

硅太阳能电池板的光谱 BRDF 测量及色度特性的研究

王安祥¹, 吴振森², 曹运华²

(1. 西安工程大学 理学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 实验测量了硅太阳能电池板在 380~780 nm 内的光谱双向反射分布函数(BRDF), 分析了光谱双向反射分布函数随波长及散射角的变化趋势, 将色度学理论和光散射理论相结合, 寻找到光散射理论中的双向反射系数与色度学中光谱反射率因数的联系, 进而获得了一种通过光谱 BRDF 测量实现物体色度特性表征的方法。并且采用 CIELAB 均匀色空间中的明度指数和色品指数、定量地描述了儿种入射条件下、不同散射方向上目标样片的颜色特性。将目标样片的光谱双向反射分布函数的研究应用到颜色光学领域中, 对目标的探测、识别和颜色复现等具有重要的应用价值。

关键词: 光谱双向反射分布函数; 双向反射系数; 光谱反射率因数; 色度; 光散射
中图分类号: O433.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)11-3087-09

Experimental measurement of spectral BRDF and research of chromaticity characteristics of silicon solar cell panel

Wang Anxiang¹, Wu Zhensen², Cao Yunhua²

(1. School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The spectral bidirectional reflectance distribution function (spectral BRDF) of silicon solar cell panel was measured in the visible spectrum (380 - 780 nm). The variation of spectral BRDF with wavelength and scattering angle was analyzed. The relationship between the bidirectional reflectance factor in the theory of light scattering and the spectral reflectance factor of colorimetry was obtained by combining the theories of colorimetry and light scattering, a method was developed for characterizing chromaticity characteristics of object using the spectral BRDF. Using the lightness index and chromatic indexes and in CIELAB color system, chromaticity characteristics of target samples was described under the condition of several incident and scattering directions. The application of spectral BRDF of target samples in color optics possesses important values in the detection, identification and color reproduction of target samples.

Key words: spectral bidirectional reflectance distribution function; bidirectional reflectance factor; spectral reflectance factor; chromaticity; light scattering

收稿日期: 2013-03-04; 修订日期: 2013-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(61172031; 61271110); 陕西省自然科学基金(2012JM1011)

作者简介: 王安祥(1974-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事目标光散射特性的研究工作。Email: waxiang0921@126.com

0 引言

双向反射分布函数(BRDF)可以描述各类材料与涂层表面光散射与辐射的空间分布特性以及光谱特性。BRDF 基本上适用于各个波段上的散射和辐射,在目标光辐射与散射特性^[1],材料诊断,地物海洋遥感^[2],军事目标探测、跟踪,目标提取与识别^[3-4],计算机图像处理 and 仿真^[5]等领域都有广泛的应用。以前国内外学者主要研究粗糙目标样片在特定激光波长下的 BRDF 实验测量^[6]和建模^[7],但是近年来,遥感领域中的高光谱 BRDF 数据的出现又推动着多光谱 BRDF 理论和实验技术的发展,这把以往的激光波长的 BRDF 领域扩展到可见光(多)光谱波段的 BRDF 领域。国内学者也开始对不同材料样片的光谱 BRDF 方面进行研究,贾辉^[8]实验测量了铝漫反射板在 200~300nm 内的双向反射分布函数。曹运华^[9]实验测量了紫红色和白色涂漆板在 400~780 nm 内的光谱,并且获得了光谱范围内各波长所对应的双向反射分布函数五参数模型,该方法将特定激光波长下的五参数 BRDF 模型适用至可见光波段的各个波长。王安祥^[10]测量了可见光谱 399.82~757.47 nm 区域内的光谱 BRDF,对光谱 BRDF 实验数据进行了谱积分预处理,获得了能够表征样片在可见光波段下的光散射特性的 BRDF 模型。

双向反射分布函数能描述物体表面的方向散射特性,而物体表面在某一观测方向所呈现的色度与其沿该方向散射特性密切相关。国外已有学者研究通过 BRDF 测量复现物体的色度特性^[11-12],而国内学者在将 BRDF 应用到光度学和颜色光学领域中的研究还比较少见。文中实验测量了目标样片太阳能电池板在 380~780 nm 内的光谱 BRDF,然后对太阳能电池板可见光谱 BRDF 的特征与光谱反射率进行了相关分析,进一步获得了双向反射分布函数、双向反射系数与光谱反射率因数之间的联系,最后计算了不同光源照射下该目标样片在不同观测方向下的色度值。

