



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109342329 A

(43)申请公布日 2019.02.15

(21)申请号 201811258058.0

(22)申请日 2018.10.26

(71)申请人 长春理工大学

地址 130000 吉林省长春市卫星路7089号

(72)发明人 谭勇 宋薇 贾强 蔡红星 石晶

辛敏思 姚治海 任玉

(74)专利代理机构 吉林省长春市新时代专利商

标代理有限公司 22204

代理人 高一明

(51)Int.Cl.

G01N 21/25(2006.01)

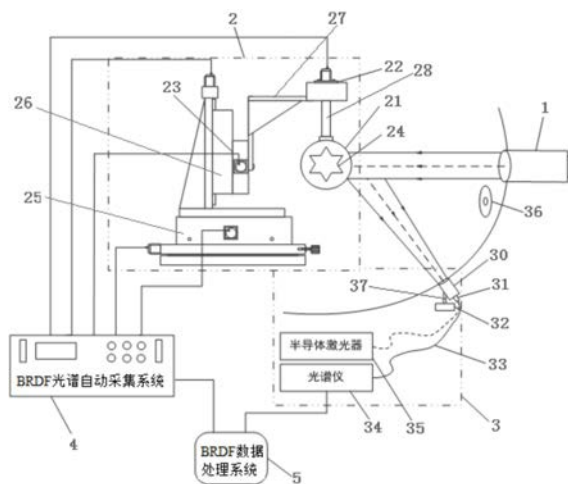
权利要求书3页 说明书8页 附图4页

(54)发明名称

BRDF自动测试系统及测试方法

(57)摘要

一种BRDF自动测试系统及测试方法,测试系统包括:太阳模拟器、电动位移台、探测系统、BRDF光谱自动采集系统、BRDF数据处理系统;太阳模拟器发出的可见光束射到电动位移台的样品上;电动位移台,用于实现样品在三维空间的移动和旋转;探测系统包括可移动平台、安装在可移动平台上的二维旋转平台、望远镜、光纤探头、通过探测光纤与光纤探头连接的光谱仪;所述BRDF光谱自动采集系统用于控制电动位移台动作,使电动位移台带动样品在空间内以任意角度旋转;控制探测系统的光谱仪对样品任意角度的散射光谱进行采集;所述BRDF数据处理系统,用于处理采集后的光谱数据,得到不同角度下的BRDF数据。该系统探测距离可调,可实现远距离、大体积物体的探测,探测精度高。



1. 一种BRDF自动测试系统,其特征在于,包括:太阳模拟器、电动位移台、探测系统、BRDF光谱自动采集系统、BRDF数据处理系统;其中:所述太阳模拟器的出光口前端放置有光阑,太阳模拟器作为入射光源,发出均匀的、平行的可见光束,再经过光阑限束后,将入射光垂直照射到电动位移台的样品上;

所述电动位移台,用于摆放样品,实现样品在三维空间的移动和旋转;

所述探测系统包括可移动平台、安装在可移动平台上的二维旋转平台、安装在二维旋转平台上的望远镜、与望远镜连接的光纤探头、通过探测光纤与光纤探头连接的光谱仪;其中,所述可移动平台绕样品 0° - 360° 旋转,能实现任意角度的探测,且探测距离可调;所述二维旋转平台固定在可移动平台的几何中心处,用来调节望远镜的探测角度;所述望远镜固定在二维旋转平台的旋转轴心处;

所述BRDF光谱自动采集系统安装有海洋光谱软件、PC系列位移台驱动软件,BRDF光谱自动采集系统分别与电动位移台和探测系统连接,用于控制电动位移台动作,使电动位移台带动样品在空间内以任意角度旋转;同时控制探测系统的光谱仪对样品任意角度的散射光谱进行采集;

所述BRDF数据处理系统与BRDF光谱自动采集系统连接,用于处理采集后的光谱数据,得到不同角度下的BRDF数据。

2. 根据权利要求1所述的一种BRDF自动测试系统,其特征在于,所述的BRDF自动测试系统需要安装在室内,所述的室内为光学暗室,暗室全封闭设计,且内部涂有消光漆,墙面反射率小于3%。

3. 根据权利要求1所述的一种BRDF自动测试系统,其特征在于,所述太阳模拟器为大型太阳模拟器,辐照度为1/10太阳常数,入射角水平,光源口径30mm,发散角 1.18° 。

4. 根据权利要求1所述的一种BRDF自动测试系统,其特征在于,所述的电动位移台包括水平平移台、安装在水平平移台上的竖直平移台、安装在竖直平移台上的转动平台、安装在转动平台上的样品台;所述水平平移台能够前后、左右移动;所述转动平台包括绕着X轴旋转的第三转盘、绕着Y轴旋转的第二转盘、绕着Z轴旋转的第一转盘;样品摆放在电动位移台的样品台上,通过水平平移台和竖直平移台来调整样品与入射光源之间的距离和高度;电动位移台在空间旋转范围的XYZ轴由第一转盘、第二转盘、第三转盘控制。

5. 根据权利要求1所述的一种BRDF自动测试系统,其特征在于,所述BRDF光谱自动采集系统包括位移台驱动模块、数据采集模块、探测端驱动模块、光谱采集模块、数据存储模块;其中,所述位移台驱动模块,用于控制电动位移台动作,使样品在三维空间任意旋转;所述数据采集模块,用于对电动位移台旋转的角度、移动的位置进行采集;所述探测端驱动模块,用于控制探测系统,使其移动到所需的探测位置,同时调节望远镜焦距使其达到指定的探测口径;所述光谱采集模块,用于对样品散射光谱实时的采集,并按照命名规则将散射光谱数据存储到数据存储模块内。

6. 根据权利要求4所述的一种BRDF自动测试系统,其特征在于,所述水平平移台、竖直平移台上的移动部均安装在精研丝杆上,通过电机驱动,实现水平方向上的前后、左右调节和竖直方向的上下的调节;行程精度: $1\mu\text{m}$,这样可实现样品位置的高精度调整。

7. 根据权利要求4所述的一种BRDF自动测试系统,其特征在于,所述竖直平移台设置在水平平移台的移动部上;在竖直平移台的移动部上安装有转轴;所述第三转盘安装在转轴

