

三维变角反射计

李在清 马振生 陈锐 王煜

(中国计量科学研究院 光学处)

提 要

本文介绍了三维变角反射计的结构。检验了球形照明球的亮度均匀性、测量系统的线性性、单色仪的波长准确度和杂散辐射等参数。测定了漫射陶瓷板和海伦(Halon)粉末压制板的反射亮度分布曲线。讨论了变角反射计在色度学和光谱光度学中的重要应用。

关键词: 变角反射测量、变角反射计, 反射标准材料, 三维角分布, 绝对反射因数。

一、序 言

在光度学、色度学和遥感技术领域, 广泛使用的氧化镁、硫酸钡和聚四氟乙烯粉末以及磨砂陶瓷板这类反射标准材料的反射亮度分布曲线与完全漫反射体存在不同程度的偏离。但人们为简化装置往往假定上述材料是各向同性的^[1, 2]。因此, 在测定漫反射样品的亮度分布曲线或绝对反射因数时, 总保持观测角与照明角在同一平面内, 这种假定会受到一定条件限制的。

本文报道的光谱变角反射计既能测定观测角与照明角处在同一平面的反射亮度分布, 又能测定处在不同平面的漫反射亮度分布, 从而实现了漫反射材料的三维测量, 称之为三维光谱变角反射计*。

二、反射计的结构

1. 总体安排

如图1所示, 变角反射计的机械结构由三部组成: (1) 主转台 S 。能绕垂直轴 z 旋转 $\pm 180^\circ$ 。它的作用是设置观测方位角。其上固定着样品切换台 T 和照明拱 R 。样品切换台上有一个用作零点的黑腔 BC , 一个用作中介衰减器的抛光黑玻璃 $BG^{[3]}$, 和一个待测样品 DS , 通过步进电机的驱动, 将它们依次引入光路。(2) 照明拱 R 。其上装有一个积分球, 球内装有 250 W 溴钨灯。该拱不但能随主转台 S 一起转动, 而且能独立地绕水平轴 Y 转动 $\pm 90^\circ$ 。(3) 探测拱 D 。其上装有一个亮度计头。一个凹面全息光栅单色仪和一根石英光缆。用作探测信号的光电倍增管和 $I \sim U$ 转换器均固定在反射计底座上, 并不跟随拱 D 转动。这三个轴 X 、 Y 和 Z 可相互正交, 其交点 O 为测量中心, 样品前表面应与 XOY 面重合。

收稿日期: 1989年9月25日; 收到修改稿日期: 1990年4月13日

* 测量的波长范围是 380~760 nm。

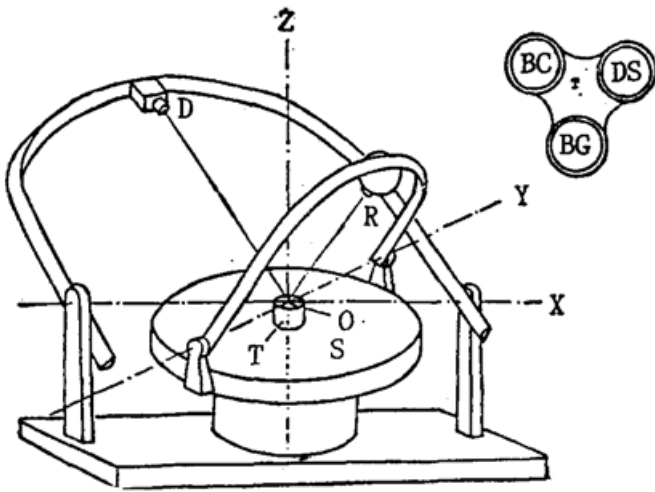


Fig. 1 Schema of the gonioreflectometer

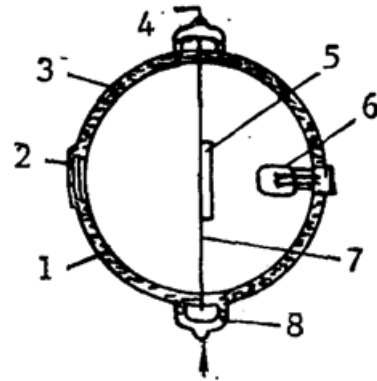


Fig. 2 A water cooled integrating sphere
 1. aluminium sphere, 2. aperature, 3. cooled water,
 4. exit, 5. diffuse plate, 6. halogen lamp, 7. holder,
 8. entrance

