

比率计是这台仪器的关键。为了使电路结构简单,采用模拟除法器来实现比率的要求。利用对数电路原理组成除法器电路,其数学表达式如下:

$$V_o = \text{Antilog}(\log x - \log y) = x/y. \quad (4)$$

在模拟除法器电路中,用四只运算放大器组成对数和反对数电路,只要在四个反馈晶体管相互匹配的条件下,运算精度和温度稳定性都是比较理想的,在输出范围内的运算精度在2%之内。

从相敏检波出来的两路信号同时送到比率计的输入端,被测探测器的信号作为分子,参考探测器的信号作为分母,在分子或分母发生变化时,比率计能正确地测量出瞬时比值。将比率计输出的比值信号加到记录仪的Y笔上,就可以记录下相对光谱响应的曲线。当光源或其他因素引起分子分母同时按比例变化时,比率计输出不变。这就可能消除光源变化、环境温度和空气组份变化引起的误差。

3. 波长扫描系统

波长扫描系统包括步进电机,驱动电路, D/A 转换电路和记录笔限位等继电器联动电路。

单色仪波长扫描由步进电机带动,我们将步进电机直接和单色仪上的波长调节手轮相连。电机的步距为 1.5° ,单色仪中心波长从 $0.6\mu\text{m}\sim 15\mu\text{m}$ 变化,电机需转动约3600步。对于NaCl棱镜,色散较小的是在 $2\mu\text{m}\sim 3\mu\text{m}$ 之间,每隔 $0.1\mu\text{m}$,步进电机转动8~9步,因此步进电机的步距能满足波长的精度 $0.1\mu\text{m}$ 的要求。

电机的转速是这样考虑的,设信号处理电路的时间常数为 τ ,当电机转动速度足够慢时,就能保证在电路时间常数几倍的时间内充分记录每一波长相应的比率计输出。为了有效地提高测试速度,我们确定每一波长所需测试时间为 3τ ,如果隔 $0.1\mu\text{m}$ 测一个点,则在色散最小区域,波长扫描 $0.1\mu\text{m}$ 时,步进电机转动 N 步所需的时间为 3τ ,则步进电机的频率为 $N/3\tau$ 。

根据不同探测器对测试波长精度的不同要求,可选取不同的记录速度,我们目前选取的电机时钟频率分别为1Hz,2Hz,4Hz三种,由时钟脉冲进行分频后供给,从 $0.6\mu\text{m}\sim 15\mu\text{m}$ 记录时间分别为15min,30min,60min。从 $2\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$ 记录时间分别为11min,21min,42min等。

为了使系统简单、可靠,避免由于时钟频率不稳带来的误差,采用同一时钟为基准,同步带动棱镜转动和记录仪X笔同步工作。时钟脉冲进行分频后分为两路,一路通过环形分配器和功率放大电路驱动步进电机旋转;另一路输入数模转换电路,把时钟脉冲转换为记录仪上X笔的直流信号。这是一个高阶数、长时间的阶梯积分电路,积分时间长达几十分钟,阶数高达3600阶以上,每阶不到1mV。因此,加在X笔上的是随时间变化按比例上升的直流电压,其线性度优于1%。

由于棱镜色散的非线性,记录纸的光谱刻度必须专门对应棱镜的色散刻度进行标定,这样记录的光谱误差小于 $0.1\mu\text{m}$ 。如果X笔不加电压,也可以让记录纸移动,采取人工打点的方法来标定波长座标。

四、测量结果

我们对几种不同类型的光电探测器进行了多次测量,测量的结果表明,该系统能够有效地对探测器的光谱响应进行测试。

1. 改变光源的工作电流(分别调在 0.6 A 和 0.9 A)进行测量, 被测探测器的相对光谱响应基本一致, 见图 3。我们又在不同时间测试了两个能斯特灯的分谱辐射曲线, 这两根曲线是不重合的, 见图 4。但对同一探测器进行相应的两次测试, 响应曲线是比较接近的, 见图 5。这说明该系统对于消除测量过程中光源变化的影响是有效果的。