上,通过转轴实现第三转盘绕着X轴旋转;在所述第三转盘上安装有连接架,通过连接架将第三转盘与第二转盘连接;所述第二转盘通过连接杆与第一转盘连接;所述第一转盘上安装有样品盘;所述第三转盘绕着X轴旋转,旋转范围 $0\sim 180^\circ$,定位精度:0.002度;所述第二转盘绕着Y轴旋转,旋转范围 $0\sim 360^\circ$,定位精度:0.002度;所述第一转盘绕着Z轴旋转,旋转范围 $0\sim 360^\circ$,定位精度:0.1度。

8. 权利要求1所述的一种BRDF自动测试系统的测试方法,其特征在于,具体包括如下步骤:

步骤S100、通过探测系统对探测角度进行设定;

步骤S200、利用BRDF光谱自动采集系统中的位移台驱动模块控制电动位移台转动,同时通过探测端驱动模块控制探测系统动作,控制光谱仪采集光谱,并按照命名规范存储光谱;

步骤S300、BRDF数据处理系统将BRDF光谱自动采集系统采集到的数据经过处理得到样品的BRDF数据;

其中,步骤S100对探测角度进行设定时,首先校准转台零位,在太阳模拟器的出光口处安装光阑;在第一转盘的圆心安装平面镜;调整第一转盘绕Y轴旋转,使太阳模拟器发出的光通过小孔光阑照在平面镜上,平面镜发射的光能反射回小孔光阑处;调整竖直和水平方向的平移台,使光点在第一转盘的圆心;测量镜面到第三转盘前表面的距离,调整第一转盘前后的位置,同第二转盘的上表面与第三转盘旋转中心轴的距离相等;以各种角度旋转第二转盘和第三转盘,使平面镜反射光束与中心光束的轴心重合;BRDF光谱自动采集系统控制电动位移台的第二转盘绕Y轴转动所需探测角度的一半;将半导体激光器用探测光纤耦合连接到探测系统;移动二维旋转平台,调整望远镜,调整激光束照到平面反射镜,若两束光的几何光轴重合,则探测角度调整设定完毕。

9. 权利要求8所述的一种BRDF自动测试系统的测试方法,其特征在于,

所述步骤S200中,在BRDF光谱自动采集系统中输入存储路径、样品名称、转动角度的范围、转动角度间隔、转动的初始角度以及曝光时间后,点击“开始”进行光谱测量;其中,角度间隔最低可达到 1.8° ,曝光时间参数自适应,可以根据测量的光谱信号强弱自动调整曝光时间长短,以txt格式存储光谱数据,名称按照“序号-样品名称-水平角度-俯仰角度-曝光时间”的格式存储。

10. 权利要求1所述的一种BRDF自动测试系统的测试方法,其特征在于,所述步骤S300中,BRDF数据处理系统对数据进行处理时,包括如下步骤:

步骤S310:定义电动位移台带动样品在XYZ空间转动,第二转盘带动样品绕Y轴的转角为 α 角,第三转盘带动样品绕X轴的转角为 β 角,第一转盘带动样品绕Z轴的转角为 δ 角;Z轴与探测系统夹角为 γ 角,以上角度逆时针转动为正,顺时针转动为负,x、y、z为初始位置坐标;

步骤S320:在以转动平台的转轴初始位置确定的三维空间中,电动位移台的转动角度与空间位置坐标的转换关系为:

$$\begin{cases} x_0 = x \cos \alpha \cos \delta - z \sin \alpha \cos \delta + x \sin \alpha \sin \beta \sin \delta + y \cos \beta \sin \delta + z \cos \alpha \sin \beta \sin \delta \\ y_0 = x \sin \alpha \sin \beta \cos \delta + y \cos \beta \cos \delta + z \cos \alpha \sin \beta \cos \delta - x \cos \alpha \sin \delta + z \sin \alpha \sin \delta \\ z_0 = x \sin \alpha \cos \beta - y \sin \beta + z \cos \alpha \cos \beta \end{cases}$$

步骤S330:由步骤S320带入光源的初始位置得光源的空间位置坐标:

$$\begin{cases} x_i = z \cos \alpha \sin \beta \sin \delta - z \sin \alpha \cos \delta \\ y_i = z \cos \alpha \sin \beta \cos \delta + z \sin \alpha \sin \delta \\ z_i = z \cos \alpha \cos \beta \end{cases}$$

步骤S340:由公式

$$\cos \theta_i = \frac{z_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}}$$

$$\tan \varphi_i = \frac{z_i}{x_i}$$

将光源在XYZ坐标系中的空间位置坐标带入,得到入射角 θ_i ,得到入射方位角 φ_i ;

步骤S350:由步骤S320带入探测端的初始位置得光源的空间位置坐标:

$$\begin{cases} x_r = R \sin \gamma \cos \alpha \cos \delta - R \cos \gamma \sin \alpha \cos \delta + R \sin \gamma \sin \alpha \sin \beta \sin \delta + R \cos \gamma \cos \alpha \sin \beta \sin \delta \\ y_r = R \sin \gamma \sin \alpha \sin \beta \cos \delta + R \cos \gamma \cos \alpha \sin \beta \cos \delta - R \sin \gamma \cos \alpha \sin \delta + R \cos \gamma \sin \alpha \sin \delta \\ z_r = R \sin \gamma \sin \alpha \cos \beta + R \cos \gamma \cos \alpha \cos \beta \end{cases}$$

步骤S360:由公式

$$\cos \theta_r = \frac{z_r}{\sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2}}$$

$$\tan \varphi_r = \frac{z_r}{x_r}$$

将探测端在XYZ坐标系中的空间位置坐标带入公式中得反射角 θ_r ,反射方位角 φ_r 。

步骤S370:实验中只测试物体前表面的反射特性,所以从物理意义上 $z_r \geq 0$,在数学计算中取 z_r 小于0的情况无意义;BRDF自动测试系统筛选掉没有物理意义的光谱数据;

步骤S380:去除散射光谱的背景噪声;

步骤S390:将散射光谱的波长截取400-900nm之间;

步骤S400:将测量得到的样品散射光谱 L_s 及标准板散射光谱 L_b 带入公式:

$$f_{rs}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{L_s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{L_b(\theta'_i, \varphi'_i, \theta'_r, \varphi'_r, \lambda)} \cdot \frac{\cos \theta'_r}{\cos \theta_r} \cdot \frac{\rho}{\pi}$$

计算得到样品的BRDF,式中 $\rho(\lambda)$ 是标准白板的半球反射率,通过计量定标获得。

BRDF自动测试系统及测试方法

技术领域

[0001] 本发明属于光谱测量领域,具体涉及一种BRDF自动测试系统及测试方法,该测试系统是一种采用光源相对位置不动,变换样品和探测端的相对角度,来实现远距离测量样品的散射光谱,并以聚四氟乙烯为标准板来计算样品BRDF的自动测试系统。

