

# 直接测定光电探测器短波光谱灵敏度的误差表达式

李 祚 泳

(成都气象学院探测技术系)

测量光电探测器(包括光电池、光电倍增管等,以下简称探测器)的光谱灵敏度时,一般借助于无选择性的探测器——辐射热电偶,使用一个发射连续光谱的光源,一个会聚透镜和一个单色仪进行比较测量,根据公式<sup>[1]</sup>

$$S_x(\lambda) = k S_s(\lambda) \frac{i_x(\lambda)}{i_s(\lambda)}, \quad (1)$$

计算出待测探测器对各波长的相对光谱灵敏度  $S_x(\lambda)$ 。式(1)中  $k$  为比例常数,  $i_x(\lambda)$ 、 $i_s(\lambda)$  分别是待测探测器和辐射热电偶在波长为  $\lambda$  时产生的光电流响应。然而,由于辐射热电偶对所有波长并不都是无选择性的,特别是对较短的波长,其光谱灵敏度并不是一个常数。因此,在精密测试中,还需要事先知道标准光源的光谱能量分布  $P(\lambda)$  和单色仪的光谱透过率  $\tau(\lambda)$ , 这样可直接测定各种探测器(包括辐射热电偶)的光谱灵敏度。使用的公式是<sup>[1]</sup>:

$$S_x(\lambda) = K \frac{i(\lambda)}{P_s(\lambda)\tau(\lambda)}, \quad (2)$$

式中  $i(\lambda)$  为探测器上产生的光电流响应,  $P_s(\lambda)$  为标准光源的光谱能量分布,  $\tau(\lambda)$  为单色仪的光谱透过率,  $K$  为比例常数。因为  $P_s(\lambda)$ 、 $\tau(\lambda)$  都是已知的,  $i(\lambda)$  是测量值,故由式(2)可算出待测探测器的光谱灵敏度  $S_x(\lambda)$ 。

实际上,单色仪不可能出射真正的单一波长的光,严格说来,探测器的光谱灵敏度应是指在波段  $\Delta\lambda(\lambda_1 \sim \lambda_2)$  范围内的光谱灵敏度。另外,探测器在其工作波段内,对辐射能量的响应也是随波长而变化的,所以通过单色仪的光在探测器上产生的光电流响应表示式应为:

$$i_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K P_s(\lambda) \tau(\lambda) S(\lambda) d(\lambda)。 \quad (3)$$

本文用“等效”光谱灵敏度和“极限”有效波长概念,分析光源光谱能量分布的微小变化(表现为光源温度的变化)引起的直接测定探测器短波光谱灵敏度的误差。

## 一、误差表达式

如果用黑体作标准光源,则光源的光谱能量分布为普朗克函数,即  $P_s(\lambda) = N(\lambda, T)$ 。显

然,光源的光谱能量分布变化可以用光源的温度变化来表示。因此,要估算光源光谱能量分布变化对探测器光谱灵敏度误差的影响,只要确定探测器的灵敏度和光源温度之间的关系即可。当光源为黑体时,根据式(3),有

$$\dot{i}_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K P_s(\lambda) \tau(\lambda) S(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K N(\lambda, T) \tau(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

令  $S_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)}$  为探测器在波段  $\Delta\lambda$  的“等效”光谱灵敏度,

$$S_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)} = \frac{K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) N(\lambda, T) \tau(\lambda) d\lambda}{K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N(\lambda, T) \tau(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) N(\lambda, T) \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N(\lambda, T) \tau(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

则探测器的光电流响应为

$$\dot{i}_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)} = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N(\lambda, T) \tau(\lambda) S(\lambda) d\lambda = K S_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N(\lambda, T) \tau(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

显然,  $\dot{i}_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)}$  应该和标准光源温度为  $T_0$ 、探测器在  $[\lambda_1, \lambda_2]$  区间的最大灵敏度为  $S_0$  时的响应  $\dot{i}_0$  相等,即

$$\dot{i}_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)} = K S_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N(\lambda, T) \tau(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0 K N(\lambda, T_0) \tau(\lambda) d\lambda = \dot{i}_0$$