1 样片光谱 BRDF 测量

1.1 实验装置

光谱 BRDF 测量的实验装置如图 1 所示,它主要由 BRDF 测定仪和测量光路构成。BRDF 测定仪

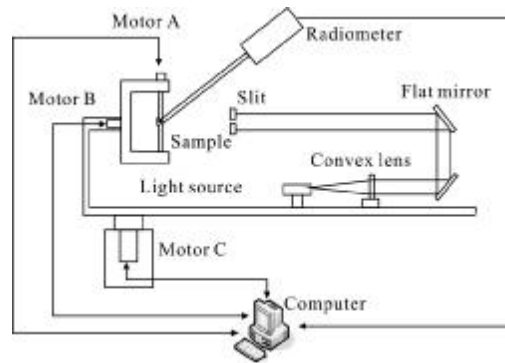


图 1 光谱 BRDF 测量装置示意图

Fig.1 Experiment setup of measurement system of spectral BRDF

主要由 A、B、C 三个电机和计算机组成。A、B、C 电机在计算机的控制下带动样片在空间转动,可以达到在上半球空间变化入射和接收方向的目的。测量光路由光源、接收器、凸透镜、平面镜和狭缝组成。实验中选用美国 ASD 公司的 FieldSpec@Pro 型快速扫描光谱光度辐射仪作为接收器,它的测量范围是 350~2 500 nm,此次实验只取其中的可见光波段(380~780 nm)。

实验采用卤钨灯作为光源,它能发射出连续稳定的光谱。光源发出的光经过透镜准直后由两块全反射平面镜反射至窄缝,经过窄缝入射到样片上,最后由样片反射至接收器。接收器与计算机相连,计算机每控制电机转动一个角度(角分辨率可达 1°),就会自动记录下接收器采集到的样片反射的光谱辐射亮度,数据记录完毕后,计算机才会控制电机再次转动。实验分别测量了入射天顶角为 10°、30°、45°时的谱辐射亮度,并且在每个入射天顶角分别测量了方位角为 180°、135°、90°时的谱辐射亮度。在采集反射数据时每隔 5°采集一个点,在镜像点附近进行了加密处理,每隔 1°采集一次。整个测量过程是自动控制完成的。

1.2 测量原理

采用单一比较测量法^[7]测量目标样片表面的双向反射分布函数。实验中的标准参考板是用聚四氟乙烯(F4)粉压制的白板,其半球反射率为 $\rho(\lambda)$,它由中国计量科学研究院标定,实验中所用白板的光谱反射比值非常高,基本都是在 92.5%~95%之间。标准参考板的双向反射分布函数则为 $\rho(\lambda)/\pi$,用于光谱 BRDF 测量的公式为:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) = \frac{L_s(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) \cos 30^\circ \rho(\lambda)}{L_b(30^\circ, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) \cos \theta_r \pi} \quad (1)$$

式中: (θ, φ) 分别是球坐标下的天顶角和方位角, 下标 i, r 分别代表入射量和反射量; $f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)$ 为波长 λ 时目标样片的光谱 BRDF; $L_s(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)$ 为入射光沿 (θ_i, φ_i) 方向入射到待测样片上, 沿 (θ_r, φ_r) 方向出射的谱辐射亮度; $L_b(30^\circ, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)$ 为入射光沿 $(30^\circ, \varphi_i)$ 方向入射到标准白板上, 沿 (θ_r, φ_r) 方向出射的谱辐射亮度。特别是对于各向同性的表面, 可以设 $\varphi_i=0^\circ, \varphi_r=\varphi_i-\varphi_r=\varphi_r$, 则双向反射分布函数可以降为关于 $\theta_i, \theta_r, \varphi_r$ 的函数 $f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 。这样, 只需对标准板测量入射角度为 30° 时的一组数据, 就可以由上式求得待测样片在 $380\sim 780\text{ nm}$ 内的光谱 BRDF。

1.3 测量结果

根据目标样片硅太阳能电池板和标准板的光谱辐射亮度就可通过公式(1)计算得到目标样片的光谱 BRDF, 由于是采用比较法获得的, 样片和标准板所用测量系统的光源和探测器等仪器响应及系统偏差是一样的, 故样片的光谱 BRDF 是和具体光源没有关系的, 从而可以通过样片的光谱 BRDF 来分析描述样片的光散射特性。图 2(a)~(f) 给出了太阳能电池板在入射方位角 $\varphi_i=0^\circ$ 、不同入射天顶角下, 散射方位角 $\varphi_r=180^\circ$ 时镜像点附近样片的光谱 BRDF 随波长的分布趋势。从图 2 中可以看出, 样片在不