背景技术

[0002] 自从BRDF正式提出以来,用于测量该函数的方法已经变得越来越先进。早期采用辐射计测量,现如今双向反射分布函数的测量主要分为两种,一种为应用CCD数码相机的成像式BRDF测量;该方法的优点在于:测试视野范围广,可以在一幅图像中得到多个测量数据,大大缩短了测量时间。缺点在于:测量结果不直观,反射系数算法通常都很复杂,对入射光源及被测物体的颜色或材质有所限制。另一种为利用光谱仪的光谱式BRDF测量。该方法因为具有测试结果直观,且实用性较强等优点,在BRDF测量领域得到了广泛的应用。但是该测量方法尚有不足之处:(1)由于入射光源多采用多波段的激光器、溴钨灯、卤钨灯或利用积分球生成的太阳光,采用溴钨灯或卤钨灯或积分球为光源,溴钨灯或卤钨灯在发光强度和光源均匀性、稳定性方面仍有不足之处,无法保证光源的高稳定性和均匀性,影响光谱测量精度;激光光源虽然稳定性和均匀性较好,但该方法只能实现部分波段的BRDF测量。(2)如在测试手段上多采用样品不动,光源、探测器转动的BRDF测量方法,虽然测量结果直观,但是操作过程繁琐,测试距离有限,且在角度测量精度上有待提高。(3)如果采用样品以二维自由度旋转,探测器和光源以一维自由度的旋转;或采用光源和样品转动,探测器不动的测试方法,在测量结果精度、探测距离、探测视场、以及入射光源等方面有不足之处。

发明内容

[0003] 本发明的第一个目的在于提供一种BRDF自动测试系统,以解决现有测试系统测量结果精度差,测试距离和探测视场受限的技术难题。

[0004] 为实现上述目的,本发明是采用如下技术方案实现的:

[0005] 一种BRDF自动测试系统,包括:太阳模拟器、电动位移台、探测系统、BRDF光谱自动采集系统、BRDF数据处理系统;其中:所述太阳模拟器的出光口前端放置有光阑,太阳模拟器作为入射光源,发出均匀的、平行的可见光束,再经过光阑限束后,将入射光垂直照射到电动位移台的样品上;

[0006] 所述电动位移台,用于摆放样品,实现样品在三维空间的移动和旋转;

[0007] 所述探测系统包括可移动平台、安装在可移动平台上的二维旋转平台、安装在二维旋转平台上的望远镜、与望远镜连接的光纤探头、通过探测光纤与光纤探头连接的光谱仪;其中,所述可移动平台绕样品 0° - 360° 旋转,能实现任意角度的探测,且探测距离可调;所述二维旋转平台固定在可移动平台的几何中心处,用来调节望远镜的探测角度;所述望远镜固定在二维旋转平台的旋转轴心处;

[0008] 所述BRDF光谱自动采集系统安装有海洋光谱软件、PC系列位移台驱动软件,BRDF

光谱自动采集系统分别与电动位移台和探测系统连接,用于控制电动位移台动作,使电动位移台带动样品在空间内以任意角度旋转;同时控制探测系统的光谱仪对样品任意角度的散射光谱进行采集;

[0009] 所述BRDF数据处理系统与BRDF光谱自动采集系统连接,用于处理采集后的光谱数据,得到不同角度下的BRDF数据。

[0010] 作为本发明的优选,所述的BRDF自动测试系统需要安装在室内,所述的室内为光学暗室,暗室全封闭设计,且内部涂有消光漆,墙面反射率小于3%,暗室长宽为10m×8m,高2.5m,通过涂消光漆,以实现杂散光的高效率吸收,保证散射光谱的测量精度。

[0011] 作为本发明的优选,所述太阳模拟器为大型太阳模拟器,辐照度为1/10太阳常数,与B级AM1.5太阳光谱相匹配,辐照均匀度优于±2%,辐照稳定度优于±5%/h,发出均匀的平行可见光,入射角水平,光源口径30mm,发散角1.18°;采用太阳模拟器极大的减小了杂散光对测量结果的影响;所述光阑通光口径8mm/180mm,通过光阑限束,使入射光尽可能高效率的照射到样品上。

[0012] 作为本发明的优选,所述的电动位移台包括水平平移台、安装在水平平移台上的竖直平移台、安装在竖直平移台上的转动平台、安装在转动平台上的样品台;所述水平平移台能够前后、左右移动;所述转动平台包括绕着X轴旋转的第三转盘、绕着Y轴旋转的第二转盘、绕着Z轴旋转的第一转盘;样品摆放在电动位移台的样品台上,通过水平平移台和竖直平移台来调整样品与入射光源之间的距离和高度;电动位移台在空间旋转范围的XYZ轴由第一转盘、第二转盘、第三转盘控制。

[0013] 作为本发明的优选,所述BRDF光谱自动采集系统包括位移台驱动模块、数据采集模块、探测端驱动模块、光谱采集模块、数据存储模块;其中,所述位移台驱动模块,用于控制电动位移台动作,使样品在三维空间任意旋转;所述数据采集模块,用于对电动位移台旋转的角度、移动的位置进行采集;所述探测端驱动模块,用于控制探测系统,使其移动到所需的探测位置,同时调节望远镜焦距使其达到指定的探测口径;所述光谱采集模块,用于对样品散射光谱实时的采集,并按照命名规则将散射光谱数据存储到数据存储模块内。

[0014] 作为本发明的进一步优选,所述水平平移台、竖直平移台上的移动部均安装在精研丝杆上,通过电机驱动,实现水平方向上的前后、左右调节和竖直方向的上下的调节;行程精度:1μm,这样可实现样品位置的高精度调整。

[0015] 作为本发明的进一步优选,所述竖直平移台设置在水平平移台的移动部上;在竖直平移台的移动部上安装有转轴;所述第三转盘安装在转轴上,通过转轴实现第三转盘绕着X轴旋转;在所述第三转盘上安装有连接架,通过连接架将第三转盘与第二转盘连接;所述第二转盘通过连接杆与第一转盘连接;所述第一转盘上安装有样品盘;所述第三转盘绕着X轴旋转,旋转范围0~180°,定位精度:0.002度;所述第二转盘绕着Y轴旋转,旋转范围0~360°,定位精度:0.002度;所述第一转盘绕着Z轴旋转,旋转范围0~360°,定位精度:0.1度。

