

多波长照射下聚四氟乙烯漫反射板的角散射分布特性

刘文清 张玉钧 谢品华 宋炳超 王峰平 郑朝辉

(中国科学院安徽光机所 合肥 230031)

提要 采用多波长相干激光照明和不同的光束发散角,研究了聚四氟乙烯(F4)粉末压制的漫反射标准板的角反射分布特性和偏振特性,结果表明 F4 标准板无论对远场还是近场光束均呈现良好的漫反射特性并具有良好的解偏振性能。

关键词 角散射分布,聚四氟乙烯标准板,多波长激光

1 引言

样品反射特性的测量在光度学和光学领域有着重要作用,通常借助于漫反射标准板来完成。为了得到可靠的测量结果,标准板必须具有一定物理化学特性和反射特性,如:稳定性(不随时间、温度环境而变)、表面均匀、漫反射、无光谱选择性、不透明、无荧光和易携带。聚四氟乙烯(F4)粉末压制的漫反射板满足这些要求,并且其在紫外、可见和近红外波段均有着良好的反射特性,故常作为标准漫反射参考板使用。F4 漫反射板的反射率在 350~ 1800 nm 波段高达 99%,较之目前其他材料如氧化镁、硫化钡等制成的标准漫反射参考板要高得多,从而广泛地用于积分球表面和反射标准板。

对非相干光照明下 F4 漫反射板的反射特性已进行了广泛的研究^[1]。本文着重于研究相干激光照明下 F4 漫反射板的角反射分布,分析和评价了 F4 漫反射板对相干光照明的漫反射特性。

2 数据分析方法

表面的无规反射常用双向反射分布函数(BRDF)描述, BRDF 是在几何光学基础上定量描述各种表面辐射和反射特征的物理量,它由表面粗糙度、介电常数、照射波长、偏振等因素决定,其数学表达式为^[2]

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (1)$$

式中 θ 和 φ 是天顶角和方位角,下标 i 和 r 分别表示入射量和反射量, dL_r 是表面微元 ds 的反

射辐亮度, dE_i 是入射辐照度, 如图 1 所示。BRDF 的物理意义是给定方向入射到样品表面上的辐照度, 经样品表面反射在某一方向产生的辐亮度。理想漫反射面(朗伯面)的半球反射率为 1, 且所有方向都有均匀的辐亮度, 其 BRDF 在所有入射角和反射角都为 $1/\pi$ 。对于半球反射率(ρ) 小于 1 所有方向有均匀辐亮度的样品, 其 BRDF 为 ρ/π 。

实际测量时, 探测器的输出电压与辐亮度有如下关系

$$V_{\text{sample}}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = RL_r A_s \Omega_{\text{ds}} \cos \theta_r \quad (2)$$

式中 V_{sample} 为探测样品的输出电压, R 为探测器响应度(V/W), L_r 为反射的辐亮度, A_s 为样品辐照面积, Ω_{ds} 为探测器立体角。在相同入射条件下, 用标准板替代样品得到参考输出电压

$$V_{\text{ref}}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r', \varphi_r') = R \frac{\rho}{\pi} E_i A_s \Omega_{\text{ds}} \cos \theta_r' \quad (3)$$

式中 $\rho E_i/\pi$ 为标准板的辐亮度, (2), (3) 两式联立得到样品的 BRDF

$$\text{BRDF} = \frac{L_r}{E_i} = \frac{V_{\text{sample}}}{V_{\text{ref}}} \cdot \frac{\cos \theta_r'}{\cos \theta_r} \cdot \frac{\rho}{\pi} \quad (4)$$