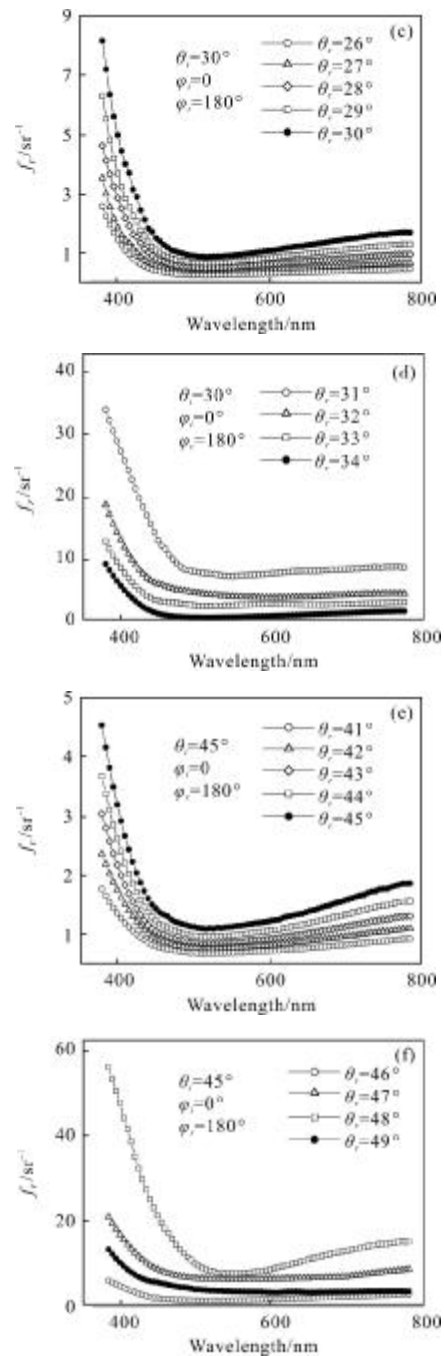
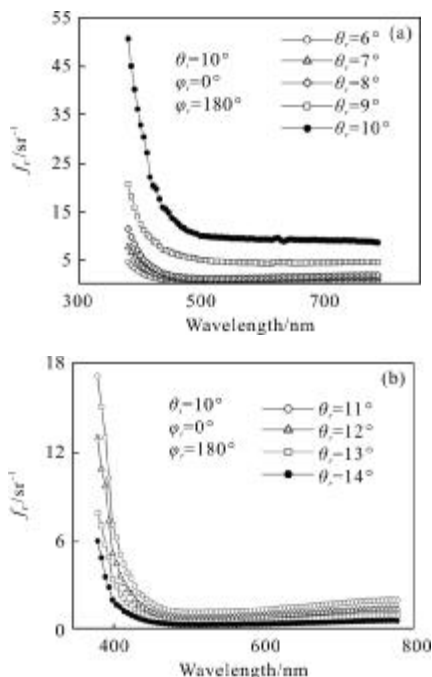


图 2 硅太阳能电池板的光谱双向反射分布函数

Fig.2 Spectral BRDF of silicon solar cell panel

同入射天顶角下, 镜像点附近的 BRDF 随波长变化趋势比较相似。当入射天顶角 $\theta_i=10^\circ$, 反射天顶角 $\theta_r=6^\circ, 7^\circ, 8^\circ, 9^\circ, 10^\circ$ 时, 样片的光谱 BRDF 随波长分布趋势基本相同, 而且随着反射天顶角越靠近镜像方向, 样片的光谱 BRDF 值会逐渐增大, 在反射天顶角 $\theta_r=11^\circ, 12^\circ, 13^\circ, 14^\circ$ 时, 样片的光谱 BRDF 值会随着反射天顶角的增大而逐渐减小。进一步发现反射天顶角

$\theta_i=10^\circ$ 时的 BRDF 值明显大于镜像方向附近其他反射天顶角的 BRDF 值,该方向正好对应于镜像方向,这也说明样片的漫反射部分所占比例较小,镜反射部分起主要作用,这和样片比较光滑的表面特征是相符的。但在入射天顶角 $\theta_i=30^\circ$ 、 45° 时,其所对应的 BRDF 最大值分别为 31° 、 46° ,这是由测量仪器的转角控制误差引起的。从图 2 中可以看出,样片在可见光波段 BRDF 谱分布趋势基本相同。在大约 380~500 nm 之间的 BRDF 谱分布呈下降趋势,特别是在 380~420 nm 波段,样片的光谱 BRDF 值很大,表明样片对此波段的光的吸收作用较弱,对光的反射特性起主要作用。在 500~780 nm 之间呈缓慢上升趋势(但对特别曲线除外,这与样片表面涂层的性质和粗糙度有关),表明样片对此波段的光有较强的吸收作用。图 3、4 是样片在入射天顶角 $\theta_i=10^\circ$ 、 30° , 散射方位角为 180° 时的光谱 BRDF。可以看到, BRDF 值抖动得很厉害,这是由于在这些散射角下光谱 BRDF 值很小,这可能是由实验误差引起的。同时也表明散射光线与入射光线