[0016] 作为本发明的更进一步优选,所述可移动平台最远探测距离为5m;所述二维旋转平台偏转角范围:0~360°,俯仰角范围:-50°~+50°;所述光谱仪波长范围199.36nm-994.96nm,光学分辨率0.47nm(FWHM),信号噪声比6000:1满信号,A/D分辨率16位,暗噪声3RMS计数,积分时间8ms-15min,旋转精度:0.2°。

[0017] 作为本发明的更进一步优选,所述BRDF数据处理系统将测量角度转换为BRDF中对应的角度并计算出BRDF值;转换后的入射角和反射角的角度遍历范围为 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$,入射方位角和反射方位角的角度遍历范围为 $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 。

[0018] 本发明的第二个目的在于提供一种采用上述BRDF自动测试系统对样品的BRDF值进行测量的测试方法,以解决现有测试方法操作过程繁琐,测量结果精度差,测试距离和探测视场受限的技术难题。

[0019] 本发明提供的采用上述BRDF自动测试系统对样品的BRDF值进行测量的测试方法,具体包括如下步骤:

[0020] 步骤S100、通过探测系统对探测角度进行设定;

[0021] 步骤S200、利用BRDF光谱自动采集系统中的位移台驱动模块控制电动位移台转动,同时通过探测端驱动模块控制探测系统动作,控制光谱仪采集光谱,并按照命名规范存储光谱;

[0022] 步骤S300、BRDF数据处理系统将BRDF光谱自动采集系统采集到的数据经过处理得到样品的BRDF数据;

[0023] 其中,步骤S100对探测角度进行设定时,首先校准转台零位,在太阳模拟器的出光口处安装光阑;在第一转盘的中心安装平面镜;调整第一转盘绕Y轴旋转,使太阳模拟器发出的光通过小孔光阑照在平面镜上,平面镜发射的光能反射回小孔光阑处;调整竖直和水平方向的平移台,使光点在第一转盘的中心;测量镜面到第三转盘前表面的距离,调整第一转盘前后的位置,同第二转盘的上表面与第三转盘旋转中心轴的距离相等;以各种角度旋转第二转盘和第三转盘,使平面镜反射光束与中心光束的轴心重合;BRDF光谱自动采集系统控制电动位移台的第二转盘绕Y轴转动所需探测角度的一半;将半导体激光器用探测光纤耦合连接到探测系统;移动二维旋转平台,调整望远镜,调整激光束照到平面反射镜,若两束光的几何光轴重合,则探测角度调整设定完毕;

[0024] 所述步骤S200中,在BRDF光谱自动采集系统中输入存储路径、样品名称、转动角度的范围、转动角度间隔、转动的初始角度以及曝光时间后,点击“开始”进行光谱测量;其中,角度间隔最低可达到 1.8° ,曝光时间参数自适应,可以根据测量的光谱信号强弱自动调整曝光时间长短,以txt格式存储光谱数据,名称按照“序号-样品名称-水平角度-俯仰角度-曝光时间”的格式存储。

[0025] 所述步骤S300中,BRDF数据处理系统对数据进行处理时,包括如下步骤:

[0026] 步骤S310:定义电动位移台带动样品在XYZ空间转动,第二转盘带动样品绕Y轴的转角为 α 角,第三转盘带动样品绕X轴的转角为 β 角,第一转盘带动样品绕Z轴的转角为 δ 角;Z轴与探测系统夹角为 γ 角,以上角度逆时针转动为正,顺时针转动为负,x、y、z为初始位置坐标;

[0027] 步骤S320:在以转动平台的转轴初始位置确定的三维空间中,电动位移台的转动角度与空间位置坐标的转换关系为:

$$[0028] \begin{cases} x_0 = x \cos \alpha \cos \delta - z \sin \alpha \cos \delta + x \sin \alpha \sin \beta \sin \delta + y \cos \beta \sin \delta + z \cos \alpha \sin \beta \sin \delta \\ y_0 = x \sin \alpha \sin \beta \cos \delta + y \cos \beta \cos \delta + z \cos \alpha \sin \beta \cos \delta - x \cos \alpha \sin \delta + z \sin \alpha \sin \delta \\ z_0 = x \sin \alpha \cos \beta - y \sin \beta + z \cos \alpha \cos \beta \end{cases}$$

[0029] 步骤S330:由步骤S320带入光源的初始位置得光源的空间位置坐标:

$$[0030] \begin{cases} x_i = z \cos \alpha \sin \beta \sin \delta - z \sin \alpha \cos \delta \\ y_i = z \cos \alpha \sin \beta \cos \delta + z \sin \alpha \sin \delta \\ z_i = z \cos \alpha \cos \beta \end{cases}$$

[0031] 步骤S340:由公式

$$[0032] \cos \theta_i = \frac{z_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}}$$

$$[0033] \tan \varphi_i = \frac{z_i}{x_i}$$

[0034] 将光源在XYZ坐标系中的空间位置坐标带入,得到入射角 θ_i ,得到入射方位角 φ_i ;

[0035] 步骤S350:由步骤S320带入探测端的初始位置得光源的空间位置坐标:

$$[0036] \begin{cases} x_r = R \sin \gamma \cos \alpha \cos \delta - R \cos \gamma \sin \alpha \cos \delta + R \sin \gamma \sin \alpha \sin \beta \sin \delta + R \cos \gamma \cos \alpha \sin \beta \sin \delta \\ y_r = R \sin \gamma \sin \alpha \sin \beta \cos \delta + R \cos \gamma \cos \alpha \sin \beta \cos \delta - R \sin \gamma \cos \alpha \sin \delta + R \cos \gamma \sin \alpha \sin \delta \\ z_r = R \sin \gamma \sin \alpha \cos \beta + R \cos \gamma \cos \alpha \cos \beta \end{cases}$$

[0037] 步骤S360:由公式

$$[0038] \cos \theta_r = \frac{z_r}{\sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2}}$$

$$[0039] \tan \varphi_r = \frac{z_r}{x_r}$$

[0040] 将探测端在XYZ坐标系中的空间位置坐标带入公式中得反射角 θ_r ,反射方位角 φ_r 。

[0041] 步骤S370:实验中只测试物体前表面的反射特性,所以从物理意义上 $z_r \geq 0$,在数学计算中取 z_r 小于0的情况无意义;BRDF自动测试系统筛选掉没有物理意义的光谱数据;

[0042] 步骤S380:去除散射光谱的背景噪声;