实际测量中, θ_r' 一般采用镜向角。

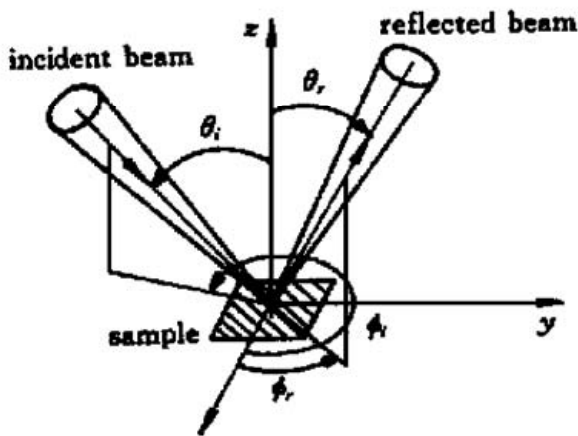


图 1 入射反射光束的几何学

Fig. 1 Geometry of the incident and the reflective beams

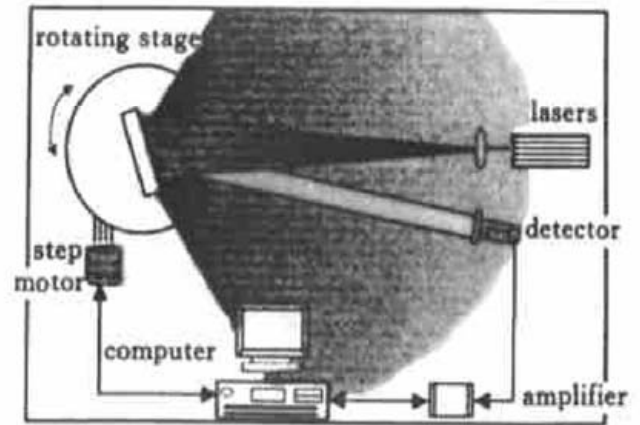


图 2 激光散射角分布测量装置框图

Fig. 2 Block diagram of the measurement apparatus for the angular distribution of laser scattering

3 实 验

激光散射角分布测量装置如图 2 所示, 它由光源、机械控制和信号接收处理三个单元组成。激光波长分别为 532 nm, 640 nm, 780 nm, 904 nm 和 1064 nm, 测量入射平面的散射角分布。在激光器前和探测器前放置偏振器以研究表面的偏振特性, 光源的偏振方向与入射平面垂直(s 偏振)。探测器采用日本滨松 R928 型和 R632 型光电倍增管, 响应范围分别为 190~ 900 nm 和 400~ 1200 nm。探测器安装在旋转臂上, 旋转臂由步进电机驱动在入射面旋转, 精度可达 0.05° 。样品安装在另一旋转台上, 旋转台转动可改变入射角。

测量时, 激光器发出以一定频率调制的脉冲光束, 通过扩束系统照射到样品表面。调整扩束系统的焦距可以控制照明波束发散角, 从而可以研究不同发散角扇形波束照明下样品的近场散射特性。信号经前置放大器送入采集器处理, 采集器可对反射信号做峰值处理, 也可对反射的脉冲信号的波形做积分处理, 从而研究样品反射的位相特性。移动旋转台臂上的光电倍增管可测量表面对激光脉冲波束的距离分布。测量过程全自动化。

4 结果与分析

图 3 给出波长 640 nm 激光束照明下, 0° 入射时 F4 漫反射板的归一化散射角分布测量曲线。入射波束发散角为 2, 8 和 20 mrad, 分别对应于样品受照明直径 10, 40 和 100 mm, 探测器对样品接收孔径角为 60 mrad, 视场约 $\varphi 120$ mm。图 3 (a) 为 F4 漫反射板的 $f_r \cos \theta$, 随探测角变化曲线, 图 3 (b) 为 f_r 随探测角变化曲线。为了提高信噪比, 各探测点均进行 500 次平均。测量数据均对 $\theta_r = 0.2^\circ$ 时的测量值进行归一化处理。发散角 2 mrad 的光束相当于准直光束, 发

