

可见光到近红外光谱范围内 微小辐射物理量的测量*

郑 健 生

(厦门大学物理系)

提 要

本文描述硅光电池绝对单色灵敏度的校准方法,并用于测量 $0.4\mu\text{m}$ 到 $1.1\mu\text{m}$ 光谱范围内微小辐射功率、辐照度、辐射强度及发光器件外量子效率等辐射物理量。其灵敏度比热电堆高三个数量级。配合使用积分球装置,对光源的空间不均匀分布辐射功率的测定相当简便,测量范围从 6.3nW 到 310mW 。实验测定了最大光谱光效能 K_m 值,并讨论辐射度学及光度学两种测量系统的准确性问题。最后对发光器件光学参数的测量结果进行校验。

一、引 言

现代的光度学包括对各种各样的光源、辐射场和探测器的测量;不仅涉及传统的光度学量,还涉及有关的辐射度量及光谱成分。经过多年的实践,发现光度学的基本单位——光强度的烛光单位,及其基准本身存在许多缺点和问题。近年来,国际照明委员会做出决定,推荐光通量的流明单位作为光度学的基本单位^[1];并用辐射功率这一辐射度量来定义光度量的流明^[2]。辐射度的测量是一种更准确和直接的定标方法。实际上,激光、可见和红外发光器件等新型光源所涉及的光功率、量子效率参数都属于辐射物理量,有些参数无法从单独的光度量测量结果换算出来。

近年来,已制成一种准确度很高的电校准绝对辐射计,趋向作为建立辐射度量和光度量的标准,但只适用于 $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 以上的辐照度^[3,4]。绝对辐射计无法测量的不太小的辐射物理量,选用校准过的无选择性热电堆,可认为是一种比较理想的探测器。发光器件的光学参数,及其材料的发光机理分析,所要测量的辐射却是很微弱的,热电堆的灵敏度还不够高,使用也不大方便。为了解决这个问题,我们采用灵敏度更高的2CR 83型硅光电池作为辐射接收器,可测量从 $0.4\mu\text{m}$ 到 $1.1\mu\text{m}$ 光谱范围的微小辐射物理量。配合使用积分球装置,实验结果表明,不仅可简便地测量发光器件的总辐射功率和外量子效率,而且系统的灵敏度可达 $6.3\text{nW}/\text{mm}$ 。本文将描述系统的校准和测量方法,并对测量结果进行检验和讨论。

* 1978年12月25日收到。

二、硅光电池绝对单色灵敏度的校准方法

任何光电元件用于测量辐射物理量, 都先要确定其绝对单色灵敏度。最直接的校准是用绝对辐射计, 但是, 校准所用和实际测量的辐射度量相差可达七个数量级, 光电元件的线性关系就显得十分重要。通常使用辐射标准钨带灯校准更方便, 可通过计算接收效率^[5]和标定热电堆两种方法对光电元件进行校准。

按照常规测量方法, 用单色仪和热电堆测出硅光电池的相对灵敏度光谱分布 $S_{r\lambda}$ (每一波长的单色光带宽限制在 $50 \text{ \AA}$ 以下), 如图 1 所示。设绝对单色灵敏度为 S_λ , 则

