

文章编号 1004-924X(2009)03-0475-07

紫外-真空紫外空间遥感仪器漫反射板的制备

李 博^{1,2}, 林冠宇¹, 张明宇^{1,2}, 李明明³, 李 权⁴

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;
3. 空军航空大学, 吉林 长春 130022; 4. 吉林省农业科学院, 吉林 长春 130124)

摘要:在铝制漫反射板传统工艺的基础上,提出了紫外-真空紫外遥感仪器使用的铝制漫反射板物理磨砂和化学磨砂的新工艺与检测方法,并搭建了主要测试装置。测试结果表明,新工艺的朗伯余弦辐射特性得到明显改善,在 0° 与 45° 入射时,归一化曲线接近标准余弦曲线;300 nm处半球反射率均匀度从0.77提高到0.98;200~400 nm处半球反射率平均提高33%;将其应用于紫外-真空紫外遥感仪器上进行了角度响应测试,漫反射特性明显优于美国2002年发射的同类仪器SBUV/2。

关键词:紫外-真空紫外遥感;漫反射板;散射特性;碱蚀磨砂;半球反射率

中图分类号:TP732 **文献标识码:**A

Fabrication of diffuser in UV-VUV space remote sensing instrument

LI Bo^{1,2}, LIN Guan-yu², ZHANG Ming-yu^{1,2}, LI Ming-ming³, LI Quan⁴

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*;
3. *Air Force Aviation University, Changchun 130022, China*;
4. *Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130124, China*)

Abstract: A new method of physical frosting and chemical frosting was presented and a testing equipment was developed on the basis of traditional optical grinding method for aluminum diffuser used in ultraviolet - vacuum ultraviolet remote sensing instrument. The test results indicate that Lambert cosine radiation characteristic of the new method has a distinct improvement, and the incidence normalized curve approaches to the standard cosine curve in the 0° and 45° . Moreover, with the new method, hemisphere index of reflection uniformity increases from 0.77 to 0.98 at 300 nm and the hemisphere index of reflection averagely enhances by 33% at 200~400 nm. Proposed method was applied to the ultraviolet-vacuum ultraviolet remote sensing instrument to test the angle response, results show that diffuse characteristic is superior to obviously that of similar instrument SBUV/2 made of America launched in 2002.

Key words: UV-VUV remote sensing; diffuser; scattering characteristics; alkaline corrosion; hemisphere index of reflection

收稿日期:2008-03-25;修订日期:2008-06-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40675083)

1 引言

紫外-真空紫外空间遥感仪器中,漫反射板是光谱辐射定标与测量光谱辐照度的主要光学元件,其漫反射特性的优劣直接决定光谱辐射仪器的定标精度与信噪比,即决定仪器的整机性能与遥感数据反演质量。随着空间遥感仪器的发展,漫反射板的特性研究越来越受到重视,包括美国国家标准技术研究院(NIST)在内的国际上许多计量机构都开展了相关材料漫反射特性的研究工作,建立了紫外-真空紫外波段漫反射特性测量装置^[1],研究了硫酸钡、聚四氟乙烯、铝等材料的漫反射特性^[2]。紫外-真空紫外空间遥感仪器的漫反射板应具备以下几个特点:良好的空间稳定性、均匀的反射表面、较高的半球反射率、较好的朗伯反射特性。传统物理磨砂的方法能够使基板表面在一定程度上形成砂面,但砂面不均,存在研磨划痕,表面残留铝粉微粒难于清洗,这些不仅降低了漫反射板表面的半球反射率,还会影响其镀膜的牢固程度,使得在空间环境下受到原子氧与带电粒子碰撞时,膜层极易受到剥蚀与损伤^[3]。在大角度掠入射时,物理磨砂的漫反射板镜反射严重,余弦辐射特性很差。目前,国内外硫酸钡与聚四氟乙烯漫反射板加工工艺已经成熟,在 200~900 nm 半球反射率已接近于 1,漫反射表面已和标准朗伯反射体接近,但在空间环境中稳定性远远不够,铝制漫反射板仍被各类空间遥感仪器使用。然而,铝制漫反射板的余弦辐射特性仍没有很好地解决,2002 年美国发射的太阳后向散射紫外光谱辐射计(SBUV/2)的漫反射板余弦辐射特性仍然很差,从该仪器的角度响应定标结果已经体现^[4]。国内外鲜有这方面报导,铝制漫反射板的特性还需要进一步研究。