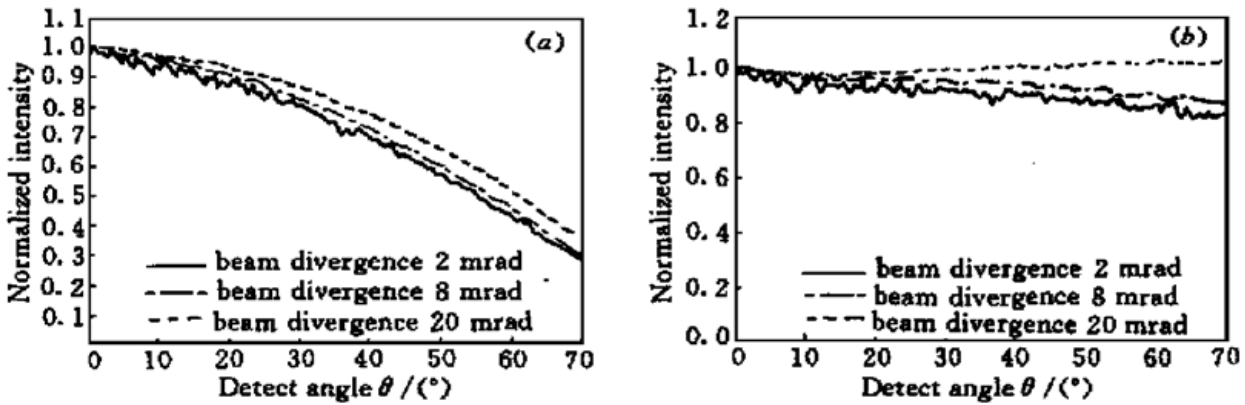


图 3 光束发散角分别为 2, 8 和 20 mrad, 0° 入射时, F4 板的散射角分布曲线
 (a) F4 板的 $f_r \cos \theta$, 随探测角变化曲线; (b) $\cos \theta$ 矫正后, f_r 随探测角变化曲线

Fig. 3 Angular distribution curve of scattering of the plate F4 at the incident angle of 0° when the divergent angle is 2, 8 and 20 mrad, respectively
 (a) variation curve of $f_r \cos \theta$, of plate 4 with the detecting angles;
 (b) variation curve of f_r , with the detecting angles when the $\cos \theta$, is corrected

角 20 mrad 的光束相当于发散光束。从图 3 可以看出, F4 板无论对远场还是近场光束均呈现良好的漫反射特性。值得注意的是测量数据作 $\cos \theta$ 矫正后, 对小发散光束照明, F4 板在大角度时散射强度有所下降, 40° 和 70° 强度分别下降 5% 和 8%, 说明 F4 板大角度的漫反射特性较之小角度略差。大发散光束照明 F4 板大角度时散射强度有所上升则是由探测立体角偏小引起的。当入射角为 30° 时, 可得到类似的结果。对不同的光束入射角, F4 板也呈现良好的漫反射特性。

为了研究 F4 漫反射板角分布特性与照明波长的关系, 采用 4 种激光波长准直光束照明样品, 图 4 为 0° 入射时 F4 漫反射板 $\cos \theta$ 矫正后的角分布曲线, 数据均以 2° 的值进行归一化处理。可以看出 F4 漫反射板对 4 种激光波长均呈现较平坦的散射角分布特性, 但是随着散射角的增大呈下降趋势, 散射角 40° 时, 强度下降约 10%。可见光照明较之近红外光照明, 散射角分布较均匀。在所有测量中没有发现较强的后向散射峰, 从而说明只要选择合适的密度, F4 粉末压制的漫反射板的光散射特性极类似于朗伯面。

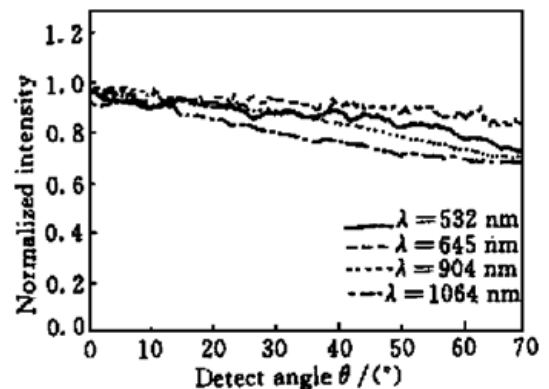


图 4 4 种激光波长 0° 入射时, F4 板的 f_r 随探测角变化曲线

Fig. 4 Variation curve of f_r of plate F4 at the incident angle of 0° for 4 laser wavelengths