$$S_\lambda = S_{\lambda_0} S_{r\lambda}, \quad (1)$$

S_{λ_0} 称为接收器光谱灵敏度峰值波长 λ_0 的绝对灵敏度, 或称为绝对关系^[5]。

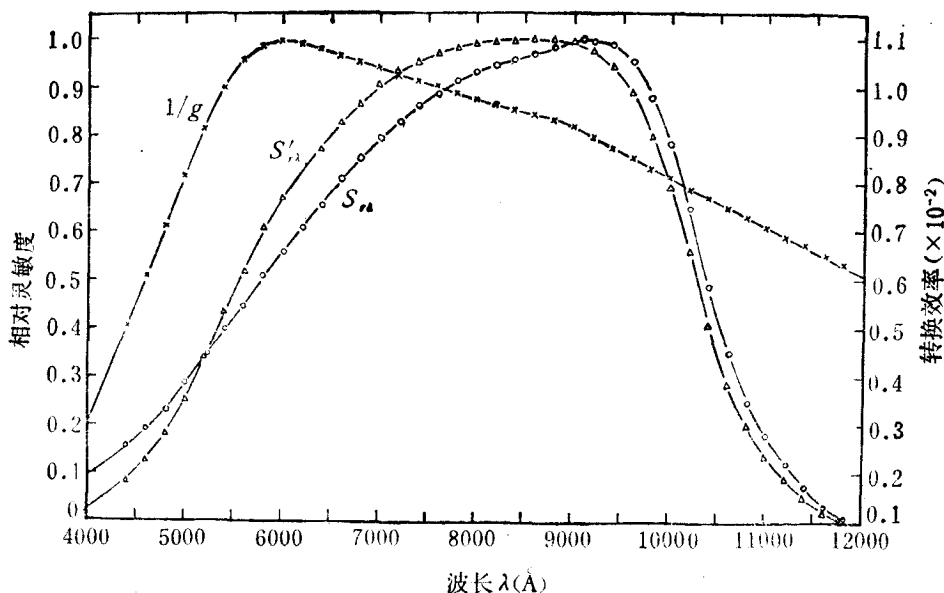


图1 硅光电池相对灵敏度光谱分布 $S_{r\lambda}$, $S'_{r\lambda}$ (配积分球) 及积分球转换效率 $1/g$ 光谱分布

使用标定过的已知光谱辐射亮度 $L_{e\lambda}$ 的辐射标准钨带灯, 其辐射强度为 $I_e (\text{W/sr})$, 改变钨带灯和接收器之间的距离 l , 就可以在相当大的范围内改变辐照度或辐射通量 (辐射功率)。根据光学测量的基本原理, 从钨带灯到达接收器表面的辐照度 (辐射功率密度) E_e 和辐射功率 ϕ_e 为

$$E_e = \frac{I_e}{l^2}, \quad (2)$$

$$\phi_e = I_e \frac{A_0}{l^2}, \quad (3)$$

(3) 式中 A_0 为接收器的有效面积。

总灵敏度 S_g 的定义是: 在一定的波长范围内, 电信号的变化 Δi 与入射到接收器有效面积的辐射度量的变化 $\Delta \phi_e$ 之比。实际上, S_g 是在整个光谱范围内的一个平均值, 可

表示为归一化的乘积积分,即

$$S_g = \frac{\Delta i}{\Delta \phi_e} = \frac{\int_0^\infty L_{e\lambda} S_{\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty L_{e\lambda} d\lambda} = S_{\lambda_0} \frac{\int_0^\infty L_{e\lambda} S_{r\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty L_{e\lambda} d\lambda} = S_{\lambda_0} N, \quad (4)$$

N 称为接收效率,表示接收器所响应的全部辐射度量与光源发射的全部辐射度量之比.由上式得到

$$S_{\lambda_0} = \frac{\Delta i}{N \cdot \Delta \phi_e}. \quad (5)$$

通过测量总灵敏度 S_g 和计算接收效率 N , 可得 S_{λ_0} , 单位为 A/W . 如果测量的总灵敏度 $S_g = \Delta i / \Delta E_e$, 则 S_{λ_0} 的单位为 $A/W \cdot cm^{-2}$.

S_{λ_0} 与辐射标准灯的辐射亮度光谱分布无关. 接收器对辐射度量所响应的电信号, 检测结果具有很好的线性关系, 因而 S_{λ_0} 还与校准用的辐射强度无关. 它反映了光学参数和电学参数之间的唯一的联系.

经中国计量科学研究院标定过的 BW-2000 型辐射标准钨带灯, 工作电流为 19.000A, $I_e = 12.18 W \cdot sr^{-1}$. 计算得到, 接收效率 $N = 30.0\%$; 校准结果, 硅光电池的辐射功率绝对关系 $S_{\lambda_0} = 0.610 A/W$, 辐照度绝对关系 $S_{\lambda_0} = 2.06 A/W \cdot cm^{-2}$.

另一种校准方法, 是用无选择性的热电堆和单色仪直接校准硅光电池的绝对单色灵敏度. 首先要标定热电堆的绝对灵敏度 ($V/W \cdot cm^{-2}$). 把作为基准的辐射标准灯放在离热电堆一定的距离 l 处, 从辐照度 $E_e = I_e / l^2$ 和电位差计测出热电堆的电动势 V , 得到热电堆的绝对灵敏度 $S_t (V/W \cdot cm^{-2})$. 然后选定距离单色仪出射缝某一位置的平面, 造成比硅光电池灵敏面大的均匀辐射场, 在同一位置交替地放热电堆和硅光电池进行测量. 设读数分别为 i_t 和 i_0 , 则硅光电池对应于单色光波长 λ 的绝对单色灵敏度 $S_\lambda (A/W \cdot cm^{-2})$ 为

$$S_\lambda = S_t \frac{i_0}{i_t}. \quad (6)$$

上述两种独立的校准方法, 可以彼此对硅光电池绝对单色灵敏度的校准值进行校验.