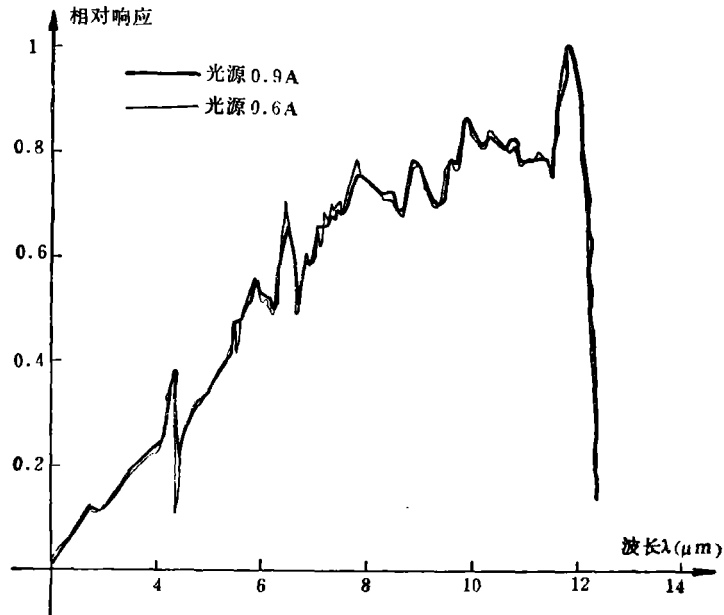


图 3 光源在不同工作电流时, HgCdTe 探测器的光谱响应曲线

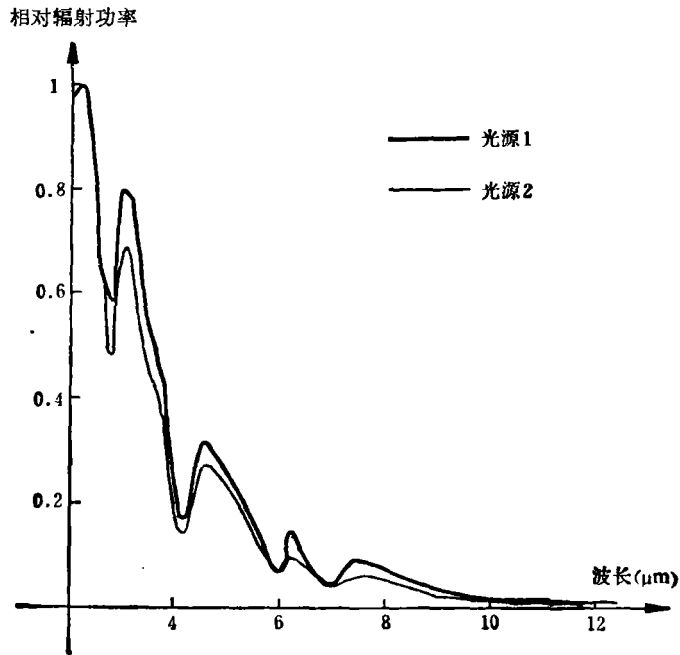


图 4 两个不同光源的辐射曲线

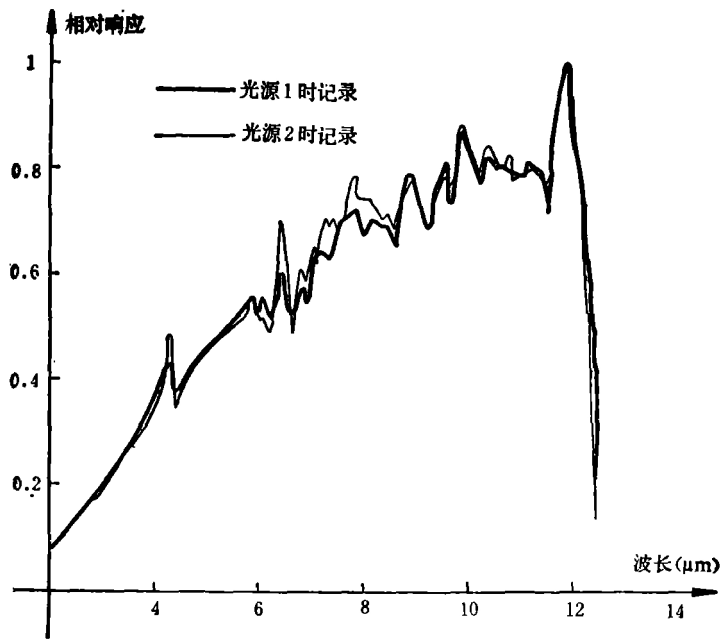


图5 不同光源条件下记录的 HgCdTe 光谱响应曲线

2. 将自动测量所得的曲线与同一探测器逐点测量后计算作出的光谱响应曲线相比, 峰值波长与截止波长基本相符, 曲线形状基本相同, 见图 6(a) 和 (b), 而测试速度要快十几倍。