另外研究了漫反射表面的偏振特性。在某些应用中, 散射光的偏振特性可以用来区分粗糙表面和表面缺陷^[4]。我们分别在照射激光器前和光电倍增管前放置偏振器。所有测量中激光器均为水平偏振, 定义散射光的偏振与入射平面垂直为 I_s , 与入射平面平行为 I_p , 那么, 散射光的偏振度为

$$V_s = \frac{I_s - I_p}{I_s + I_p} \times 100\% \quad (5)$$

对完全解偏振的表面, $I_s = I_p$, $V_s = 0$, 对完全偏振的表面, $I_s = 0$ 或 $I_p = 0$, $|V_s| = 1$, 对部分解偏振的表面, $I_s \neq I_p$, $0 < V_s < 1$ 。图 5, 6 分别给出 532 nm 和 904 nm 照射时, F4 漫反射板的偏振随探测角变化特性。测量曲线为 $I_p \cos \theta_s$ 和 $I_s \cos \theta_s$ 随探测角的变化。

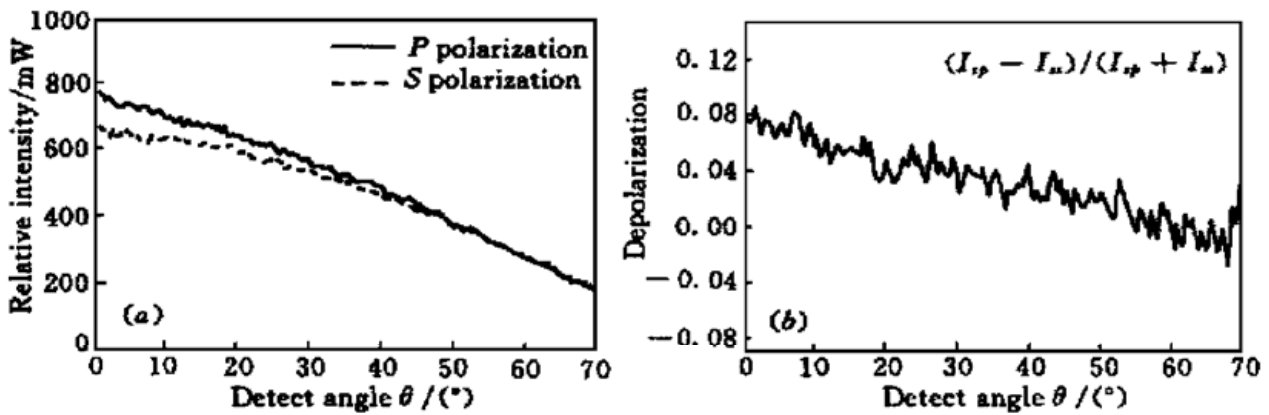


图 5 波长 532 nm 照明时, F4 板的偏振特性

(a) F4 板的 $I_p \cos \theta_s$ 和 $I_s \cos \theta_s$ 随探测角变化曲线; (b) V_s 随探测角变化曲线

Fig. 5 Polarization property of plate F4 illuminated by 532 nm wavelength light

(a) variation curve of $I_p \cos \theta_s$ and $I_s \cos \theta_s$ with the detecting angles; (b) variation curve of V_s with the detecting angles