对 Hilger 真空补偿型热电堆在 $305 \mu W/cm^2$ 辐照度下进行标定, 电位差计测出电动势为 $131.0 \mu V$, 得到绝对灵敏度 $S_t = 0.430 V/W \cdot cm^{-2}$.

用标定过的热电堆测量微小辐照度, 电动势的读数很小(比标定时的读数小二至三个数量级), 且常常伴有小的连续漂移. 因此, 用电位差计测量很不方便, 甚至是不可能的. 我们改用电流常数已测定的 AC11 型光电放大器, 事先在比较大的辐照度下, 分别用电位差计测量热电堆的电动势, 及光电放大器输入端串接 $1k\Omega$ 电阻来测量热电堆的电流, 得到光电放大器测量迴路的总电阻. 实际用于测量微小辐照度时, 光电放大器输入端不串接 $1k\Omega$ 电阻, 从光电放大器的电流常数及测量迴路的实际总电阻, 可计算出热电堆和光电放大器这一测量系统的电动势常数 (V/mm). 因此, 通过光电放大器测量热电堆的电流, 再换算出热电堆的电动势, 解决了热电堆电动势读数与标定时的读数相比小几个数量级的线性问题. 而且, 电动势小的连续读数漂移, 从检流计光点的移动又便于观察; 并可通

过以一定时间间隔重复测量来补偿。按照上述测量方法,用已标定灵敏度的热电堆校准硅光电池的绝对单色灵敏度,测量结果列于表1。得到 $S_{\lambda_0} = 2.05 \text{ A/W} \cdot \text{cm}^{-2}$, 这一校准值与接收效率方法所得的很一致,相差仅 0.5%。

表1 硅光电池绝对单色灵敏度的校准值

$\lambda (\text{\AA})$	$i_0 (\mu\text{A})$	$i_t (\mu\text{V})$	$S_\lambda (\text{A/W} \cdot \text{cm}^{-2})$	$S_{r\lambda}$	$S_{\lambda_0} (\text{A/W} \cdot \text{cm}^{-2})$
5000	1.65	1.20	0.591	0.287	2.06
5500	3.91	1.88	0.894	0.426	2.10
6000	5.52	2.05	1.16	0.555	2.09
6500	4.36	1.38	1.36	0.680	2.00
7000	5.44	1.46	1.60	0.795	2.01
7500	5.60	1.32	1.82	0.872	2.09
8600	3.09	0.68	1.96	0.968	2.02
9100	5.87	1.23	2.05	1	2.05
平 均					2.05

三、微小辐射物理量的测量

硅光电池的灵敏度光谱分布不是平坦的,必须对测量值进行修正^[6],才能得到与无选择性热电堆一致的准确值。设光源的辐射功率光谱分布为 $\phi_{e\lambda}$, 假定硅光电池的灵敏度光谱分布与热电堆一样平坦,其相对灵敏度 $S_{r\lambda}$ 定为 1 时,准确的测量读数 i_0 应为

$$i_0 = c \int \phi_{e\lambda} d\lambda. \quad (7)$$

设硅光电池的实际测量读数为 i , 对应于光源辐射峰值波长 λ_p 的相对灵敏度 $S_{r\lambda_p}$ 定为 1, 其它波长的相对灵敏度都与 $S_{r\lambda_p}$ 对比进行约化,约化过的相对灵敏度光谱分布为 $S_{r\lambda}$, 即

$$i = c \int \phi_{e\lambda} S_{r\lambda} d\lambda, \quad (8)$$

$$i_0 = i \int \phi_{e\lambda} d\lambda / \int \phi_{e\lambda} S_{r\lambda} d\lambda = i k_s \quad (9)$$