所以

$$S_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)} = \frac{S_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N(\lambda, T_0) \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N(\lambda, T) \tau(\lambda) d\lambda} \quad (7)$$

对于较短波长,光源的光谱能量分布为:

$$N(\lambda, T_0) = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T_0}},$$

$$N(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}.$$

因而式(7)中等号右边可以写成在温度  $T_0$  至  $T$  之间的平均有效波长的辐射功率之比:

$$S_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)} = S_0 e^{\frac{C_2}{\lambda_e(T_0 \sim T)}} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (8)$$

当光谱能量分布变化很小时,温度变化范围  $\Delta T = T - T_0$  亦很小,平均有效波长  $\lambda_e(T \sim T_0)$  可以用辐射源温度为  $T_0$  时的极限有效波长  $\lambda_e(T_0)$  近似代替。对于一个具有确定灵敏度  $S(\lambda)$  的探测器,辐射源温度趋于  $T_0$  时的极限有效波长  $\lambda_e(T_0)$  是已知的,可定义为<sup>[2]</sup>

$$\lambda_e(T_0) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N(\lambda, T_0) \tau(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N(\lambda, T_0) \frac{1}{\lambda} \tau(\lambda) S(\lambda) d\lambda} \quad (9)$$

故式(8)可近似为

$$S_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)} \doteq S_0 e^{\frac{C_2}{\lambda_e(T_0)}} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (10)$$

式(10)两边取对数,得

$$\ln S_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)} = \frac{C_2}{\lambda_e(T_0)} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) + \ln S_0 \quad (11)$$

式(11)两边取微商,得

$$\frac{\Delta S_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)}}{S_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)}} = -\frac{C_2}{\lambda_e(T_0)} \cdot \frac{\Delta T}{T^2} \quad (12)$$

从式(12)可知,由于光源温度  $T$  的相对变化  $\frac{\Delta T}{T}$  而引起的探测器灵敏度的测量误差  $\frac{\Delta S_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)}}{S_{(\lambda_1 \sim \lambda_2)}}$ , 与  $\frac{\Delta T}{T}$  成正比, 与光源温度  $T$  以及在温度为  $T_0$  时的极限有效波长  $\lambda_0(T_0)$  成反比。式(12)就是由光源光谱能量分布变化引起的探测器短波光谱灵敏度误差的表达式。

## 二、讨 论

在本文得出的直接测定探测器短波光谱灵敏度的误差表达式(12)中, 没有考虑单色仪透过率  $\tau(\lambda)$  的测定误差, 如果考虑到  $\tau(\lambda)$  的变化, 则由式(9)定义的极限有效波长  $\lambda_0(T_0)$  也要变化。不过, 一般说来, 只要单色仪的出射狭缝开得很小, 从单色仪出射的波段( $\lambda_1 \sim \lambda_2$ ) 就很窄, 使入射到探测器上的光近似于单色光。因此, 在测定探测器的灵敏度时, 只考虑光源光谱能量分布的变化, 而忽略单色仪透过率  $\tau(\lambda)$  的微小变化已足够精确。

另一方面, 在实际测定探测器的灵敏度时, 辐射源温度  $T$  变化不大。因此, 在式(12)中, 只采用一阶偏导数已足够精确, 不会产生大的误差。如果  $\tau(\lambda)$  和  $T$  有较大的变化, 则上述公式应该加以修正。

## 参 考 文 献

- [1] 复旦大学电光源实验室, 电光源原理, 上海科技出版社, 1977, 472~474.
- [2] 姜世昌, 红外研究, 1(1982), 2:135~140.

# THE REPRESENTATION OF ERROR FOR DETERMINATION OF SPECTRAL SENSITIVITY OF PHOTODETECTOR FOR SHORT WAVELENGTH

LI ZUOYONG

(Chengdu Meteorological Institute)

## ABSTRACT

By utilizing the concepts of equivalent spectral sensitivity and limit effective wavelength, this paper describes the representation of measuring errors due to changing of spectral energy distribution of light source, for determination of spectral sensitivity of photodetector to short wavelength.