

光电列阵元件光谱响应的整体测试法

梁 培

(西安应用光学研究所, 长安 710100)

提 要

本文针对列阵元件的特点, 提出了对其光谱响应进行整体测试的方法。实测结果与误差分析计算表明, 整体测试法是一种准确稳定和易行的方法。

关键词: 光谱响应测试, 光电列阵元件。

一、引 言

光谱响应是光电接收器主要的性能之一, 测定光谱响应的方法一直是人们广泛注意的课题。随着光电列阵元件的普遍应用, 准确地对其光谱响应特性进行测试, 无论对研制、生产还是应用都有着重大的意义。现今光电列阵元件光谱响应的测定仍然沿用逐点测试法, 即通过改变单色仪出射光的波长来逐点得到探测器的光谱响应, 有些偏差较大。近年蓬勃出现的列阵元件与单个接收器相比, 不只是数目的增多, 而且出现了质的跃变, 其标志特征是自扫描成象、高速、高灵敏度和高空间分辨率。作者有可能根据其特性而使用整体测试法来一次性、完整地得出所需波段的光谱响应。

二、光电列阵元件光谱响应的整体测试法

光谱响应 R 是波长 λ 的函数:

$$R=f(\lambda), \quad \lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2 \quad (1)$$

其中 λ_1 是起始波长, λ_2 是终止波长。实际工作中总是给定一个波长间隔 $\Delta\lambda$, 当 $\Delta\lambda$ 足够小时可以认为

$$R=f(\lambda), \quad \lambda=\lambda_1+j \cdot \Delta\lambda \quad (2)$$

其中 $j=0, 1, \dots, \frac{\lambda_2-\lambda_1}{\Delta\lambda}$ 。若有 $n+1$ 个光电元件, 并且令 $n=\frac{\lambda_2-\lambda_1}{\Delta\lambda}$, 可使 $\lambda_1-\lambda_2$ 之间等间隔的光波分别打在不同的元件上来获得光谱响应曲线, 只不过此时的 R 不但是波长 λ 的函数, 也与具体的元件有关:

$$R=f(i, \lambda), \quad i=0, 1, \dots, n, \quad \lambda=\lambda_1+i \cdot \Delta\lambda, \quad (3)$$

其中 i 是元件的序号。若进一步认为 $(n+1)$ 个元件个体间的差异可以忽略, 即对 $\lambda_1-\lambda_2$ 中任一确定的波长 λ 都有

$$f(i, \lambda) = \text{常量}, \quad i=0, 1, \dots, n_0 \quad (4)$$

则变量 i 隐去:

$$f(i, \lambda) = f(\lambda) \quad (5)$$

$$\begin{matrix} i=0, 1, \dots, n \\ \lambda=\lambda_1+i \cdot \Delta\lambda \end{matrix}$$

这样, 可用多个性能相同的单个元件接收不同的入射波长来等效单个元接收变化光波的光谱响应, 使得测试工作有可能在时间上由串行改为并行, 一次性地从整体上得到 R 。单个的光电探测器即使尺寸与操作允许, 性能上过大的分散性也会令这种方法难以取得有意义的结果^[1]。多元列阵元件是大规模光电集成的产物, 同一基片上生长出来的象元具有单个器件无法比拟的相似法; 高速自扫描和并行输入, 串行输出的特性更利于使用整体法测试光谱响应。如设 $V(\lambda)$ 为接收器对波长为 λ 单色光的输出, 有

$$V(\lambda) = B(\lambda)\tau(\lambda)R(\lambda) \quad (6)$$

其中 $B(\lambda)$ 为光源的辐亮度, $\tau(\lambda)$ 为系统总的光谱透过率, $R(\lambda)$ 为接收器的光谱响应。从 (6) 式可得

$$R(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{\tau(\lambda)B(\lambda)} \quad (7)$$

为了从整体上测知待测列阵元件的 R , 用光谱仪替代单色仪作色散器。只要选择已知辐亮度的灯作光源, 实测出列阵元件的输出 $V(\lambda)$ 后就可由 (7) 式求得 $R(\lambda)$, $R(\lambda)$ 的集合即为