表示硅光电池的实际测量读数 i 乘上选择性修正系数 k_s , 就得到与热电堆一致的准确测量值。

针对几种发光器件的发光峰值波长 λ_p 和光谱半宽 $\Delta\lambda$, 设发光光谱为一定带宽的高斯分布, k_s 计算结果分别为

$$\lambda_p = 5600 \text{ \AA}, \quad \Delta\lambda = 300 \text{ \AA}; \quad k_s = 1.015.$$

$$\lambda_p = 5900 \text{ \AA}, \quad \Delta\lambda = 300 \text{ \AA}; \quad k_s = 1.009.$$

$$\lambda_p = 6600 \text{ \AA}, \quad \Delta\lambda = 200 \text{ \AA}; \quad k_s = 1.001.$$

$$\lambda_p = 6950 \text{ \AA}, \quad \Delta\lambda = 880 \text{ \AA}; \quad k_s = 1.003.$$

$$\lambda_p = 9400 \text{ \AA}, \quad \Delta\lambda = 300 \text{ \AA}; \quad k_s = 1.004.$$

上面 k_s 值很接近于 1 的结果说明,对于发光光谱分布对称性较好的光源,只要准确测定其发光峰值波长 λ_p , 用硅光电池测量辐射物理量,即使不加修正,也与热电堆的结果很相

近.

1. 辐照度 E_e 和辐射强度 I_e 的测量

在相距为 l , 用硅光电池测定光源的辐照度和辐射强度时, 要求 l 至少比接收面的直径 d 大 10 倍以上. 设硅光电池对应于光源辐射峰值波长 λ_p 的绝对灵敏度为 S_{λ_p} ($\text{A/W} \cdot \text{cm}^{-2}$), 测量读数为 i , 选择性修正系数为 k_s , 则辐照度 E_e 为

$$E_e = \frac{i}{S_{\lambda_p}} k_s, \quad (10)$$

那末在该方向上的辐射强度 I_e (W/sr) 应为

$$I_e = E_e l^2 = \frac{l^2}{S_{\lambda_p}} i k_s. \quad (11)$$

硅光电池的 $S_{\lambda_0} = 2.06 \text{ A/W} \cdot \text{cm}^{-2}$, 选用 AC15/3 型光点检流计, 配总电阻为 $5 \text{ k}\Omega$ 的万能分流器检测输出光电流, 实验结果表明, 在六个数量级范围内都可以保持很好的线性关系. 检流计的电流常数为 $1.57 \times 10^{-9} \text{ A/mm}$, 若测量读数为 1 mm , 由此估算最小可测定的辐照度为 0.76 nW/cm^2 . 按 $l/d = 10$ 的要求估算, 最小可测定的辐射强度为 $0.34 \mu\text{W/sr}$.

2. 辐射功率 ϕ_e 的测量

激光的光束发散角很小, 全部辐射能落在硅光电池的接收面上, 直接就可以测定其辐射功率. 按 $S_{\lambda_0} = 0.610 \text{ A/W}$ 计算, 用 AC15/3 光点检流计检测光电流, 测定辐射功率的灵敏度为 2.6 nW/mm .

如果被测光源的光束发散角很大 (如发光器件), 设与发光面的正法线方向成夹角 θ 方向的辐射强度为 $I_e(\theta)$, 且设 $I_e(\theta)$ 在 4π 球空间内是对称的, 总辐射功率 ϕ_e 应为

$$\phi_e = \int I_e(\theta) d\omega = 2\pi \int_0^\pi I_e(\theta) \sin\theta d\theta. \quad (12)$$

上式可应用球带系数法简化成数值积分^[6,7], 显然这是一种较繁琐的测量方法.

采用积分球测定辐射功率是一种相当简便方法. 我们制造一个空腔直径为 10 cm 的

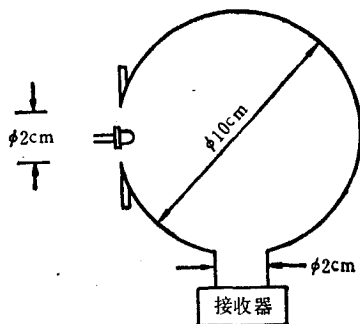


图2 积分球示意图

积分球, 如图 2 所示. 腔壁上喷涂一层白色漫反射性能良好的硫酸钡, 把光源放置于积分球空腔内, 空间不均匀的辐射通过积分球内壁白色漫反射物的多次反射结果, 在内壁上形成各处均匀的辐照度, 从内壁开孔处取出一定份数的辐射功率进行测量. 测量系统事先用已知辐射功率的标准灯进行标定, 通过比较可以算出光源的总辐射功率, 这就是使用积分球测量辐射功率的简单原理.