本文在铝制漫反射板的传统工艺的基础上提出了新工艺,将新工艺与传统工艺的漫反射板进行了测试对比。结果表明,新工艺的漫反射特性有了明显改善。

2 漫反射板的加工工艺

2.1 漫反射板传统工艺

传统加工漫反射板主要使用物理磨砂方法。

在锻铝 LD₂₋₁基板上用 65 μm 的金钢砂进行光学研磨,制成粗糙的磨砂表面,经特殊过程清洗后真空沉积 100 nm 纯铝,为提高紫外反射率还镀了 40 nm MgF₂ 膜。国外很多遥感仪器(BUV 系列、SBUV 系列、TOMS 系列)都采用了物理研磨方法^[5]。该方法有表面残留划痕,同时合金碎屑很难清洗,表面污浊,漫反射特性差等缺点。

2.2 漫反射板新工艺

新工艺在传统物理磨砂的基础上又增加了化学磨砂过程,主要包括:物理磨砂、清洗、化学磨砂、清洗、镀膜。物理磨砂过程有两个步骤:(1)对平均粒径 65 μm 氧化铝微粒进行硝酸除铁,再用蒸馏水冲洗干净。其中,硝酸浓度为 98%。(2)用冲洗好的氧化铝研磨剂对锻铝 LD₂₋₁基板进行手工研磨,使其表面形成漫散射砂面。清洗过程分为 4 个步骤:(1)浸入三氯乙烷的超声波溶液中清洗;(2)浸入氟利昂的超声波溶液中清洗;(3)用水与乙醇浸湿漂净,然后用热蒸馏水洗净;(4)用蒸馏得来的丙酮除水^[5]。化学磨砂采用了碱蚀方法,利用 NaOH 溶液对漫反射板再次磨砂。机理与过程见 2.2.1 与 2.2.2。化学磨砂后,还需用碱蚀前的清洗过程对漫反射板进行清洗。最后,在清洗好的基板上镀 100 nm 的纯铝与 40 nm 的 MgF₂。

2.2.1 碱蚀磨砂面形成机理

铝合金侵入 NaOH 溶液中受到碱的均匀腐蚀,微观上这也是个电化学过程,反应生成物为 Al(OH)₃ 与 NaAlO₂。手工研磨出来的铝基板存在划痕、灰色铝合金粉末、粗糙度不均、刻划尖峰等缺陷。碱蚀磨砂过程中,首先去除了铝表层结晶细密的光亮层,并对表面残留的污染物进行了腐蚀。由于碱液有一定的粘度,在表面细微的凸峰处碱液扩散交换速度比表面细微的凹谷处快,因而腐蚀速度也就快,起到消除漫反射板表面尖峰作用。尖峰的消除使漫反射板表面形貌更接近余弦表面,提高了漫反射板的余弦辐射特性^[6]。碱蚀的漫反射板再次经过超声波清洗后,表层腐蚀物受气泡碰撞逐渐脱落,从而得到均匀、平滑、柔和的漫散射磨砂表面。

2.2.2 碱蚀中的影响因素与过程控制

碱蚀过程的影响因素主要与碱蚀温度、蚀液配比、反应时间有关。

经验上,温度每升高 10 ℃,碱蚀反应速度近

似增加1倍。温度过高,反应速度难以控制,容易导致碱腐蚀过度使表面形成粗麻砂面。温度过低,则不能完全除去表层细密的光亮层,砂面不够均匀丰满,不能除去研磨时产生的条纹,容易形成黄斑。温度过高或过低都不能达到理想砂面,磨砂后的漫反射特性均很差。实验表明,反应初始温度为50~60℃时磨砂效果较好。

蚀液中NaOH浓度过高或过低,与温度影响一样,都将对磨砂不利,只是没有温度影响显著。NaOH浓度一般在55 g/L左右。

反应时间决定磨砂碱蚀量,时间过长或过短会使合金造成过腐蚀或欠腐蚀。过腐蚀会使基板表面生成粗麻砂面,表面不均匀,有斑点。欠腐蚀无法消除手工研磨所产生的划痕,而且合金表面仍附着研磨时留下的细微铝粉,表面污浊,超声波难于清洗。