反方向的夹角越大,则其相应 BRDF 值会逐渐减小,但是它们的 BRDF 谱分布趋势是基本一致的。同时,实验还测量了 $\theta_i=10^\circ$, 散射方位角为 135° 、 90° 时的光谱 BRDF,如图 5 所示,可以看到,在相同反射天顶角情况下,反射方位角 90° 的 BRDF 值与 135° 相比较要小很多。

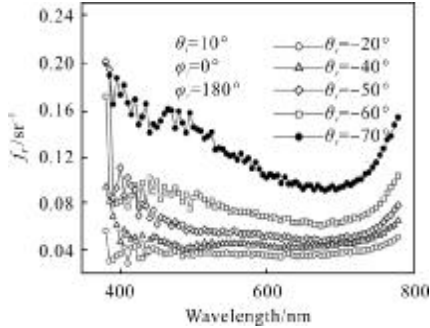


图 3 10° 入射时硅太阳能电池板的光谱双向反射分布函数的测量值

Fig.3 Measured spectral BRDF of silicon solar cell panel at incident angle of 10°

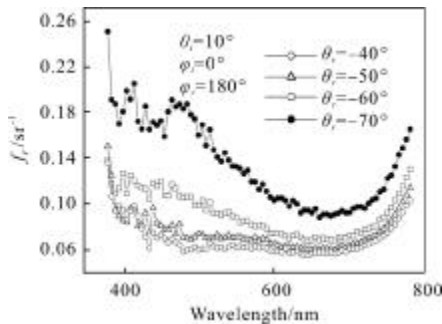


图 4 30° 入射时硅太阳能电池板的光谱双向反射分布函数的测量值

Fig.4 Measured spectral BRDF of silicon solar cell panel at incident angle of 30°

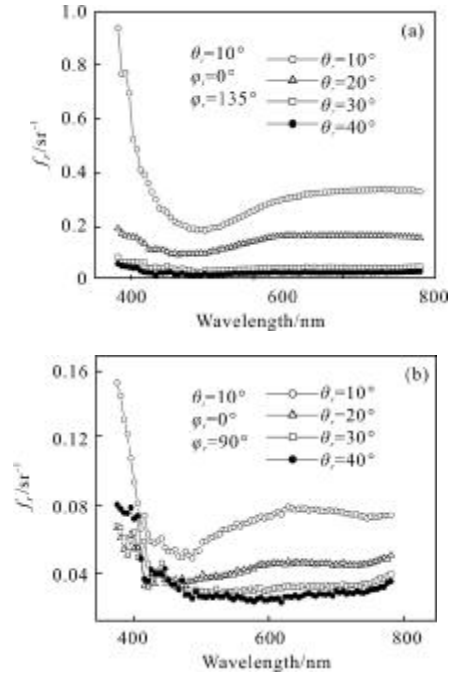


图 5 10° 入射时硅太阳能电池板的光谱双向反射分布函数测量值

Fig.5 Measured spectral BRDF of silicon solar cell panel at incident angle of 10°

使用 JascoV-570 型分光光度计加积分球附件测量了硅太阳能电池板在可见光波段 380~780 nm 的方向半球反射率谱,如图 6 所示,发现样片在可见光波段 BRDF 谱分布和方向半球反射率谱的分

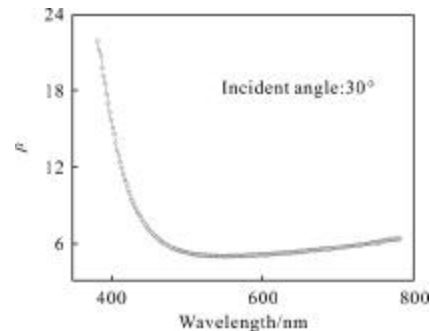


图 6 硅太阳能电池板的方向半球反射率测量值

Fig.6 Measured directional hemisphere reflectance of silicon solar cell panel

布趋势基本是一致,这是因为方向半球反射率与双向反射分布函数之间存在一个积分关系式^[12]。

2 硅太阳能电池板的色度特性

2.1 双向反射分布函数与光谱反射率因数的关系

物体的光谱反射率因数 $\beta(\lambda)$ 定义为:在给定的立体角和限定的方向上,待测物体反射的辐通量 $\phi_\lambda d\lambda$ 与在相同照明、相同方向上完全反射漫射体反射的辐通量 $\phi_{0\lambda} d\lambda$ 之比,即:

$$\beta(\lambda) = \frac{\phi_\lambda d\lambda}{\phi_{0\lambda} d\lambda} \quad (2)$$