积分球的转换效率 $1/g$ (g 称为衰减因子) 并不是一个恒定值, 硫酸钡的反射率是随波长变化的, 转换效率也将随着改变. 测量结果如图 1 所示. 因此, 积分球-硅光电池这一测量系统的相对灵敏度光谱分布 S'_{λ} 相应发生变化, 如图 1 所示. 峰值波长 λ_0 由原来的 $9100 \text{ \AA}$ 改变为 8800

Å.

应用上述计算接收效率的方法对测量系统进行校准, 积分球入射孔面积为 A_i , 辐射标准灯与入射孔的距离为 l , 射入积分球内的辐射功率应为

$$\phi_e = I_e \frac{A_i}{l^2}. \quad (13)$$

由于硅光电池短路光电流与辐射度量之间具有很好的线性关系, 光电流读数为 i_0 , 计算接收效率 N , 可定出峰值波长 λ_0 的绝对灵敏度 $S'_{\lambda_0}(\text{A/W})$ 为

$$S'_{\lambda_0} = \frac{i_0}{N\phi_e}. \quad (14)$$

若对应于某一被测光源辐射峰值波长 λ_p 的绝对灵敏度为 S'_{λ_p} , 测量读数为 i , 选择性修正系数为 k , 则被测的总辐射功率为

$$\phi_e = ik_s / S'_{\lambda_p}. \quad (15)$$

计算得到, 接收效率 $N = 30.6\%$, 校准结果, $S'_{\lambda_0} = 5.10 \times 10^{-3} \text{A/W}$ ($\lambda_0 = 8800 \text{\AA}$). 由此计算最小可测量的辐射功率为 $0.31 \mu\text{W}$, 最大可测量到 310mW . 如选用电流常数为 $3.20 \times 10^{-11} \text{A/mm}$ 的 AC11 型光电放大器检测光电流, 则测量系统的灵敏度可达 6.3nW/mm .

3. LED 外量子效率 η_{ext} 的测量

设发光器件工作电流为 J , 外加电压为 V , 其辐射功率为 ϕ_e , 按功率效率 η_ϕ 的定义

$$\eta_\phi = \frac{\phi_e}{JV} = \frac{n_0 h \bar{\nu}}{JV} = \frac{n_0}{n_e} \frac{h \bar{\nu}}{eV} = \eta_{\text{ext}} \frac{h \bar{\nu}}{eV}. \quad (16)$$

上式中, n_0 和 n_e 分别为单位时间内发出的光子数和注入的电子数, $h \bar{\nu}$ 为平均光子能量, 从而得到外量子效率为

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{e}{h \bar{\nu}} \frac{\phi_e}{J}. \quad (17)$$

用光电放大器检测硅光电池的光电流, 配合使用积分球, 对工作电流为 20mA 的绿色 GaP 发光二极管, 最小可测到的 η_{ext} 为 1.4×10^{-7} . 测量红外 GaAs 发光二极管, 工作电流为 20mA 时, 最小可测到 2.4×10^{-7} .

四、辐射度学与光度学方法测量结果的检验

我们曾做过光度量的测量工作^[8], 最近进一步对积分球的转换效率随波长的变化作了测量. 模拟标准人眼的物理受光器¹⁾相对灵敏度光谱分布 B_λ , 由于配用积分球的结果, 相应的改变为 B'_λ . 在绿光、黄光和浅红光波长区域, B'_λ 更接近于视见函数 V_λ ; 而蓝光、深红光波长区域则偏离较大, 结果如图 3 所示. 色修正系数 k 为

$$k = \int \phi_{e\lambda} V_\lambda d\lambda / \int \phi_{e\lambda} B'_\lambda d\lambda. \quad (18)$$

1) 56-A 型硒光电池配 3mm 厚 LB_{16} , 3mm 厚 JB_7 及 4mm 厚 LB_6 滤光片.