上述的机械结构,既实现了样品的三维测量,也把亮度分布的相对测量和反射因数的绝对测量结合在一台装置上。

2. 积分球结构及作用

积分球的结构如图 2 所示,它的内径为 120 mm,内壁涂敷硫酸钡粉末,球心装有一块漫反射板,其作用是:一方面截住来自灯泡光的直射成分。另一方面使来自前半球的漫射成分再次被散射,以形成限制光阑上的均匀辐射场。为了降低球内壁,特别是限制光阑的温度,球的壳体设计成夹层,其间通以水冷却。当球内点燃 250 W 灯时,如果把冷却水流速调节到 $2.5 \times 10^{-5} \text{ L} \cdot \text{S}^{-1}$ 左右,则光阑温度可控制在 30°C 以下*。

积分球光阑至样品的距离约为 800 mm,直径 28 mm,其向样品所张的圆锥角为 2° 。如图 3 所示,在过光阑中心的两个正交方向上,距该中心 $\pm 10 \text{ mm}$ 范围内测得亮度均匀性 $u = L_x/L_0 \leq \pm 1.001$ 。其中 L_x 为距离窗口中心 x 处的亮度, L_0 为窗口中心的亮度。

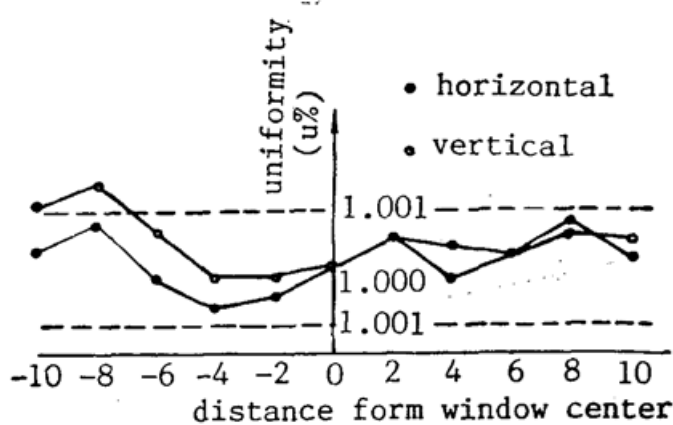


Fig. 3 Radiance uniformity for the window of a sphere

图 3 所示,在过光阑中心的两个正交方向上,距该中心 $\pm 10 \text{ mm}$ 范围内测得亮度均匀性 $u = L_x/L_0 \leq \pm 1.001$ 。其中 L_x 为距离窗口中心 x 处的亮度, L_0 为窗口中心的亮度。

3. 减低杂散辐射的措施

尽量减小照明拱和探测拱及其附属物表面积,使得所有部件的遮挡面积小于待测样品上半球面积的 5%。其中球形照明器的阴影角为 $\pm 7.5^\circ$ 。且用 3M 黑漆喷涂这些表面,以尽量减低杂散辐射水平。

亮度计头的有效入射孔径为 15 mm,相对孔径为 $1/3.5$,与 H_{10} 单色仪相匹配。等效视场角 2ω 为 0.5° 。在视场光阑前放置一个孔径光阑以消除亮度测量中的距离效应。在 45° 角观测样品时将看到一个长轴为 17.5 mm 的椭圆亮斑。

采用 Jobin Yvon 生产的带 12001/mm 全息光栅的单色仪。入射狭缝为 $0.5 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$,它同时是亮度计头的视场光阑。出射缝 $1 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 。在实用条件下,用汞弧灯检查了单色仪的波长精度为 0.5 nm,波长准确度小于 1 nm。用 He-Ne 激光法和截止滤光器