3. 根据被测探测器和参考探测器的性能特点选择几个不同的波段, 在一定范围内改变单色仪狭缝宽度, 比率计输出的数据基本一致, 说明狭缝改变时, 虽然引起能量变化, 但由于两路信号实时比较, 分子和分母如以同样比例改变, 其结果不变。如表 1 所示。

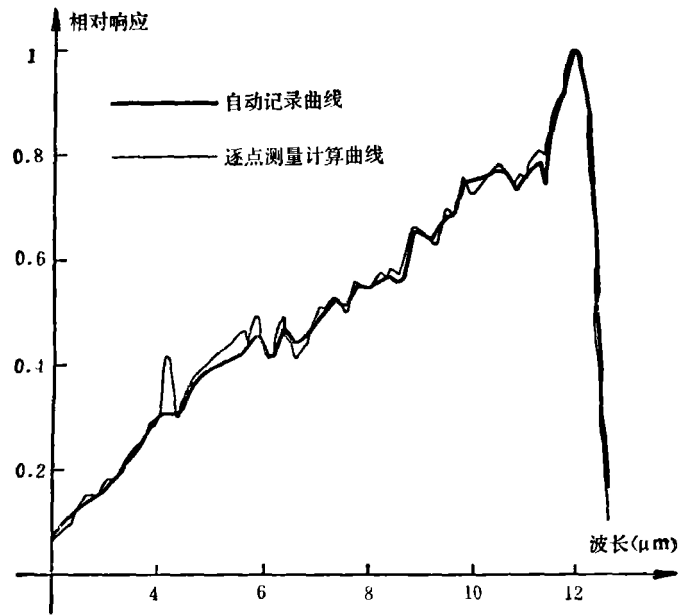
表 1 狭缝改变时的比率计输出

| 输出 狭缝宽 波长 | 0.5 mm | 0.4 mm | 0.3 mm | 0.2 mm |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| 5 μm | 0.67 V | 0.67 V | 0.67 V | 0.67 V |
| 10 μm | 1.5 V | 1.5 V | 1.5 V | 1.3 V |