R 。图 1 是整体测试法的原理框图。光谱仪将已知光源的入射光色散成所需的光谱后投射于待测列阵元件上, 输出的视频信号由微机处理后送给终端。与逐点法相比, 整体法装置简单, 完全摒弃机械扫描部件; 测试环节少, 光谱仪兼起色散与聚焦系统的功能, 用待测列阵元件更集对比与被测接收器于一身。

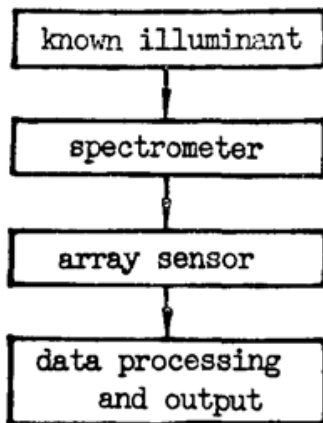


Fig. 1 Schematic of the integrated measuring method

为了能从整体上获取列阵元件在预定波段上的光谱响应, 光谱仪的设计很重要。光栅光谱仪可以满足列阵元件线性排列的光敏元对均匀色散的要求。整体测试法的波长采样间隔由光谱仪和列阵元件共同决定。

设列阵元件的光敏总长度为 L , 则光谱仪的倒数线色散

$$\frac{d\lambda}{dl} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{L} \quad (8)$$

如果列阵元件共有 N 个象元, 则采样间隔 $\Delta\lambda$

$$\Delta\lambda = \frac{d\lambda}{dl} \cdot \frac{L}{N} \quad (9)$$

依照 (8) 式设计光谱仪可以满足给定起止波长区间列阵元件的光谱响应整体测试要求。

通常更关心光电器件的相对光谱响应 $S(\lambda)$, 如以最大响应 $R(\lambda_m)$ 来归化, 有

$$S(\lambda) = R(\lambda)/R(\lambda_m) \quad (10)$$

三、整体测试法的操作与一些结果

整体测试技术借助于数字化与微机技术来实现。整个测试的采样过程是瞬间自动完成

的。

测前用线光谱源调多元器件至合适位置, 然后换用已知光谱辐射源, 如钨带灯进行测试。图 2 为某个列阵器件对钨带灯的视频输出。图 3 为归一化的光谱仪透过率 $\tau(\lambda)$, 光源的光谱辐亮度 $B(\lambda)$ 和乘积 $\tau(\lambda) \cdot B(\lambda)$ 。据 (7) 式和 (10) 式, 微机处理得出 $S(\lambda)$ 。图 4 中给出两个不同型号列阵器件的对照, 实线是仪器所绘器件的实测 $S(\lambda)$, 虚线是厂家所给该型器件的相对光谱响应。图 4(a) 中该器件厂家提供的与实测光谱响应基本符合。图 4(b) 中提供的与测值在 700 nm 以前的可见光区域一致, 而在 800 nm 以后的红外区域二者相差悬殊, 实测值小于给出值。整体测试法的单次偶然性, 即同一元件不同测次之间的区别可以从图 5 看出。图 5 为同一器件不同时间的两次测值, 除了个别地方电气与数字化的微小跳变, 可说是完全吻合的。图 6 是同一型号 3 个器件的响应对比。除了不同测次的误差外, 不同个体间的光谱差异很小, 这也说明了多元列阵元件目前达到的工艺水平。

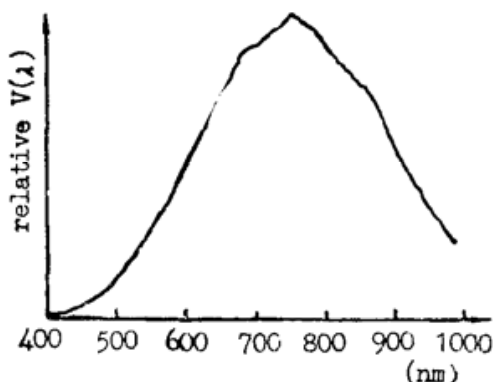


Fig. 2 Video output of a tungsten-tape lamp

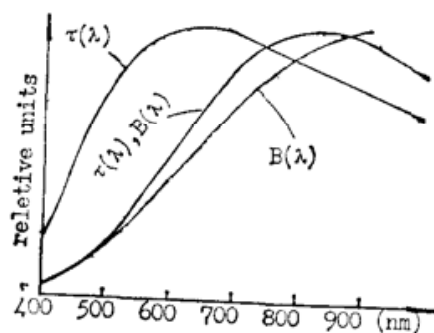


Fig. 3 Normalized $\tau(\lambda)$, $B(\lambda)$ and $\tau(\lambda) \cdot B(\lambda)$