* 如果无水冷却,即使在球内点燃 100 W 的灯,光阑温度也高达 90°C 。

法^[4]测得单色仪的杂散辐射为 0.15%。

4. 探测系统及其非线性修正因数

一条长约 4 m、入射端为 $1.2\text{ mm} \times 5.9\text{ mm}$ 的矩形的多模石英光缆与单色仪出射缝相连,其出射端为 $\phi 3\text{ mm}$ 的圆形,与光电倍增管相连,光缆的透射比约为 70%。从入射端算起的 $2/3$ 长的光缆随着拱 D 一起转动,出射端及其余部分固定不动。在出射端与倍增管阴极面之间留有空间,放置一块厚约 2 mm 的磨砂石英片作为漫射器。当测量中介衰减器和光源亮度时,再引入一片透射比约为 0.1 的中灰玻璃,以调整阴极面上的照度至合适水平。

采用多模光缆与光电倍增管组合探测系统的优点在于:(1)光电倍增管比最好的硅光二极管灵敏度高得多,因此在低辐照下使用它可获得信噪比。(2)光缆随探测拱转动时,其透射能力不变;若转动光电倍增管,则其响应度会随转动而变化。因此,在这种组合探测系统中,可通过光缆将不同方向的辐射通量准确地传输到固定的光电倍增管阴极面上,从而避免了光电倍增管因转动而产生的误差。

用线性检查仪^[5]实测浜松-R456 光电倍增管系统(负高压约 700 V)和 EG & G, UV 444 B 硅二极管的光度非线性修正因素 η ^[6]。从图 4 可以见在大约 3.5×10^2 数量级范围内硅光二极管的非线性修正因数明显小于光电倍增管。还清楚地表明,光电倍增管在低辐照下(即净输出在 0.0045~0.144 V)探测系统的非线性修正因数较大;在高辐照下(即净输出在 0.288~2.0 V),探测系统的非线性修正因数较小。这是因为,前者是在 7150 数字电压表最灵敏的 0.2 V 档显示的,后者是在数字电压表的 2 V 档显示的,电压表不同测量档与倍增管组合的结果;产生了不同的非线性。在测量结果中计入了非线性修正因数。

此外,反射计设计在控制与数据处理方面,采用闭环控制系统提高了角度定位精度;计算机处理系统,改善了测量重复性,实现了控制与处理的自动化。

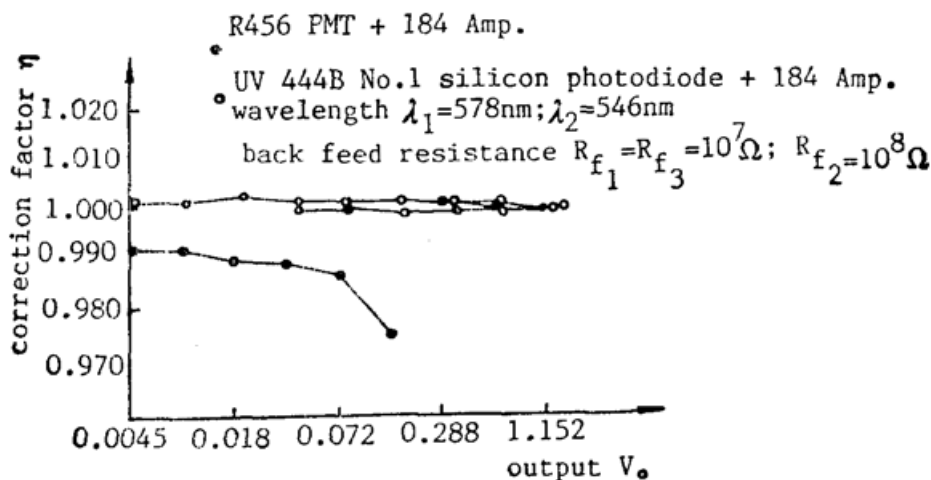


Fig. 4 Nonlinearity of the photo-detector

三、反射亮度分布的测量

以 θ 和 φ 分别表示俯仰角和方位角,以 L 表示亮度,且以脚标 i 和 r 区别照明和观测状态,则在 $\theta_i = 10^\circ$ 处归一化的相对亮度为

$$L_f = \frac{L_r(\theta_i, \varphi_{i0}; \theta_r, \varphi_{r0})}{L_r(10^\circ, \varphi_{i0}; \theta_r, \varphi_{r0})} \quad (1)$$