经试验检测,当反应初始温度为50~60℃、NaOH浓度为55 g/L,反应时间控制在2~3 min之间时,漫反射特性最好。

3 漫反射板的测试原理与装置

3.1 余弦辐射特性测试

理想的朗伯表面就是指反射比等于1而具有朗伯漫反射特性的表面^[7]。反射比为特定波长的半球反射率,朗伯反射特性的表面也就是满足朗伯余弦辐射特性的均匀表面。评价加工后的漫反板性能需对其均匀性、余弦辐射特性与半球反射率进行测试,因此,要求使用准确简便的测试方法与测试装置。

余弦辐射体发光强度空间分布可用如下公式表示:

$$I_{\theta} = I_N \cos \theta, \quad (1)$$

I_N 表示发光面在法线方向的发光强度, I_{θ} 为和法线成任意角度 θ 方向的发光强度,而

$$V_{\theta} = RI_{\theta}, \quad (2)$$

V_{θ} 是探测器经放大后的电压值,

R 为探测器的响应度。

由式(1)与式(2)可得:

$$V_{\theta} = V_N \cos \theta. \quad (3)$$

通过测量漫反射板发光强度的空间分布可以检验漫反射板的朗伯余弦反射特性。

因此,可搭建图1中的测试装置。转台置于

暗室中,光源为直流小汞灯,通过透镜窗口成像在样品上,样品固定于具有5个自由度的转台上,可以进行X、Y、Z方向平移和 φ 角转动及俯仰调节,X、Y、Z方向平动用来调整样品位置,并选择样品的测试点, φ 角转动用来选择光束的入射角, θ 角转动用来移动探测器,探测器和样品可单独旋转,样品和探测器的旋转,均在计算机控制下完成;探测器为光电倍增管,倍增管的输出经放大、A/D变换后由计算机采集处理。

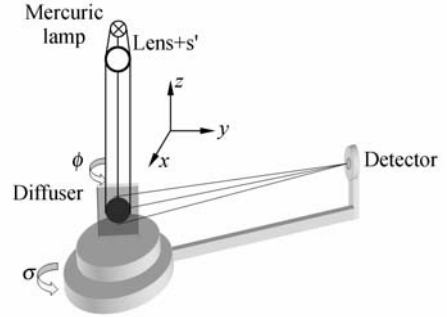


图1 余弦辐射特性测试装置

Fig. 1 Measuring device of cosine radiation property

仪器测得的电压值可以表示为:

$$V_{\theta} = RI_{\theta}, \quad (4)$$

由式(4)可求得误差表达式:

$$\frac{\Delta V_{\theta}}{V_{\theta}} = \left[\left| \frac{\Delta R}{R} \right|^2 + \left| \frac{\Delta I_{\theta}}{I_{\theta}} \right|^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

Δ 表示误差,从式(5)可知:仪器测量误差由仪器响应误差和汞灯强度误差组成,仪器测量误差如表1所示。

表1 仪器相对测量误差

Tab. 1 Relative measurement error for instrument

| Item | Error |
|---|-------|
| Drift of detector responsivity | 0.5% |
| Drift of amplifier responsivity | 0.5% |
| Drift of high-voltage supply | 0.1% |
| Linearity error of detector and amplifier responsivity | 0.1% |
| Error of data acquisition system (including integration time and half adjust) | 0.1% |
| Error of machinery location and jitter | 1% |
| Stray light | 1% |
| Uncertainty of mercury lamp output intensity (including supply) | 1% |
| Total | 2% |

3.2 半球反射率与均匀度测试

半球反射率的测量使用 LAMBDA9 紫外-可见-红外分光光度计。以中国计量院提供的已知半球反射率 $\rho(0, d)$ 的聚四氟乙烯漫反射板为参考样品, 用比对测量的方法分别测量了两种工艺漫反射板紫外波段的半球反射率 $\rho(0, d)$ 。

半球反射率的均匀度越接近 1 说明漫反射板均匀性越好, 测均匀度只需将漫反射板分成若干区域, 通过 LAMBDA9 对多个区域进行半球反射率测量。

均匀度可用下式表示:

$$J(\lambda) = 1 - C_V(\lambda) = 1 - S(\lambda) / \sqrt{\rho(0, d, \lambda)}, \quad (6)$$

$C_V(\lambda)$ 为变异系数;