[0043] 步骤S390:将散射光谱的波长截取400-900nm之间;

[0044] 步骤S400:将测量得到的样品散射光谱 L_s 及标准板散射光谱 L_b 带入公式:

$$[0045] f_{rs}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{L_s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{L_b(\theta'_i, \varphi'_i, \theta'_r, \varphi'_r, \lambda)} \cdot \frac{\cos \theta'_r}{\cos \theta_r} \cdot \frac{\rho}{\pi}$$

[0046] 计算得到样品的BRDF,式中 $\rho(\lambda)$ 是标准白板的半球反射率,通过计量定标获得。

[0047] 与现有技术相比,本发明具有的有益效果:

[0048] (1) 本发明针对在全空间范围内的BRDF测量需求,研究高精度、远距离、全空间范围的BRDF测量技术,所提供的测试系统光源采用发光强度、光源稳定性、均匀性高的太阳模拟器,探测距离可调,可实现远距离、大体积物体的探测,可测量直径大于34.5cm的物体的三维空间的BRDF,而且具有角度测量精度高,最高精度为 0.006° ,角度遍历范围全、角度间隔和测量范围可控,且测试过程自动化等优势,该BRDF自动测试系统不仅能实现物体在空间中的连续转动和实时测量,而且可以实现按照规定的角度间隔的间歇性转动和实时测量。

[0049] (2) 本发明总结国内外设计经验,吸收优点,设计了以太阳模拟器为入射光源,探测距离可调,变换样品和探测端的相对角度,目的在于实现远距离、大口径、高精度的BRDF自动测量系统,该系统采用固定光源,转动探测端和样品的相对角度的测量方法,实现380nm-800nm波段的样品BRDF的高精度测量;另外,该系统附带了数据采集和处理模块,可对探测结果进行处理分析,最终得到在全空间范围内随角度变化的样品BRDF。

[0050] (3) 本发明提供的BRDF测量方法操作简单,角度测量精度高,测量结果直观,角度

遍历范围全、角度间隔和测量范围可控,且测试过程可实现自动测量。

附图说明

- [0051] 图1是室内BRDF自动测试系统的结构原理图。
- [0052] 图2是转动平台的转盘与坐标轴的关系。
- [0053] 图3是BRDF光谱自动采集系统的结构框图。
- [0054] 图4是BRDF自动测试系统的操作流程图。
- [0055] 图5是太阳能电池板BRDF测试结果。

具体实施方式

[0056] 为使本领域技术人员清楚本发明的技术方案和优点,下面结合附图和实施例详细说明本发明的技术方案,但并用于限制本发明的保护范围。

[0057] 参见图1,本发明提供的BRDF自动测试系统包括太阳模拟器1、电动位移台2、探测系统3、BRDF光谱自动采集系统4、BRDF数据处理系统5;其中:所述太阳模拟器1的出光口前端放置有光阑36,太阳模拟器作为入射光源,发出均匀的、平行的可见光束,再经过光阑36限束后,将入射光垂直地照射到电动位移台的样品表面;

[0058] 所述的太阳模拟器1为大型太阳模拟器,辐照度为1/10太阳常数,与B级AM1.5太阳光谱相匹配,辐照均匀度优于 $\pm 2\%$,辐照稳定度优于 $\pm 5\%/h$;发出均匀的平行可见光,入射角水平,光源口径30mm,发散角 1.18° ;本发明采用太阳模拟器极大的减小了杂散光对测量结果的影响,在太阳模拟器出光口前端放置光阑限束,所述光阑通光口径8mm/180mm,通过光阑限束,使入射光尽可能高效率的照射到样品上。

[0059] 在本发明中,太阳模拟器1放置于电动位移台2的正前方,样品摆放在电动位移台2的样品台24上,光源垂直入射到电动位移台2的样品初始位置,参见图2;

[0060] 所述电动位移台2,用于摆放样品,实现样品在三维空间的移动和旋转;电动位移台2包括水平平移台25、安装在水平平移台上的竖直平移台26、安装在竖直平移台26上的转动平台、安装在转动平台上的样品台24;所述水平平移台25能够前后、左右移动;所述转动平台包括绕着X轴旋转的第三转盘23、绕着Y轴旋转的第二转盘22、绕着Z轴旋转的第一转盘21;样品摆放在电动位移台的样品台24上,通过水平平移台25和竖直平移台26来调整样品与入射光源(太阳模拟器)之间的距离和高度;电动位移台2在空间旋转范围的XYZ轴由第一转盘21、第二转盘22、第三转盘23控制;

[0061] 所述水平平移台25、竖直平移台26上的移动部均安装在精研丝杆上,通过电机驱动,实现水平方向上的前后、左右调节和竖直方向的上下的调节;行程精度: $1\mu m$,这样可实现样品位置的高精度调整;

[0062] 参阅图1、图2,所述竖直平移台26设置在水平平移台25的移动部上;在竖直平移台26的移动部上垂直安装有转轴;所述第三转盘23安装在转轴上,通过转轴实现第三转盘23绕着X轴旋转;在所述第三转盘23上安装有连接架27,通过连接架27将第三转盘23与第二转盘22连接;所述第二转盘22通过连接杆28与第一转盘21连接;所述第一转盘21上安装有样品台24;所述第三转盘23绕着X轴旋转,旋转范围 $0\sim 180^\circ$,定位精度: 0.002 度;所述第二转盘22绕着Y轴旋转,旋转范围 $0\sim 360^\circ$,定位精度: 0.002 度;所述第一转盘21绕着Z轴旋转,旋

转范围 $0\sim 360^\circ$,定位精度:0.1度。

[0063] 所述探测系统3,探测距离可移动,探测角度可调整;探测系统包括可移动平台32、安装在可移动平台32上的二维旋转平台37、安装在二维旋转平台37上的望远镜30、与望远镜连接的光纤探头31、通过探测光纤33与光纤探头连接的光谱仪34;其中,所述可移动平台32绕样品 $0^\circ\sim 360^\circ$ 旋转,能实现任意角度的探测,且探测距离可调;所述二维旋转平台37固定在可移动平台32的几何中心处,用来调节望远镜30的探测角度;所述望远镜30固定在二维旋转平台的旋转轴心处;所述可移动平台最远探测距离为5m;所述二维旋转平台偏转角范围: $0\sim 360^\circ$,俯仰角范围: $-50^\circ\sim +50^\circ$;所述光谱仪波长范围199.36nm-994.96nm,光学分辨率0.47nm(FWHM),信号噪声比6000:1满信号,A/D分辨率16位,暗噪声3RMS计数,积分时间8ms-15min,旋转精度: 0.2° ;