光谱反射率因数本质上就是物体的光谱反射因数,它是对物体反射特性的定量描述,是物体本身的固有特性,不受照射光源影响。

而双向反射分布函数可以描述各类材料与涂层表面光散射与辐射的空间分布特性以及光谱特性,双向反射分布函数是方向出射的辐射亮度 $dL_r(\theta_r, \varphi_r; \theta_i, \varphi_i)$ 与入射辐照度 $dE_i(\theta_i, \varphi_i)$ 之比^[6]:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (3)$$

尽管双向反射分布函数能够准确地描述物体的反射特性,但在一般情况下则显得非常复杂,尤其是精确测量物体表面的照度通常是很困难的,为此引入双向反射系数 $\beta(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$, 其定义为:样品表面反射通量与在同样入射和反射条件下的理想朗伯体的反射通量之比^[13], 即

$$\beta(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{d\phi_r}{d\phi_{r, ideal}} \quad (4)$$

式中: $d\phi_r$ 为样品表面面元 dA 反射至立体角 $d\Omega_r$ 内的通量; $d\phi_{r, ideal}$ 为理想朗伯体的反射通量。

双向反射系数描述了光以任意入射方向照射物体表面情况下,经表面反射后沿任意方向的反射特性,不依赖于照射光源。

而双向反射系数与双向反射分布函数之间具有 π 关系^[13], 即

$$\beta(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \pi f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \quad (5)$$

从公式(2)、(4)的定义式可以看到,双向反射系数与光谱反射率因数的定义方式相同,双向反射系数 $\beta(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 即为色度学中的光谱反射率因数 $\beta(\lambda)$ 。

国际照明委员会(CIE)规定了4种光谱反射率因数测量方法——0/45、45/0、0/d、d/0。在0/45、45/0以及d/0三种照明和观测条件下测得的光谱反射率因数分别记为 $\beta_{0/45}$ 、 $\beta_{45/0}$ 、 $\beta_{d/0}$, 只有在0/d条件下测得的光谱反射率因数可以叫做光谱反射率 ρ , 即为半球反射率。可以通过光谱 BRDF 实验测量获得物体表面在任意入射方向照射下沿任何观测方向的双向反射系数,这种方法超越了传统测量方法的局限,最后利用色度学理论计算出物体表面在任意观测方向上的色度值,更能全面精确地反映物体表面的色度特性。

2.2 硅太阳能电池板的色度计算

这里采用的是 CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 颜色空间对物体颜色进行定量度量,该颜色空间又称为 CIELAB 颜色空间。在这一坐标系统中,有一个垂直的明度轴 L^* 和 a^* 、 b^* 两个色品轴。明度 L^* 取值 0~100, $L^*=0$ 表示黑色, $L^*=100$ 表示白色。 $+a^*$ 表示红色方向, $-a^*$ 表示绿色方向, $+b^*$ 表示黄色方向, $-b^*$ 表示蓝色方向。 C^* 为颜色的彩度, $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$, 表示明度轴到色空间某一点的水平径向距离, C^* 越大,表明色彩的饱和度越大。CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 颜色空间中明度 L^* 和色品指数 a^* 、 b^* 的计算公式为:

$$\begin{cases} L^* = 903.3 (Y/Y_n) & (Y/Y_n \leq 0.008 856) \\ a^* = 389 3.5 (X/X_n - Y/Y_n) & (X/X_n \leq 0.008 856) \\ b^* = 155 7.4 (Y/Y_n - Z/Z_n) & (Z/Z_n \leq 0.008 856) \end{cases} \quad (6)$$

式中: X_n 、 Y_n 、 Z_n 为 CIE 标准照明体照射在完全漫反射体上,再经完全漫反射体反射到观察者眼中的三刺激值,可由相关标准直接查得。 X 、 Y 、 Z 为物体颜色的三刺激值,是表征颜色的最基本参数,色度学中其他各种表色数据都是由这三个参数换算而来的。

物体颜色的三刺激值 X 、 Y 、 Z 的具体计算公式如下:

$$\begin{cases} X = k \int_{\lambda} \beta(\lambda) s(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = k \int_{\lambda} \beta(\lambda) s(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z = k \int_{\lambda} \beta(\lambda) s(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (7)$$

式中: $s(\lambda)$ 为照明光源的相对光谱功率分布; $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$

$\bar{z}(\lambda)$ 为标准观察者的光谱三刺激值; $\beta(\lambda)$ 为样品的光谱反射率因数; k 为归化系数, $k=100/\sum_{\lambda} s(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda$ 。

在实际计算中,用求和来近似积分,求和的表达式为:

$$\begin{cases} X=k \sum_{\lambda} \beta(\lambda)s(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda \\ Y=k \sum_{\lambda} \beta(\lambda)s(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda \\ Z=k \sum_{\lambda} \beta(\lambda)s(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda \end{cases} \quad (8)$$