图 5 中给出了海伦粉末压制板的相对亮度随 θ_i 的变化。入射俯仰角 $-80^\circ \leq \theta_i \leq +80^\circ$, 其间隔 $\Delta\theta_i = 10^\circ$; 反射俯仰角 $-60^\circ \leq \theta_r \leq +60^\circ$, 其间隔 $\Delta\theta_r = 30^\circ$ 。入射和反射的方位角不变, 即 $\varphi_{i0} = \varphi_{r0} = \text{const}$ 。从图 6 可见, 当 $30^\circ \leq \theta_i \leq 45^\circ$ 时, 相对亮度 L_f 趋于平坦; 这就从分布曲线上证实了 CIE 推荐 0/45 几何条件的科学性。而在其它角度下, 相对亮度 L_f 随着 θ_i 的增大或者呈现下降, 或者呈上升现象。称这种上升现象为偏镜峰反射 (off specular peak), 它在 $\theta_i = 80^\circ$ 时的亮度比 $\theta_i = 10^\circ$ 时高约 2 倍多。这种条件下的测量结果与固定入射角, 改变反射角的测量结果^[1]相一致。

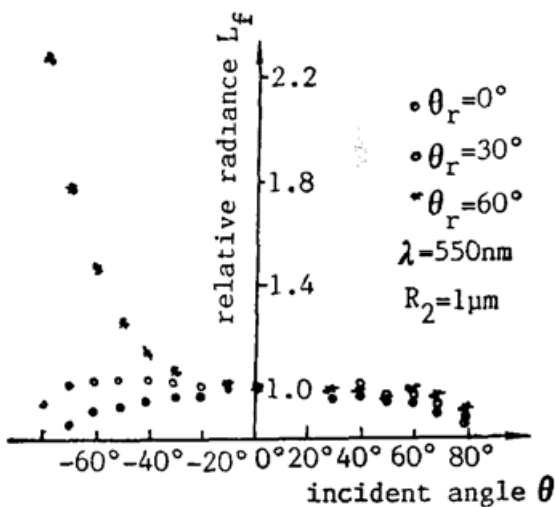


Fig. 5 Reflected radiance distribution of Halon

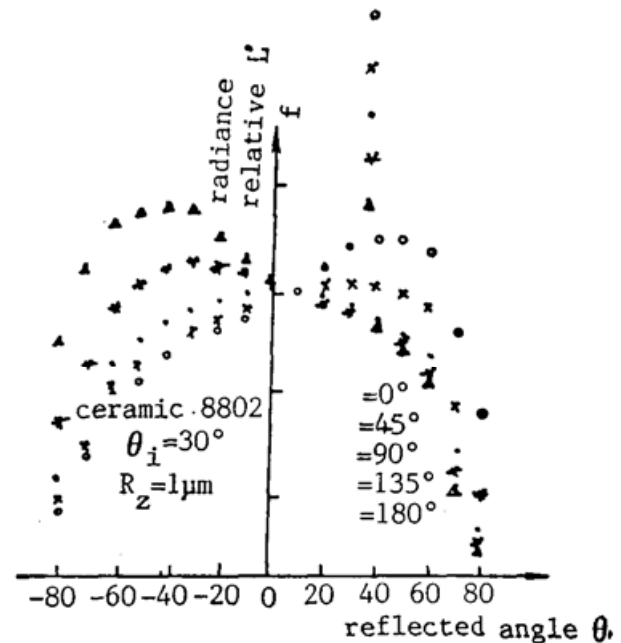


Fig. 6 Reflected radiance distribution of mat ceramic

图 6 给出了中国磨砂陶瓷板 ($R_z = 1 \mu\text{m}$) 的相对亮度分布 L'_f 随观测方位角 φ_r 的变化。它是在 $\varphi_i = \varphi_{i0}$, $0^\circ \leq \varphi_r \leq 180^\circ$, $\Delta\varphi_r = 45^\circ$; 以及 $\theta_i = 30^\circ$, $-80^\circ \leq \theta_r \leq +80^\circ$, $\Delta\theta_r = 10^\circ$ 的条件下测量并在 $\theta_r = 10^\circ$ 处归一化。因此图 6 的纵坐标是