[0064] 所述BRDF光谱自动采集系统4安装有海洋光谱软件、PC系列位移台驱动软件,BRDF光谱自动采集系统分别与电动位移台2和探测系统3连接,用于控制电动位移台2动作,使电动位移台2带动样品在空间内以任意角度旋转;同时控制探测系统3的光谱仪对样品任意角度的散射光谱进行采集,并传递给BRDF数据处理系统5,经过计算得到样品在全空间范围的BRDF;

[0065] 参见图3,所述BRDF光谱自动采集系统4包括位移台驱动模块41、数据采集模块42、探测端驱动模块43、光谱采集模块44、数据存储模块45;通过BRDF光谱自动采集系统的位移台驱动模块41控制电动位移台2,使样品在三维空间任意旋转;同时,通过BRDF光谱自动采集系统的数据采集模块42对电动位移台2旋转的角度、移动的位置进行采集,实际操作过程中可直接在BRDF光谱自动采集系统中输入参数(可任意输入样品旋转角度间隔及旋转范围,角度间隔最低可达到 1.8°),即可实现样品全自动的旋转;另外,通过BRDF光谱自动采集系统的探测端驱动模块43,可将探测系统3移动到所需的探测位置,同时调节望远镜30焦距使其达到指定的探测口径;通过光谱采集模块44对样品散射光谱实时的采集,并按照命名规则将散射光谱数据存储到数据存储模块45内,BRDF光谱自动采集系统4通过数据输入输出实现联动控制;

[0066] BRDF光谱自动采集系统运行时,首先移动探测系统3中的可移动平台32,将探测系统3移动到所需的探测位置后,调节望远镜30焦距使其达到指定的探测口径,在BRDF光谱自动采集系统4中输入参数,运行BRDF光谱自动采集系统4,使其控制电动位移台2实现空间任意方向的旋转,并驱动探测系统3进行光谱采集;所述望远镜30将接受到的光信号经由探测光纤33传输给光谱仪34,转化为光谱信号后按照存储规则存储到指定的文件夹中。

[0067] 所述BRDF数据处理系统5与BRDF光谱自动采集系统4连接,用于处理采集后的光谱数据,得到不同角度下的BRDF数据;具体为:BRDF数据处理系统5将测量角度转换为BRDF中对应的角度并计算出BRDF值;转换后的入射角和反射角的角度遍历范围为 $-90^\circ\sim 90^\circ$,入射方位角和反射方位角的角度遍历范围为 $-180^\circ\sim 180^\circ$ 。

[0068] 本发明所述的BRDF自动测试系统需要安装在室内,所述的室内为光学暗室,暗室全封闭设计,且内部涂有消光漆,墙面反射率小于3%,暗室长宽为 $10\text{m}\times 8\text{m}$,高2.5m,通过涂消光漆,以实现杂散光的高效率吸收,保证散射光谱的测量精度。

[0069] 参见图4,本发明还提供了一种采用上述BRDF自动测试系统对样品的BRDF值进行测量的测试方法,具体包括如下步骤:

[0070] 步骤S100、通过探测系统3对探测角度进行设定；

[0071] 步骤S200、利用BRDF光谱自动采集系统4中的位移台驱动模块控制电动位移台2转动，同时通过探测端驱动模块控制探测系统3动作，控制光谱仪采集光谱，并按照命名规范存储光谱；

[0072] 步骤S300、BRDF数据处理系统5将BRDF光谱自动采集系统4采集到的数据经过处理得到样品的BRDF数据；

[0073] 其中，步骤S100对探测角度进行设定时，首先校准转台零位，在太阳模拟器的出光口处安装8mm光阑36；在第一转盘21的中心安装平面镜，通过准平使平面镜反射面与第一转盘21前表面重合；调整第一转盘21绕Y轴旋转，调整电动位移台的两个地脚，使太阳模拟器发出的光通过小孔光阑36照在平面镜上，平面镜发射的光能反射回小孔光阑36处；调整垂直和水平方向的平移台，使光点在第一转盘21的中心；测量镜面到第三转盘23前表面的距离，调整第一转盘21前后的位置，同第二转盘22的上表面与第三转盘23旋转中心轴的距离相等；以各种角度旋转第二转盘22和第三转盘23，使平面镜反射光束与中心光束的轴心重合；BRDF光谱自动采集系统4控制电动位移台2的第二转盘22绕Y轴转动所需探测角度的一半；将半导体激光器35用探测光纤33耦合连接到探测系统；移动二维旋转平台，调整望远镜，调整激光束照到平面反射镜，若两束光的几何光轴重合，则探测角度调整设定完毕。

[0074] 所述步骤S200中在BRDF光谱自动采集系统中输入存储路径、样品名称、转动角度（包括水平方向和俯仰方向）的范围、转动角度间隔、转动的初始角度以及曝光时间后，点击“开始”进行光谱测量；其中，角度间隔最低可达到 1.8° ，曝光时间参数自适应，可以根据测量的光谱信号强弱自动调整曝光时间长短，以txt格式存储光谱数据，名称按照“序号-样品名称-水平角度-俯仰角度-曝光时间”的格式存储。

[0075] 所述步骤S300中BRDF数据处理系统对数据进行处理时，包括如下步骤：

[0076] 步骤S310：定义电动位移台带动样品在XYZ空间转动，第二转盘（22）带动样品绕Y轴的转角为 α 角，第三转盘（23）带动样品绕X轴的转角为 β 角，第一转盘（21）带动样品绕Z轴的转角为 δ 角；Z轴与探测系统（3）夹角为 γ 角，以上角度逆时针转动为正，顺时针转动为负， x 、 y 、 z 为初始位置坐标；

[0077] 步骤S320：在以转动平台的转轴初始位置确定的三维空间中，电动位移台的转动角度与空间位置坐标的转换关系为：

$$[0078] \begin{cases} x_0 = x \cos \alpha \cos \delta - z \sin \alpha \cos \delta + x \sin \alpha \sin \beta \sin \delta + y \cos \beta \sin \delta + z \cos \alpha \sin \beta \sin \delta \\ y_0 = x \sin \alpha \sin \beta \cos \delta + y \cos \beta \cos \delta + z \cos \alpha \sin \beta \cos \delta - x \cos \alpha \sin \delta + z \sin \alpha \sin \delta \\ z_0 = x \sin \alpha \cos \beta - y \sin \beta + z \cos \alpha \cos \beta \end{cases}$$