$S(\lambda)$ 为各区域波长为 λ 时, 半球反射率的标准差;

$\overline{\rho(0, d, \lambda)}$ 表示波长为 λ 时, 各区域半球反射率的平均值;

$$S(\lambda) = \sqrt{\frac{\sum (\rho_i(0, d, \lambda)^2 - \overline{\rho(0, d, \lambda)})^2}{n(n-1)}}, \quad (7)$$

$\rho_i(0, d, \lambda)$ 表示波长为 λ 时, 区域 i 处半球反射率。于是有:

$$J(\lambda) = 1 - \sqrt{\frac{\sum (\rho_i(0, d, \lambda)^2 - \overline{\rho(0, d, \lambda)})^2}{n(n-1)}} / \overline{\rho(0, d, \lambda)}, \quad (8)$$

通过式(8)可以表示漫反射板半球反射率的均匀程度。

3.3 仪器角度响应测试

为进一步验证新方法漫反射板的漫反射特性, 还将两种漫反射板安装到同一台紫外遥感仪器进行了角度响应测试。该仪器为国内首台太阳后向散射仪样机, 与美国 SBUV/2 系类属同类仪器。该仪器由前置漫反射板、消偏器、艾勃特-法斯特 (Ebert-Fastie) 型光栅双单色仪、光电倍增管探测器及电控系统组成, 工作波段为 160~400 nm, 光谱分辨力为 0.15 nm, 300 nm 处光谱带宽为 1.0 nm, 视场角为 11°, 其结构原理如图 1 所示。仪器在轨工作时, 光轴指向地心。太阳辐射通过漫反射板、消偏器、单色仪, 在单色仪出射狭缝平面形成光谱带。当单色仪光栅转动时, 不同波长的单色辐射依次通过出射狭缝, 由探测器-放大器转变为紫外光电光谱。漫反板工作角度和工作位置与仪器本身始终保持不变。

角度响应测试大致采用 2002 年发射的

SBUV/2 角度定标方法^[4], 其视场表面通量随平行光入射角度变化可用式(9)表示:

$$\Phi(\theta, \phi) = \Phi(0, 0) \cos \theta \cos \phi, \quad (9)$$

θ 与 ϕ 分别为俯仰角与方位角;

$\Phi(0, 0)$ 与 $\Phi(\theta, \phi)$ 分别为垂直入射与特定角度入射 (θ, ϕ) 时的光通量。

于是有:

$$E(\theta, \phi) = E(0, 0) \cos \theta \cos \phi, \quad (10)$$

$E(0, 0)$ 与 $E(\theta, \phi)$ 分别为垂直入射与特定角度入射 (θ, ϕ) 时的辐照度。

测试原理主要通过改变漫反射板入射平行光角度, 进而改变漫反射板入射辐照度。在理想状态下, 漫反射板为标准朗伯辐射体, 仪器照度响应度也必然为常数, 测得的信号值 $V(\theta, \phi)$ 也应呈余弦关系变化。但铝制漫反射板漫反射特性差, 存在一定程度的镜反射, 平行光入射方向改变后仪器的辐照度响应度不再是常数, 仪器测得的信号值归一后与标准余弦值必然存在一定程度的偏差。所以, 余弦曲线偏差的大小很大程度上反映了仪器上漫反射板的朗伯反射特性。

通过搭建二维转台模拟仪器在轨环境下太阳以不同角度入射情况, 对仪器不同入射角度照度响应度进行了标定。测试装置如图 2 所示。光源采用中国计量院的卤钨灯 F08, 光源位于球面镜焦点位置, 光线经过球面镜后变为平行光束, 再经平面镜反射到遥感仪器漫反射板上。二维转台角两个转角变化范围均可达到 $-90^\circ \sim 90^\circ$, 其二维转轴的中心位置为漫反射板中心, 整个测试过程均由计算机自行控制。