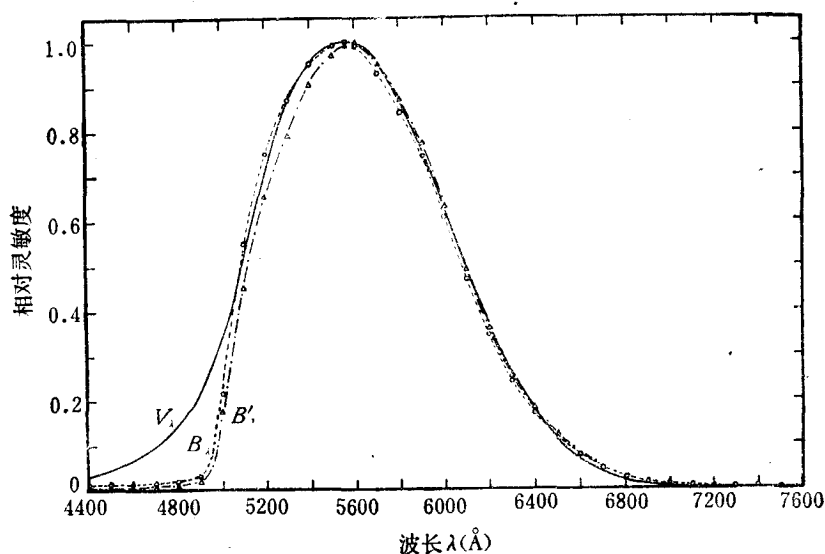


图3 受光器相对灵敏度光谱分布 B_λ , B'_λ (配积分球)与视觉函数 V_λ 的比较

B'_λ 用色温 2356 K, 光强度 2.3cd 的光度标准灯校准, 其色修正系数 $k_B = 1.019$. 对各种类型 LED 的计算结果, k 分别为

$$\lambda_p = 5700 \text{ Å}, \quad \Delta\lambda = 300 \text{ Å}; \quad k = 1.006.$$

$$\lambda_p = 5900 \text{ Å}, \quad \Delta\lambda = 300 \text{ Å}; \quad k = 0.992.$$

$$\lambda_p = 6500 \text{ Å}, \quad \Delta\lambda = 200 \text{ Å}; \quad k = 0.930.$$

$$\lambda_p = 6950 \text{ Å}, \quad \Delta\lambda = 880 \text{ Å}; \quad k = 0.767.$$

校准硒受光器 B_λ , 得到照度常数 $E_B = 386 \text{ cd/A} \cdot \text{cm}^2$; 通过积分球校准 B'_λ , 得到光通量常数 $\phi'_B = 3.76 \times 10^3 \text{ lm/A}$.

1. 最大光谱光效能 K_m 的实验测定

光度学和辐射度学的关系可以表示如下:

$$X_V = K_m \int X_{e\lambda} V_\lambda d\lambda, \quad (19)$$

(19) 式中 $X_{e\lambda}$ 为光谱辐射度量, X_V 为对应的光度量, K_m 为比例常数, 通常称为最大光谱光效能(光功当量), 是辐射度学单位与光度学单位的换算因子. K_m 值可通过实验测定, 也可以根据 Planck 定律由铂凝固点温度值计算. 直到最近, K_m 的测量值和计算值彼此符合较差, 数值也较分散, 由 671 变动到 690 $\text{lm/W}^{[9]}$. 其原因在于铂凝固点温度的变化, 这就引起光度标准的偏差. 目前暂用 680 lm/W .

我们试图利用已校准的接收器来测定 K_m 值, 目的在于检验光度标准灯与辐射标准灯标定结果的偏差程度, 以及测量系统的准确性如何.

经光度标准灯校准过的硒受光器, 测量辐射标准灯在一定距离 l 处产生的光照度 E_V , 设读数为 i , 其色修正系数为 k , 即

$$E_V = E_B i k = E_B i \frac{\int L_{e\lambda} V_\lambda d\lambda}{\int L_{e\lambda} B_\lambda d\lambda}. \quad (20)$$

根据光度量与辐射度量之间的关系, 应为

$$E_V = K_m \int E_{e\lambda} V_\lambda d\lambda = K_m \frac{S}{l^2} \int L_{e\lambda} V_\lambda d\lambda, \quad (21)$$

(21) 式中 S 为钨带在法线方向的辐射面积 ($3.39 \times 0.16 \text{ cm}^2$), 从而得到

$$K_m = \frac{E_B i l^2}{S \int L_{e\lambda} B_\lambda d\lambda}. \quad (22)$$

计算结果,

$$\int L_{e\lambda} B_\lambda d\lambda = 0.6615 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1},$$

在 $l = 200 \text{ cm}$ 处, 测得 $i = 15.8 \mu\text{A}$, 由上式算出, $K_m = 680 \text{ lm/W}$.

同理, 用硒受光器测量辐射标准灯射入积分球内的光通量, 可得

$$K_m = \frac{\phi'_B i l^2}{S A_i \int L_{e\lambda} B'_\lambda d\lambda}, \quad (23)$$

式中 A_i 为积分球入射孔的面积. 计算

$$\int L_{e\lambda} B'_\lambda d\lambda = 0.656 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1},$$

测定结果, $K_m = 698 \text{ lm/W}$, 与不通过积分球而直接测定的结果比较, 偏差 2.6%.