[0079] 步骤S330：由步骤S320带入光源的初始位置得光源的空间位置坐标：

$$[0080] \begin{cases} x_i = z \cos \alpha \sin \beta \sin \delta - z \sin \alpha \cos \delta \\ y_i = z \cos \alpha \sin \beta \cos \delta + z \sin \alpha \sin \delta \\ z_i = z \cos \alpha \cos \beta \end{cases}$$

[0081] 步骤S340：由公式

$$[0082] \cos \theta_i = \frac{z_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}}$$

$$[0083] \tan \varphi_i = \frac{z_i}{x_i}$$

[0084] 将光源在XYZ坐标系中的空间位置坐标带入,得到入射角 θ_i ,得到入射方位角 ϕ_i ;

[0085] 步骤S350:由步骤S320带入探测端的初始位置得光源的空间位置坐标:

$$[0086] \begin{cases} x_r = R \sin \gamma \cos \alpha \cos \delta - R \cos \gamma \sin \alpha \cos \delta + R \sin \gamma \sin \alpha \sin \beta \sin \delta + R \cos \gamma \cos \alpha \sin \beta \sin \delta \\ y_r = R \sin \gamma \sin \alpha \sin \beta \cos \delta + R \cos \gamma \cos \alpha \sin \beta \cos \delta - R \sin \gamma \cos \alpha \sin \delta + R \cos \gamma \sin \alpha \sin \delta \\ z_r = R \sin \gamma \sin \alpha \cos \beta + R \cos \gamma \cos \alpha \cos \beta \end{cases}$$

[0087] 步骤S360:由公式

$$[0088] \cos \theta_r = \frac{z_r}{\sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2}}$$

$$[0089] \tan \varphi_r = \frac{z_r}{x_r}$$

[0090] 将探测端在XYZ坐标系中的空间位置坐标带入公式中得反射角 θ_r ,反射方位角 ϕ_r 。

[0091] 步骤S370:实验中只测试物体前表面的反射特性,所以从物理意义上 $z_r \geq 0$,在数学计算中取 z_r 小于0的情况无意义;BRDF自动测试系统筛选掉没有物理意义的光谱数据;

[0092] 步骤S380:去除散射光谱的背景噪声;

[0093] 步骤S390:将散射光谱的波长截取400-900nm之间;

[0094] 步骤S400:将测量得到的样品散射光谱 L_s 及标准板散射光谱 L_b 带入公式:

$$[0095] f_{rs}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{L_s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{L_b(\theta'_i, \varphi'_i, \theta'_r, \varphi'_r, \lambda)} \cdot \frac{\cos \theta'_r}{\cos \theta_r} \cdot \frac{\rho}{\pi}$$