计算出物体颜色的三刺激值后,可由下式计算出物体的色度坐标为:

$$\begin{cases} x=\frac{X}{X+Y+Z} \\ y=\frac{Y}{X+Y+Z} \\ z=\frac{Z}{X+Y+Z} \end{cases} \quad (9)$$

在色度学中,根据所测得硅太阳能电池板的方

向半球反射率谱,可以计算出其在 D_{65} 标准光源和 2° 标准观察视场下的色度,光谱三刺激值分别为 $X=535.98$ 、 $Y=521.13$ 、 $Z=779.25$,色度坐标 $x=0.2919$ 、 $y=0.2838$ 、 $z=0.4243$,明度指数 $L^*=185.11$,色品指数 $a^*=23.8$ 、 $b^*=-40.5$ 。

由于双向反射系数相当于色度学中的光谱反射率因数,就可根据所获得的样片的光谱 BRDF,利用公式(8)计算出目标样片在不同观测方向上的颜色三刺激值 X, Y, Z 。采用等波长间隔法计算目标样片的颜色三刺激值,波长间隔 $\Delta\lambda$ 为 5 nm ,波长 λ 范围是 $380\sim 780\text{ nm}$ 。在颜色计算中,选用 D_{65} 标准光源和 2° 标准观察视场。计算结果表明:样品的 $X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n$ 均大于 0.008856 ,因此 CIELAB 色空间中的 $L^*a^*b^*$ 指数可由公式(6)计算出来,计算结果见表 1。其中 X_n, Y_n, Z_n 分别为 $94.83, 100.00$ 和 107.38 。

表 1 数据表明,色品指数 a^* 是大于零的,当反射方向越偏离 BRDF 最大值所对应的方向时,一般来讲,色品指数会减小,说明它的红色成分在减弱;

表 1 硅太阳能电池板的色度指数($D_{65}/2^\circ$)
Tab.1 Color indexes of silicon solar cell panel($D_{65}/2^\circ$)

$\theta_1(^{\circ})$	$\varphi_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	L^*	a^*	b^*	C^*	x	y	Y
10	180	6	77.40	18.4	-22.2	28.8	0.2958	0.2727	52.20
		7	92.58	24.6	-28.1	37.3	0.2957	0.2675	82.04
		8	105.43	30.5	-35.2	46.6	0.2931	0.2608	114.70
		9	176.50	16.9	-43.4	46.6	0.2830	0.2809	456.98
		10	230.17	27.5	-59.3	65.4	0.2833	0.2767	955.68
		11	110.33	30.7	-36.7	47.8	0.2918	0.2610	128.93
		12	93.61	31.5	-35.4	47.4	0.2916	0.2533	84.36
		13	82.11	25.8	-29.7	39.3	0.2921	0.2580	60.50
		14	69.70	19.4	-24.2	31.0	0.2913	0.2633	40.32
		26	58.02	20.4	-21.9	29.9	0.2952	0.2585	25.98
		27	67.34	23.8	-24.0	33.8	0.2980	0.2593	37.09
		28	78.66	27.9	-28.2	39.7	0.2974	0.2571	54.34
		29	88.59	31.2	-31.6	44.4	0.2970	0.2563	73.29
		30	180	30	98.70	35.2	-38.0	51.8	0.2925
31	214.04			48.8	-79.5	93.3	0.2771	0.2530	779.93
32	171.79			17.1	-47.2	50.2	0.2785	0.2759	424.27
33	147.03			20.3	-29.2	35.6	0.2971	0.2876	277.59
34	95.46			40.0	-40.6	57.0	0.2932	0.2431	88.70

续表 1 硅太阳能电池板的色度指数(D₆₅/2°)
Continued Tab.1 Color indexes of silicon solar cell panel(D₆₅/2°)

$\theta_1(^{\circ})$	$\varphi_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	L*	a*	b*	C*	x	y	Y
		41	57.18	17.9	-18.7	25.9	0.298 7	0.267 0	25.11
		42	65.61	20.0	-21.1	29.1	0.298 4	0.266 6	34.83
		43	73.06	22.4	-22.5	31.7	0.300 5	0.267 3	45.25
		44	81.66	23.5	-23.8	33.4	0.300 7	0.269 3	59.68
45	180	45	90.06	25.0	-25.2	35.5	0.301 1	0.270 6	76.43
		46	119.24	24.1	-18.47	30.4	0.313 0	0.292 4	158.46
		47	200.87	20.8	-36.0	41.6	0.295 5	0.291 7	653.44
		48	223.23	91.2	-128.6	157.7	0.263 2	0.215 2	877.11
		49	162.68	16.0	-44.5	47.3	0.278 8	0.276 4	365.45
		10	57.28	11.9	1.6	12.0	0.342 7	0.323 4	25.21
10	135	20	43.94	5.2	9.1	10.5	0.356 7	0.354 4	13.79
		30	23.75	3.9	-0.4	3.9	0.326 6	0.321 7	4.02
		40	17.28	2.8	0.3	2.8	0.328 0	0.326 3	2.36
		10	31.05	2.7	4.3	5.1	0.340 5	0.344 9	6.67
10	90	20	23.71	2.5	2.1	3.3	0.333 7	0.336 9	4.01
		30	19.61	3.8	-4.8	6.1	0.302 7	0.296 9	2.89
		40	17.81	3.4	-7.7	8.4	0.284 3	0.279 9	2.48