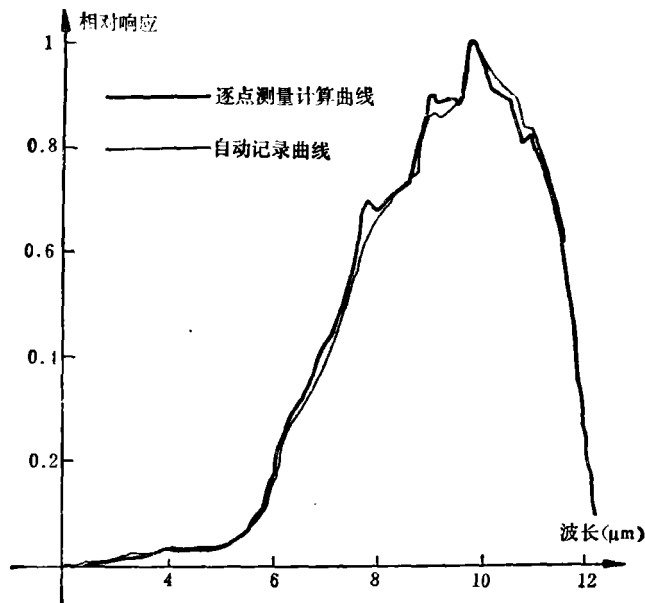
五、测量误差分析

1. 环境影响

由于所测探测器的响应波段一般在 $2\mu\text{m} \sim 15\mu\text{m}$ 之间, 因此周围温度的变化和大气成份的变化都会给测量带来误差。对于单色仪前一段光路上的变化, 经两路比较可以消除, 但在单色仪以后的单光路上, 不对称因素就会给测量带来误差。



(a) HgCdTe 的光谱响应



(b) PbSnTe 的光谱响应

图6 自动记录和逐点测量后计算的光谱响应曲线

2. 测量中能量大小的影响

为了保证放大器在光源能量最大时不至于饱和,就必须将入射能量调至适当值,这样在长波范围能量相应减少,以至信噪比降低,给长波的测量带来误差。可在测量过程中采用衰减器,但自动衰减会使仪器电路复杂化,因此可以通过自动改变狭缝宽度来增加长波范围内输入能量,以保证测量的准确性。但狭缝宽度变化的选择范围,必须考虑到出射的光束具有较好的单色性,不能影响测量的光谱精度。

3. 光谱误差

由于单色仪本身在整个波段的色散是非线性的,在色散率小的波段单色性较差,光谱误差比较大,这与狭缝的大小有密切的关系。狭缝增大也会引起单色性变差,如NaCl棱镜 $0.6\mu\text{m}\sim 15\mu\text{m}$ 中,长波部分色散率较大,如使狭缝宽度适当增大,可以提高输入能量,但短波部分的光谱误差就会比较大。例如在 $3\mu\text{m}$ 附近,线色散 $\Delta\lambda/\Delta l$ 约为 $0.308\mu\text{m}/\text{mm}$,而在 $12\mu\text{m}$ 附近 $\Delta\lambda/\Delta l$ 约为 $0.089\mu\text{m}/\text{mm}$,因此当狭缝调节在 0.5mm 时, $3\mu\text{m}$ 附近的光谱误差就要大于 $0.15\mu\text{m}$ 。为了保证光谱的测量精度,必须根据不同的探测器,正确选择狭缝宽度,使所关心的波长(如峰值波长和截止波长)附近具有较好的单色性,以满足光谱精度的要求。

在测量中,对测量速度的选择也影响光谱的精度,如速度太快,每点测量时间小于电路的时间常数,就不可能记录下正确的结果。因此必须根据不同棱镜不同的色散情况来正确选取电机转动的速度。

此外,探测器位置调整若有偏差,也会产生光谱特性的误差。

致谢——本工作得到徐世秋同志的有益指导,谨表示感谢。

参 考 文 献

- [1] G. Eppeldaner, *Appl. Opt.*, **16** (1977), 1, 255.
- [2] "Procedures for testing infrared detectors and for describing their performance", **AD 15759**(1960).
- [3] B. K. 威拉德森, A. C. 比尔, 红外探测器, 激光与红外编辑组译, 国防工业出版社, 1970.
- [4] 薛君放, 李在清等, 光辐射测量原理和方法, 计量出版社, 1981.

AUTOMATIC MEASUREMENT OF SPECTRAL RESPONSE OF INFRARED DETECTORS

LIN LIN, MU XIERUN, SUN JIANBANG, WU BINJIE
(*Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

The method of automatic measurement of the spectral response of infrared detectors is discussed. A special system has been built and its performances tested. The principle of the measurement and the design of the system are presented. The results show that a number of problems generally encountered in such measurements can be eliminated.