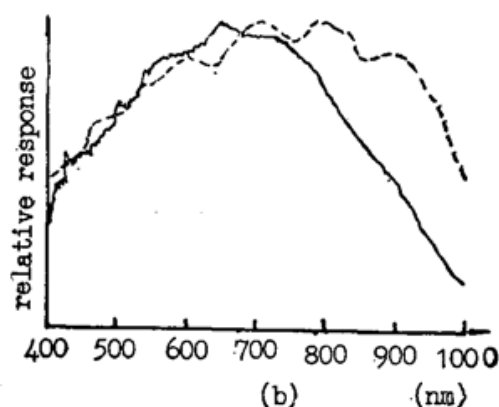
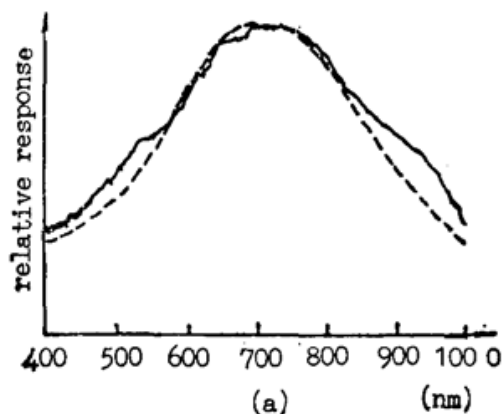


Fig. 4 Spectral responses of two different model devices. The solid line for measured, and the dash line: provided by the manufactory

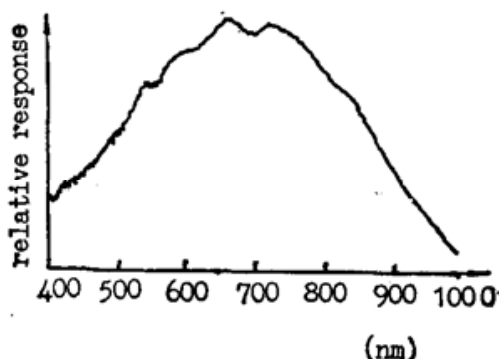


Fig. 5 The two time results with the same device

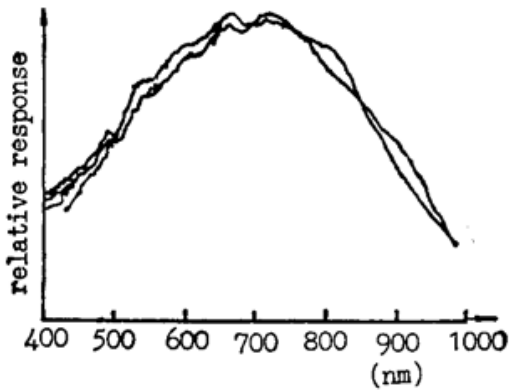


Fig. 6 The comparison among three devices with the same model

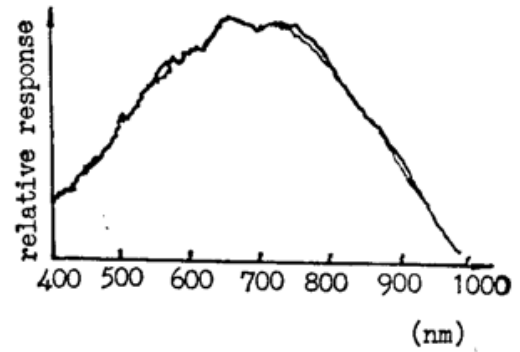


Fig. 7 The spectral response comparison of a sensor between upright and upside down