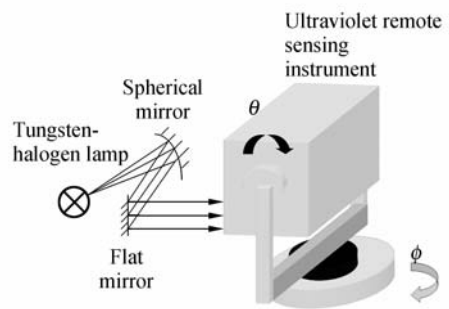


图 2 漫反射板角度定标装置

Fig. 2 Device for goniometric responsivity

仪器测得的电压值可以表示为:

$$V_{\theta\phi} = RE(\theta, \phi), \quad (11)$$

由式(11)可求得误差表达式:

$$\frac{\Delta V_{\theta\phi}}{V_{\theta\phi}} \left[\left| \frac{\Delta R}{R} \right|^2 + \left| \frac{\Delta E(\theta, \phi)}{E(\theta, \phi)} \right|^2 \right]^{1/2}, \quad (12)$$

仪器误差由仪器照度响应度与照度值组成, 仪器误差如表 2 所示。

表 2 仪器相对测量误差

Tab. 2 Relative measurement error for instrument

| Item | Relative error/ nm | |
|--|--------------------|---------|
| | 160~250 | 250~400 |
| Drift of detector responsivity | 2.9% | 0.8% |
| Drift of amplifier responsivity | 0.4% | |
| Wavelength responsivity | 0.3% | |
| Drift of high-voltage supply | 0.2% | |
| Linearity error of detector and amplifier responsivity | 0.3% | |
| Error of machinery location (θ, ϕ) and jitter | 1% | |
| Stray light | 0.5% | |
| Uncertainty of tungsten-halogen lamp output intensity (including supply) | ±1% | |
| Total | ±3.3% | ±1.8% |

3.4 测试结果对比

图 3 与图 4 分别是两种工艺的漫反射板在入射角为 0° 与 45° 时的余弦辐射特性。图中曲线是探测器测得电压值经过余弦归一化得到的, 曲线中的低谷部分是由于转台受探测器遮挡影响存在小范围探测盲区造成的。探测得到曲线与标准余弦曲线越接近说明漫反射板越接近标准的朗伯反射体。从图中可以看出在 0° 与 45° 入射的情况下, 传统工艺的漫反射板存在严重的镜反射, 呈两条直线分布, 而新工艺的漫反射板与标准余弦曲线基本重合。

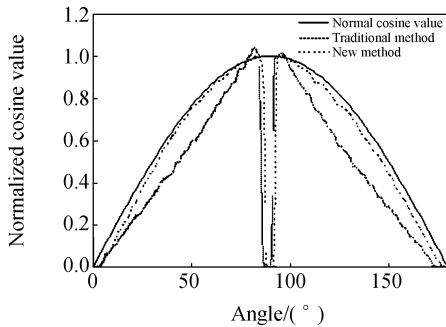


图 3 0°入射两种方法余弦辐射特性比较

Fig. 3 Comparison of cosine radiation properties of two methods at 0° incident angle

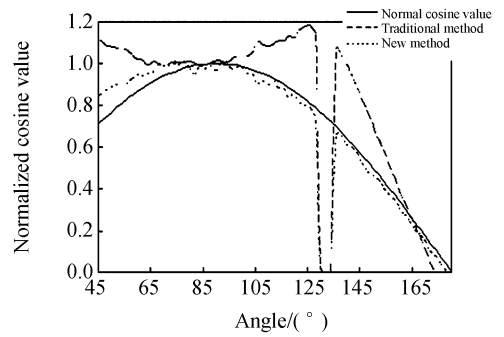


图 4 45°入射两种方法余弦辐射特性比较

Fig. 4 Comparison of cosine radiation properties of two methods at 45° incident angle

图 5 为两种工艺漫反射板的半球反射率比较。可以明显看出新工艺的漫反射板半球反射率高于传统工艺, 在 200~250 nm 范围内更为明显。经计算, 在 200~400 nm 范围内半球反射率

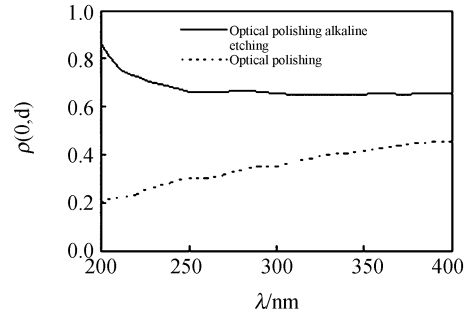


图 5 两种方法半球反射率对比

Fig. 5 Comparison of $\rho(0, d)$ of two methods

平均提高 33%。表 3 为 300 nm 处两种工艺不同区域的半球反射率与均匀度, 在该波长, 新工艺的漫反射板均匀度比传统方法的均匀度提高了 22%。

表 3 漫反射板均匀度

Tab. 3 Uniformity of diffuser

| Region | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | Uniformity |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|
| Traditional | 32.5 | 38.7 | 25.3 | 40.3 | 38.9 | 36.8 | 45.0 | 21.6 | 26.7 | 0.77 |
| New | 71.0 | 69.6 | 70.5 | 69.7 | 69.9 | 71.9 | 71.3 | 68.2 | 69.3 | 0.98 |