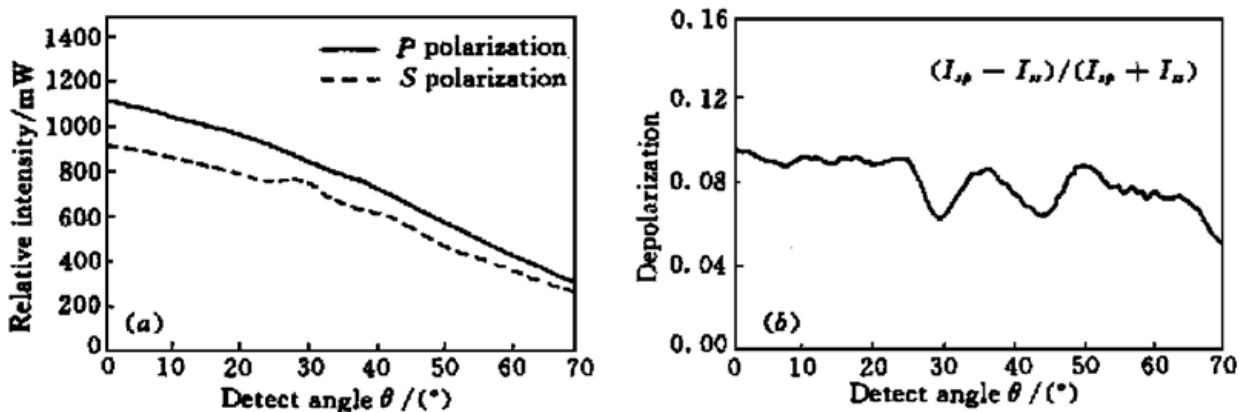


图 6 波长 904 nm 照明时, F4 板的偏振特性

(a) F4 板的 $I_p \cos \theta_s$ 和 $I_s \cos \theta_s$ 随探测角变化曲线; (b) V_s 随探测角变化曲线

Fig. 6 Polarization property of plate F4 illuminated by 904 nm wavelength light

(a) variation curve of $I_p \cos \theta_s$ and $I_s \cos \theta_s$ with the detecting angles; (b) variation curve of V_s with the detecting angles

从图中可以看出 F4 漫反射板有很好的解偏振特性, I_p 和 I_s 非常接近。随探测角的改变, 解偏振度有微小变化。值得注意的是探测角增加时, 短波段的解偏振特性优于长波段, 可能是由于短波段散射强的原因引起。根据我们的结果和其他研究结果^[5], 有一个定性规律, 表面的

漫反射特性越好, 其解偏振特性也越好, 漫反射特性和解偏振特性成线性关系。对光滑表面, 小角度散射时, 偏振光照射时其散射光仍然存在很强的偏振^[6]。另外, 探测角较小时的解偏振度低于探测角较大时的解偏振度。散射光的偏振分量由单次散射引起, 而非偏振分量则是多次散射造成的。在 F4 漫反射板的情况下, 多次散射起着主导作用。

5 结 论

对聚四氟乙烯粉末压制的 F4 漫反射标准板的角散射反射分布特性和偏振特性的测量结果表明无论是在远场还是近场光束照射下, 该板均呈现良好的漫反射特性和解偏振特性。在大多数工程应用和激光应用中, F4 漫反射板可以作为标准参考板使用。

参 考 文 献

- 1 Victor R. Weidner, Jack J. Hsia. Reflection properties of pressed polytetrafluoroethylene powder. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1981, **71**(7): 856~ 861
- 2 Rene Fernandez, Richard G. Seasholtz, Lawrence G. Oberle. Comparison of the bidirectional reflectance distribution function of various surfaces. *NASA Technical Memorandum*, 101317, 1988
- 3 V. R. Weidner, J. J. Hsia, B. Adams. Laboratory intercomparison study of pressed polytetrafluoroethylene powder reflectance standards. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(14): 2225~ 2230
- 4 Thomas A. Germer, Clara C. Asmail. Bidirectional ellipsometry and its application to the characterization of surfaces. *SPIE*, 1997, **3121**: 173~ 182
- 5 Uri P. Oppenheim. Depolarization of infrared radiation reflected from rough surfaces. *SPIE*, 1997, **3121**: 259~ 266
- 6 J. C. Dainty, M.-J. Kim, A. J. Sant. Measurements of angular scattering by randomly rough metal and dielectric surfaces. in *Scattering in volumes and surfaces*, ed. by M. Nieto-Vesperinas, North-Holland Press, 1990. 143~ 155

Angular Distribution Properties of Polytetrafluoroethylene Diffuse Reflectance Plate under Multiwavelength Illumination

Liu Wenqing Zhang Yujun Xie Pinhua

Song Bingchao Wang Fengping Zheng Chaohui

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract Angular distribution and depolarization properties of polytetrafluoroethylene diffuse reflectance plate were investigated under multiwavelength laser illumination with different beam divergences in this paper. Results indicate that this plate has a good diffuse reflectance and depolarization properties which can be used as a standard of diffuse reflectance.

Key words angular scattering distribution, polytetrafluoroethylene reflectance plate, multi-wavelength lasers