从图 5 的结果可看出整体测法的离散很小, 除可得出元件整个光谱响应的趋势外, 由于 N 值一般很大, 也可甄别某个小区域光谱响应的细节或用来查验同一型号不同个体间的差异。

四、整体测试法的误差分析与计算

对逐点法进行误差分析是相当困难的^[2]。整体法装置简单, 可在分析误差来源的基础上计算这种测法的相对不确定度。

1. 光源, 主要有标定误差和重现误差。标定误差由鉴定部门给出, 一般在 1%~5% 之间。重现误差涉及保证条件, 如采用多位数字表控制功率在 0.01% 以内, 光源可稳定到 0.1%^[3]。由于瞬间完成采样, 严格的场合可直接用黑体作光源。

2. 光谱仪兼起色散与聚焦的功能。无转动部件、待测元件相对固定减少了误差来源, 降低对环境条件的要求。光栅光谱仪工作区间的透过率差别在一个数量级内, 用动态比不太大的探测器即可测准。波长定位原则上可体现到列阵元件的每一象元上。定位差导致的透过率误差 δ_m 与该处透过率斜率有关:

$$\delta_m = \frac{d\tau}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda \quad (11)$$

3. 列阵元件, (4) 式成立只是理想情况。确定器件的非均匀性可用实验扣除, 简单地可用均匀光照响应修正。如 $V_m(i)$ 为第 i 个象元修正后的输出, 可有

$$V_m(i) = V_t(i) \cdot \bar{V} / V(i), \quad (12)$$

其中 \bar{V} 为输出平均值, $V(i)$ 是 i 象元的输出, $V_t(i)$ 是 i 象元的实测值。转移损失是恒定值, 可以补偿或修正。瞬时测试并扣除本底可以不计暗电流。严格限制器件在线性区工作。

各个环节的误差体现在计算 $R(\lambda)$ 的表达式(7)中。将 $V(\lambda)$ 、 $\tau(\lambda)$ 和 $B(\lambda)$ 的不确定 δ_V 、 δ_τ 和 δ_B 分别求出后按正态合成 $R(\lambda)$ 的不确定度

$$\begin{aligned} \delta_R &= \pm \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial V}\right)^2 \delta_V^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \tau}\right)^2 \delta_\tau^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial B}\right)^2 \delta_B^2} \\ &= \pm \sqrt{\left(\frac{1}{\tau B}\right)^2 \delta_V^2 + \left(\frac{V}{\tau^2 B}\right)^2 \delta_\tau^2 + \left(\frac{V}{\tau B^2}\right)^2 \delta_B^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

随波长的不同, (13) 式中误差传递系数值也不同。从 0.4~1.0 μm , 相对不确定度在 1%~

6% 之间。为验证器件各项误差的影响, 可将器件倒置后与原来测值对比。图 7 的结果中, 除了非均匀性、传递损失以及定位等多种因素, 也含有不同测次、光电稳定和标定误差在内, 与分析计算相吻合。

整体测试法是一种直接溯源的绝对测量方法, 其原理不仅使得测试结果具有高稳定性和重复性, 也保证了测值与真值的偏离主要限于光源标定传递过来的误差数量上。

参 考 文 献

- [1] W. Budde; *«Optical Radiation Measurement»*, (Academic Press, INC. New York, 1983), Vol. 4, 242.
- [2] W. Budde, G. X. Dodd; *Appl. Opt.*, 1971, 10, No. 12 (Dec), 2607.
- [3] [美] A. 斯廷森著, 刁永言等译; *«工程光度学与辐射度学»*, (科学出版社, 北京, 1987), 286.

The integrated method for measuring the spectral response of photoelectric array sensor

LIANG PEI

(Xi'an Institute of Optics, Chang'an Shanxi 710100)

(Received 4 February 1991; revised 20 June 1991)

Abstrace

In this paper, a whole-testing method is proposed for the spectral responsivity measurement of array device in accordance with its special features. The experimental results and error analysis have shown that the whole tasting could have high accuracy repeatability and easier to instrument rather than the point-to-point measurements.

Key words: spectral response measure, multicell sensor, single for whole.