此外, 用硒受光器和硅光电池分别测量从单色仪射入积分球的同一束单色光, 因 $\phi_V = K_m V_\lambda \phi_c$, 色修正系数 $k = V_\lambda / B'_\lambda$, 即

$$K_m = \phi_V / \phi_c V_\lambda = \frac{i_1}{i_2} \frac{S'_{r\lambda}}{B'_\lambda} \phi'_B S'_{\lambda_0}, \quad (24)$$

(24) 式中 i_1 和 i_2 分别为硒受光器和硅光电池的测量读数. 测量 B'_λ 峰值波长 $5600 \text{ \AA}$ 的单色光, 得到

$$K_m = 0.357 \phi'_B S'_{\lambda_0} = 684 \text{ lm/W}.$$

此值与 680 lm/W 比较, 偏差 0.6%.

2. LED 光学参数测量结果的比较

设每一种 LED 的发光光谱为一定带宽的高斯分布, 算出其平均光效能 $K_m \bar{V}_\lambda$, 利用 $\phi_V = K_m \bar{V}_\lambda \phi_c$ 关系, 可以采用辐射度学方法测量光通量. 同样, 采用光度学方法测量光通量, 利用 $\eta_{\text{ext}} = c / (h \bar{\nu} K_m \bar{V}_\lambda) \cdot (\phi_V / J)$ 关系, 也可以间接算出 η_{ext} . 两种方法的测量结果列于表 2.

从表 2 看出, 对绿色 GaP, 黄色 GaP, 红色 GaAsP 和红色 GaAlAs 发光二极管, 两种测量方法所得的光通量 ϕ_V 和外量子效率 η_{ext} 符合较好, 偏差在 5% 以内. 红色 GaP 在 $9300 \text{ \AA}$ 还有红外辐射谱带, 其峰值高度约为 $6950 \text{ \AA}$ 峰值的 $1/10$. 因此, 偏差较大的主要

表 2 LED 光学参数测量结果比较

管 别	$\lambda_p(\text{\AA})$	$\Delta\lambda(\text{\AA})$	$K_m\bar{V}_\lambda$ (lm/W)	$J(\text{mA})$	光度学方法		辐射度学方法			ϕ_v 偏差 (%)
					ϕ_v (mlm)	η_{ext} (%)	ϕ_e (μW)	η_{ext} (%)	ϕ_v (mlm)	
绿 GaP	5680	300	618	20	19.5	0.072	32.9	0.075	20.3	3.9
绿 GaP	5680	280	618	20	10.7	0.040	17.5	0.040	10.8	1.1
黄 GaP	5880	260	502	20	9.02	0.042	19.0	0.045	9.52	5.3
黄 GaP	5880	280	502	20	12.4	0.059	25.5	0.061	12.8	3.1
红 GaAsP	6650	180	35.0	20	2.68	0.21	79.1	0.21	2.77	3.2
红 GaAsP	6470	160	92.0	20	3.56	0.101	39.9	0.104	3.67	3.0
红 GaAlAs	6800	210	15.5	15	5.70	1.34	363	1.33	5.63	1.2
红 GaAlAs	6820	200	14.6	15	5.56	1.40	376	1.38	5.49	1.3
红 GaP	6950	880	16.6 ¹⁾	10	1.20	0.41	81.0	0.46	1.34	10.4
红外 GaAs	9400	420		20			902	3.4		

1) 一般平均光效能 $K_m\bar{V}_\lambda$ 只在可见光范围内计算,此值是对实际测量的整个光谱带计算的结果。

原因在于换算光通量时,只考虑红色光谱带的平均光效能 $K_m\bar{V}_\lambda$,而忽略了计算可见光功率占总辐射功率的份数,估计由此而引起光通量偏差达 10% 左右。