色品指数 b^* 一般是小于零的,当反射方向越偏离 BRDF 最大值所对应的方向时,一般来讲,色品指数数值上也会减小,说明它的蓝色成分在减弱。从表中发现,在任意入射情况下,光谱 BRDF 值最大的观测方向所对应的颜色的明度指数 L^* 和亮度因数也都达到最大,越偏离光谱 BRDF 值最大观测方向,颜色的明度指数和亮度因数也会相应减小。

从图 2、3、4、5 表明,样片在不同观测方向上的光谱 BRDF 是有差异的,这种差异会导致所得到样片的色度会有所不同(同色异谱现象除外),但是由于样片光谱 BRDF 变化的基本趋势是相仿的,虽然光谱 BRDF 的差异一般会导致三刺激值的不同,但是不会较大程度改变三刺激值之间的比例,而色度坐标 x 、 y 、 z 正是反映了三刺激值之间的比例关系,因此,表 1 中数据表明,不同观

测方向上所得目标样片的色度坐标变化较小。

表 1 数据表明,在不同入射条件下,样片的饱和度最大的方向正好与光谱 BRDF 最大值所对应的观测方向相对应,这是因为色彩的饱和度是与和物体表面粗糙度有关,由于硅太阳能电池板表面比较光滑,反射光是具有方向性的,光谱 BRDF 最大值所对应的观测方向正好是反射光最集中的方位,因此所看到样片的颜色相对于其他观测方向饱和度最大。而对于其他观测方向,特别是在其他方位角下的观测方向,所测得光谱 BRDF 值很小,所以颜色的饱和度很低。

由于光谱 BRDF 是待测样片光散射的固有属性,与光源种类、接收器以及其他测量条件等因素无关,因此可以通过物体表面的光谱 BRDF 计算出任意光源照射下样片的色度,表 2 为硅太阳能电池板在标准照明体 A 照射下的色度值。

表 2 硅太阳能电池板的色度指数(A/2°)
Tab.2 Color indexes of silicon solar cell panel(A/2°)

$\theta_1(^{\circ})$	$\varphi_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	L*	a*	b*	C*	x	y	Y
		6	77.86	29.4	38.7	48.6	0.442 7	0.378 4	52.98
		7	93.29	36.3	44.0	57.0	0.444 1	0.374 8	83.65
		8	106.25	42.2	47.0	63.2	0.442 8	0.370 6	117.06
		9	175.27	41.8	74.8	85.7	0.423 7	0.385 2	448.32
10	180	10	267.55	41.8	112.3	119.8	0.413 0	0.393 7	1460.56
		11	201.41	49.4	84.5	97.9	0.424 6	0.383 8	658.40
		12	110.98	42.9	48.6	64.8	0.441 4	0.371 1	131.16
		13	94.51	40.7	40.8	57.6	0.443 6	0.365 8	86.46
		14	82.79	34.8	37.4	51.1	0.442 7	0.368 9	61.78
		26	58.70	27.3	28.8	39.7	0.446 1	0.368 6	26.70
		27	68.25	31.9	33.1	46.0	0.449 6	0.368 3	38.31
		28	79.71	36.9	37.0	52.3	0.449 5	0.366 7	56.17
		29	89.75	41.1	40.6	57.8	0.449 5	0.365 9	75.76
30	180	30	99.81	44.7	42.1	61.4	0.445 3	0.363 1	99.51
		31	263.83	38.7	94.2	101.8	0.400 6	0.384 3	1403.82
		32	213.45	66.1	75.2	100.1	0.423 0	0.367 4	773.93
		33	170.27	39.5	69.5	79.9	0.419 4	0.382 9	414.06
		34	147.24	43.0	71.2	83.2	0.439 0	0.387 5	278.70
		41	57.83	26.7	29.8	40.0	0.448 9	0.371 6	25.78
		42	66.33	29.9	33.1	44.6	0.448 9	0.371 5	35.75
		43	73.94	33.5	36.7	49.7	0.451 5	0.371 3	46.62
		44	82.58	36.1	40.6	54.3	0.451 1	0.372 6	61.38
45	180	45	91.05	38.9	44.5	59.1	0.451 4	0.373 3	78.59
		46	120.64	47.2	65.1	80.4	0.459 4	0.384 3	163.44
		47	200.68	53.9	95.0	109.2	0.437 1	0.389 5	651.78
		48	222.97	93.8	49.6	106.1	0.415 7	0.337 5	874.25
		49	161.24	37.8	65.9	76.0	0.419 3	0.382 6	356.73