$$L'_f = \frac{L_r(30^\circ, \varphi_{i0}; \theta_r, \varphi_r)}{L_r(30^\circ, \varphi_{i0}; 10^\circ, \varphi_r)} \quad (2)$$

从图中可见, 在反射角 $\theta_r > 0$ 的区域里, 亮度分布 L'_f 随着 φ_r 的增加而升高; 在反射角 $\theta_r < 0$ 的区域里, 亮度分布 L'_f 随着观测方位角 φ_r 的增加而降低。还可以看到, 大多数曲线在整个区域总是倾斜的, 仅当 $\varphi_r = 90^\circ$ 时, 分布曲线比较平衡。由此可见, 标准反射材料的角分布与方位角有一定的依赖关系, 在精密测量中不能认为是各向同性的。

通过中介衰减器 BG , 测量了上述漫射样品和带和镜面反射成分样品在 0/45 几何条件下的光谱反射因数。

四、讨 论

光谱变角反射计是测量漫反射材料光学特性的重要手段。它首先独立确定了 0/45 几何

条件下的反射因数标。因为实用反射材料的反射因数与 $0/d$ 几何条件下的反射比无论在定义上还是数值上是有明显差别的。其次, 它给出的分布曲线既反映出漫反射亮度与表面粗糙度的依赖关系。也反映出实际材料的分布曲线与理想朗伯面的偏离程度, 从而为光度学和色度学的误差修正提供了实验依据。

变角反射计的照明器既要提供充分漫射的辐通量, 又要减少其遮光角度, 可望通过优化机械结构的设计进一步解决。系统的动态特性直接受控制线路的参数与机械惯量的匹配的影响。在今后设计反射计的控制线路时可全面考虑。

感谢航空航天部 B 所张国安等三位先生设计了机械装置, 北京密之机床研究所李家特等先生调试了控制系统。向西德 PTB 的 Erb 博士、Nikolaus 先生以及美国 NIST 的夏劲戈博士表示诚挚的谢意, 他们在变角反射计方案的讨论过程中, 提供了宝贵的意见和帮助。

参 考 文 献

- [1] CIE Publication No. 44 (TC-2.3) *Bureau Central de la CIE*, Paris, 1979.
- [2] W. Erb; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 22, 3789.
- [3] Jack J. Hsia, Victor R. Weidner; *Metrologia*, 1981, **17**, No. 1, 97~102.
- [4] *NBS Technical Notes* 594-11.6, 1978.
- [5] 肖文兵等;《计量技术》, 1988, No. 1, 1.
- [6] C. L. Sanders; *J. Res. NBS(A)*, 1972, **76A**, 437~447.
- [7] W. Erb, Li Zaiqing *et al.*; *Optik*, 1985, **71**, No. 2, 80~88.

3 Dimensional spectro-gonioreflectometer

LI ZAIQING, MA ZHENSHEN, CHEN RUI AND WANG YU
(*Department of Optics, National Institute of Metrology, Beijing*)

(Received 25 September 1989; revised 13 April 1990)

Abstract

Construction, controlling, and data processing system of a 3 dimensional spectro-gonioreflectometer developed at National Institute of Metrology (NIM) are introduced in this paper. Radiance uniformity of a spherical radiator and photometric nonlinearity of measuring system as well as wavelength accuracy and stray radiation of the monochromator are tested. Reflected radiance distribution curves of a mat ceramic plate and a Halon pressed powder plate have been measured. Some important applications of the gonioreflectometer to colorimetry and spectro-photometry are discussed.

Key words: gonioreflectometry; gonioreflectometer; standard materials for reflection; 3D-angular distribution; absolute reflectance factor.