五、讨 论

上述校准结果表明,热电堆的绝对灵敏度为 $0.430 \text{ V/W} \cdot \text{cm}^{-2}$,硅光电池的绝对关系为 $2.06 \text{ A/W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。热电堆的电动势测量精度只能达到 10 nV ;而选用光电放大器检测硅光电池的光电流,测量精度可达 30 pA 。因此,硅光电池用于测量微小辐射物理量,其灵敏度要比热电堆高三个数量级,使用也较方便。此外,热电堆之所以灵敏,在于黑化的接收面很小,热容量小容易提高冷热两端的温差;适用于辐射场的测量,而不便于测量总辐射功率。具有适当大小圆盘接收面的热电偶,虽然适用于光斑很小的激光功率测量,但灵敏度太低,不能用于测量发光器件的微弱辐射。对比之下,适当增大硅光电池的接收面,并不影响其灵敏度;既可用于辐射场的测量,又便于测量总辐射功率。特别是配用积分球,可简便地测量发光器件的总辐射功率和外量子效率,更显出它的优点。但是,硅光电池对不同波长光的反应具有选择性,必然要用到单色灵敏度这个概念;如果待测的光谱带显著不对称,甚至还要计算选择性修正系数,这是它与热电堆相比不及之处。

从最大光谱光效能 K_m 的实验测定值可看出,辐射标准灯和光度标准灯的标定值误差不大,约为 2%。仪器的非线性误差小于 1%。硅光电池的绝对关系 S_{λ_0} 用两种方法的校准结果相差仅 0.5%;但是,绝对单色灵敏度的误差最大可达 3%。在 $0.4 \mu\text{m}$ 到 $1.1 \mu\text{m}$ 光谱范围内,系统的测量误差估计不大于 5%。目前,国外对同一个 LED 在不同的实验室测量光学参数时,由于测量方法和测量系统的不同,测量结果的偏差可达 $\pm 20\%$ ^[10]。我们对同一个 LED 用辐射度学和光度学两种方法测量结果对比,偏差在 5% 以内;而且 K_m 的实验测定值与 680 lm/W 相比,最大偏差仅 2.6%。因此,可认为测量系统的准确性基本上是可靠的。

发光器件的光度学测量方法,在很大程度上还涉及辐射度量和光谱成分的测量,精确

的测量并不比辐射度学方法简便。通常由于光度标准灯标定的准确度较差; 而且模拟标准人眼的物理受光器有着多层滤光片, 由于校准和测量的光源位置不同, 光路发生改变, 测量结果的准确性显然不如辐射度学方法。但是, 在准确性要求不高的情况下, 光度学方法仍不失为一种简便的实用测量方法。

本工作是在吴伯僊同志的关怀和支持下进行的, 并得到黄启圣、刘瑞堂等同志的帮助, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] R. Watson, *Electro-Optical Systems Design*, 8(1)(1976), 34.
- [2] 中国计量科学研究院光学室, 国外计量, 1976 年, 第 4 期, 42 页.
- [3] J. M. Kendall, Sr. and C. M. Berdahl, *Appl. Opt.*, 9(5)(1970), 1082.
- [4] Radiometer/Photometer Update, *Electro-Optical Systems Design*, 9(3) (1977), 24.
- [5] R. Portscht, *Messtechnik*, 80(6)(1972), 150.
- [6] 斋藤一郎、三崎泰雄, 照明学会杂志, 61(5)(1977), 251.
- [7] J. Horwath, *Electronic Design*, 21(8)(1973), 92.
- [8] 郑健生, 厦门大学学报(自然科学版), 1977 年, 第 2 期, 45 页.
- [9] H. Katsuyama *et al.*, *Metrologia*, 11(4)(1975), 165.
- [10] R. N. Bhargava, *Pro. SID.*, 16(2)(1975), 103.

MEASUREMENT OF MINUTE RADIOMETRIC QUANTITIES IN THE SPECTRAL RANGE FROM VISIBLE TO NEAR INFRA-RED

ZHENG JIAN-SHENG

(Department of Physics, Xiamen University)

ABSTRACT

This paper describes a method of calibrating the absolute spectral sensitivity of silicon photovoltaic cell. The cell was used for measuring minute radiant power, irradiance and radiant intensity of radiations, ranging from $0.4 \mu\text{m}$ to $1.1 \mu\text{m}$. It was also used for measuring the external quantum efficiency of electroluminescent devices. The sensitivity of the system is higher than that of the conventional thermopile by three orders of magnitude. By incorporating with an integral sphere, it is very convenient to measure the radiant power, ranging from 6.3 nW to 310 mW , of any uniformly or non-uniformly distributed source.

The maximum spectral efficiency K_m was determined by using this system, and the accuracy of radiometric system and photometric system was discussed. Finally, the measured optical parameters of some light-emitting diodes were examined.