[0096] 计算得到样品的BRDF,式中 $\rho(\lambda)$ 是标准白板的半球反射率,通过计量定标获得。

[0097] 本发明采用上述方法太阳能电池板样品进行测量,具体测量结果见图5。

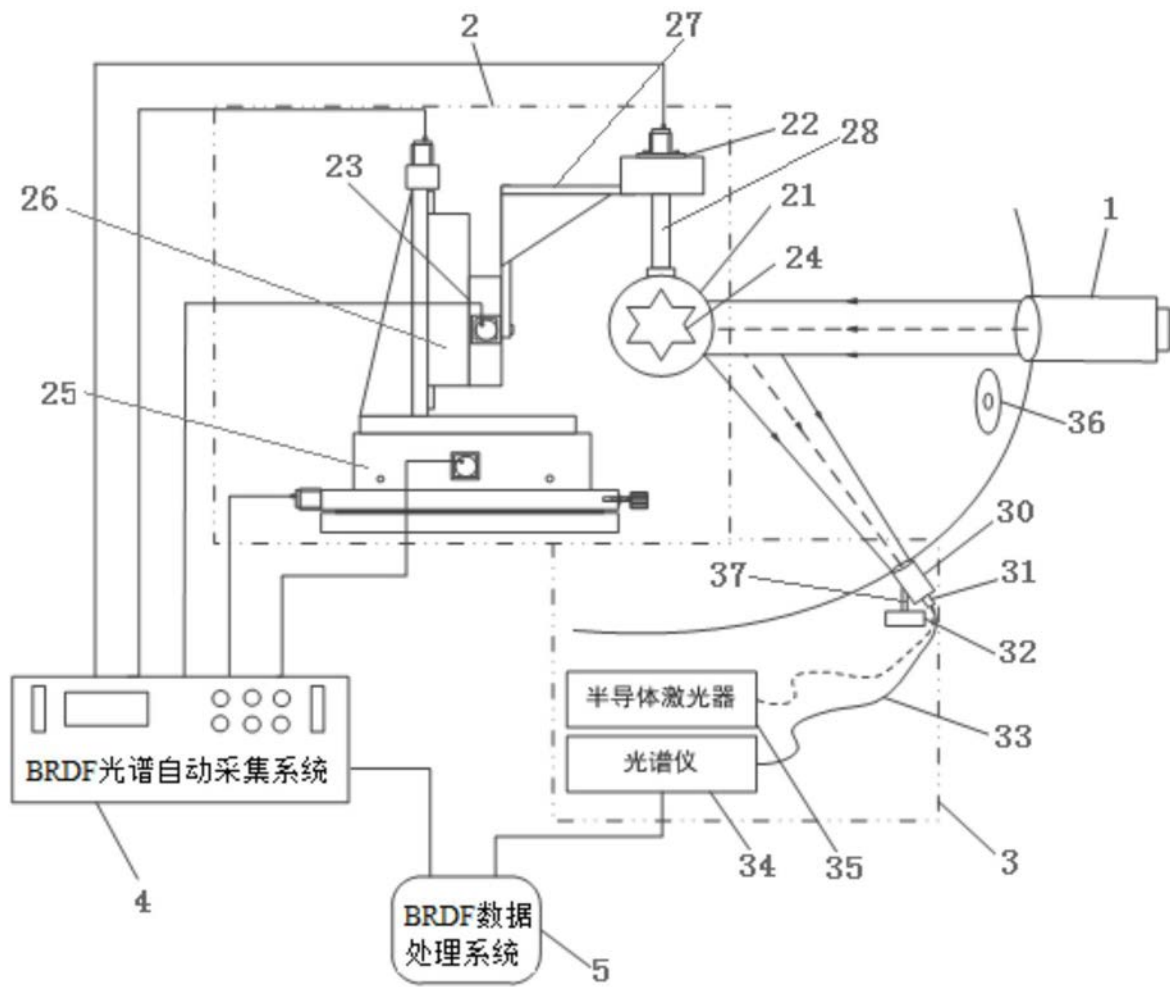


图1

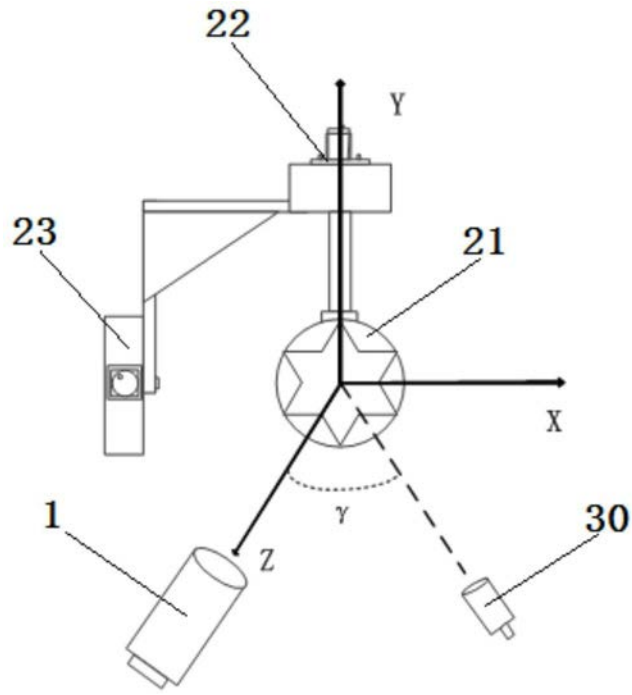


图2

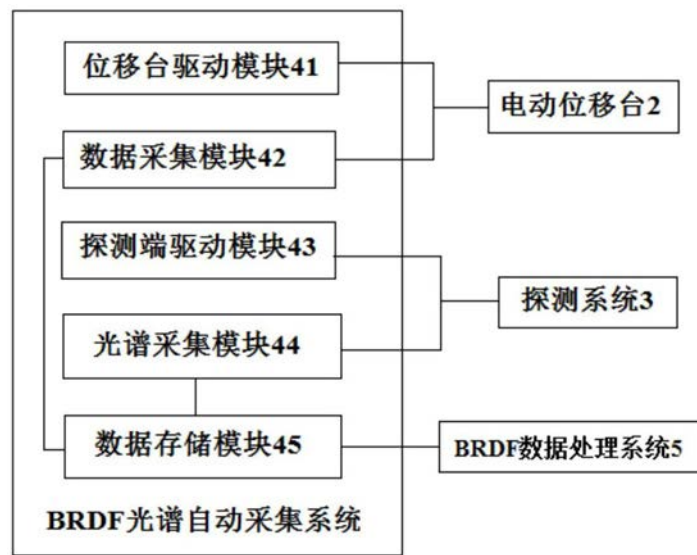


图3

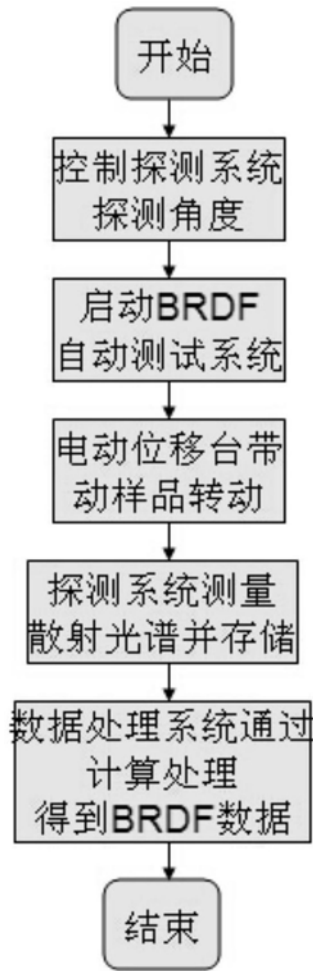


图4

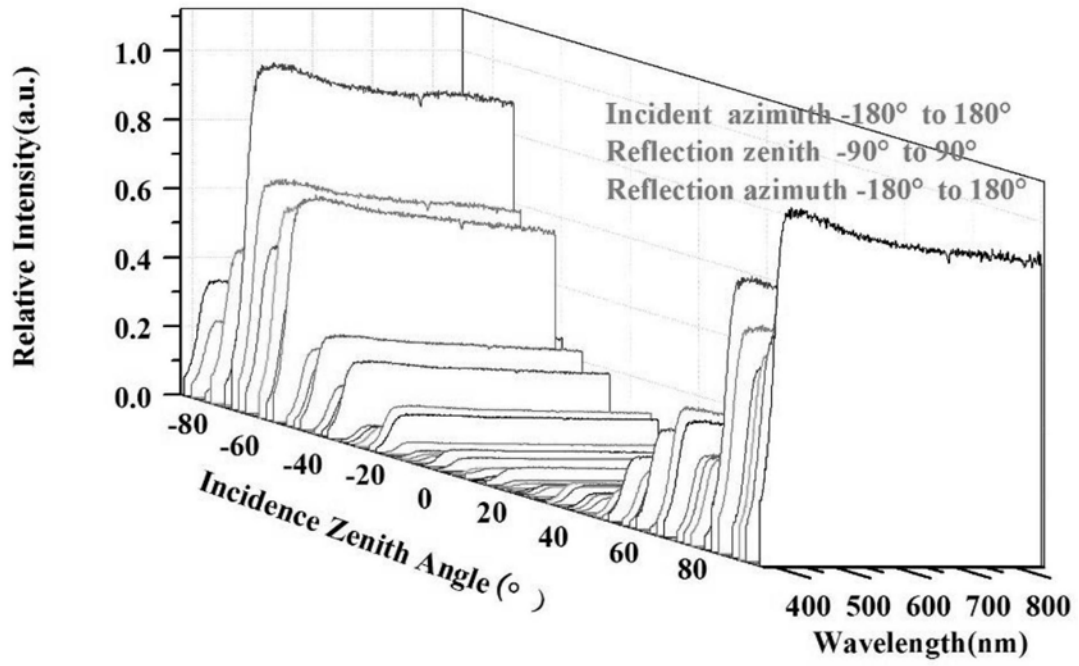


图5