3 结 论

实验测量了硅太阳能电池板在可见光波段的光谱 BRDF, 分析了光谱双向反射分布函数随波长及散射角的变化趋势, 分析了光散射理论中的双向反射分布函数、双向反射系数与色度学中光谱反射率因数之间的联系, 提出了一种通过光谱 BRDF 测量去实现物体色度特性的方法。并且采用 CIELAB 均

匀色空间中的明度指数 L 和色品指数 a^* 、 b^* 定量地描述了不同入射条件下、不同散射方向目标样片的颜色特性。这种利用光谱 BRDF 测量获得目标样片色度特性的方法超越了传统测量方法的局限, 更能全面精确地反映物体表面的色度特性。

参考文献:

- [1] Wang Mingjun, Dong Yanbing, Wu Zhensen, et al. Research

- on light scattering characteristics of rough surface and optical constants deduction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(5): 549-552. (in Chinese)
- 王明军, 董雁冰, 吴振森, 等. 粗糙表面光散射特性研究与光学常数反演[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(5): 549-552.
- [2] Laurent Bousquet, Sophie Lacherad, Stephane Jacquemoud. Leaf BRDF measurements and model for specular and diffuse components differentiation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(2): 201-211.
- [3] Sun Pengju, Gao Wei, Wang Yuefeng. Calculation and application of laser radar cross section for targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 597-607. (in Chinese)
- 孙鹏举, 高卫, 汪岳峰. 目标激光雷达截面的计算方法及应用研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(5): 597-607.
- [4] Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Scattering characteristic of complex background infrared radiation from a non-lambertian target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 800-804. (in Chinese)
- 杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 非朗伯面目标对复杂背景红外辐射的散射特性[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(5): 800-804.
- [5] Cook R L, Torrance K E. A reflectance model for computer graphics [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1982, 1(1): 7-24.
- [6] Wu Zhensen, Han Xiang'e, Zhang Xiangdong. Experimental study on bidirectional reflectance distribution functions of laser scattering from various rough surfaces [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(3): 262-268. (in Chinese)
- 吴振森, 韩香娥, 张向东. 不同表面激光双向分布函数的实验测量[J]. *光学学报*, 1996, 16(3): 262-268.
- [7] Wu Zhensen, Xie Donghui, Xie Pinhua. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(8): 897-901. (in Chinese)
- 吴振森, 谢东辉, 谢品华. 粗糙表面激光散射统计建模及其算法[J]. *光学学报*, 2002, 22(8): 897-901.
- [8] Jia Hui, Li Futian. Bidirectional reflectance distribution function of aluminum diffuser at UV spectral band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(2): 230-234. (in Chinese)
- 贾辉, 李福田. 铝漫反射板 200-300 nm 相对双向反射分布函数的实验研究[J]. *光学学报*, 2004, 24(2): 230-234.
- [9] Cao Yunhua, Wu Zhensen, Zhang Hanlu, et al. Experimental measurement and statistical modeling of spectral bidirectional reflectance distribution function of rough target sample[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 792-798. (in Chinese)
- 曹运华, 吴振森, 张涵璐, 等. 粗糙目标样片光谱双向反射分布函数的实验测量及其建模[J]. *光学学报*, 2008, 28(4): 792-798.
- [10] Wang Anxiang, Zhang Hanlu, Wu Zhensen, et al. Experiment measurements and optimal modeling of goal surface's visible spectrum BRDF [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(5): 655-658. (in Chinese)
- 王安祥, 张涵璐, 吴振森, 等. 目标表面可见光谱 BRDF 的实验测量及优化建模[J]. *光学技术*, 2008, 34(5): 655-658.
- [11] Angelopoulou E. The reflectance spectrum of human skin[R]. Technical Report MS-CIS-99-29, Philadelphia, Pennsylvania, USA: GRASP Laboratory, University of Pennsylvania, 1999.
- [12] Lionel Simonot, Mathieu Hebert, Damien Dupraz. Goniocolorimetry: from measurement to representation in the CIELAB color space [J]. *Color Research and Application*, 2011, 36(3): 169-178.
- [13] Qiao Lijie, Yang Yang, Liu Libao, et al. π -relation of reflectance function and reflectance factor in LIDAR system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, 28(5): 60-62. (in Chinese)