图 6 表示两种漫反射板安装于仪器后进行角度响应的测试结果。测试条件是在波长 270 nm, 仪器的方位角 ϕ 为 0 时进行的, 俯仰角 θ 为 -20°~20°。仪器测量的结果已经被余弦归一。从曲

线可以看出新工艺的测试结果更接近标准余弦曲线。

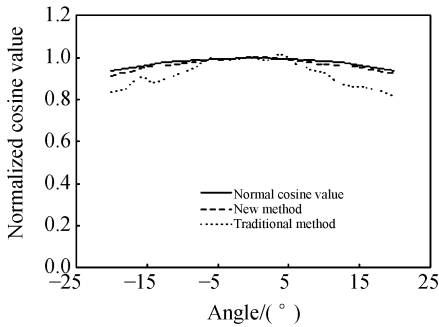


图 6 两种方法角度响应对比

Fig. 6 Comparison of angle responsivities of two methods

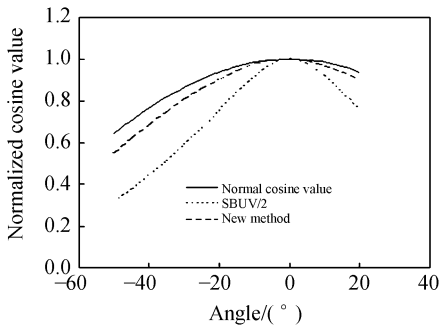


图 7 新方法 with SBUV/2 角度响应对比

Fig. 7 Comparison of angle responsivities between new methods and SBUV/2

图 7 中,将仪器的角度响应与国外经典同类仪器 SBUV/2 做了比较,其中 SBUV/2 数据是 2002 年发射前的角度响应经过归一后的结果^[4]。图中数据均是在波长 254 nm、方位角 ϕ 为 0° 、俯仰角 θ 从 $-50^\circ \sim 20^\circ$ 范围内旋转得到的,从图中可以明显看出,SBUV/2 的归一化曲线趋于直线,而新工艺的漫反角度响应呈余弦趋势,漫反射板散射特性明显优于 SBUV/2,更接近于标准朗伯余弦反射体。

4 结 论

新的加工工艺在传统光学研磨方法的基础上增加了化学磨砂环节,初步解决了光学研磨的铝制漫反射板三个主要问题:

(1)解决了铝制漫反射板余弦辐射特性差的问题,在 45° 掠入射时的余弦特性线仍与标准余弦曲线非常接近,达到了较为理想的效果;

(2)改善了光学研磨特定方向的反射率不均匀与残留划痕问题;

(3)提高了漫反射板的半球反射率,增加仪器探测信号,改善仪器信噪比。

新工艺的铝制漫反射板能够提高国内紫外遥感仪器的整体性能,提高仪器的定标精度,对提高遥感数据反演精度起重要作用。

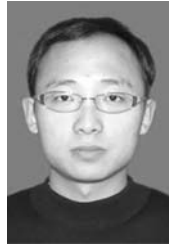
参考文献:

- [1] JOHN C. Ultraviolet BRDFs of selected materials [J]. *SPIE*,1996,2864:406-415.
- [2] FOWLER W K, NELSON V W. Performance of various diffuser, materials in the absolute radiometric calibration of the SBUV/2 [J]. *Metrologia*, 1993,30(4):255-257.
- [3] SUSAN H C P M, JACOB K J, ELDER P, *et al.*. The atomic oxygen exposure effects module of the database for the properties of black, white, reflective and transmissive spectrally selective surfaces [J]. *SPIE*,1994, 2260:33-39.
- [4] ZWEI Z Y, KEVIN K, JAMIE P K, *et al.* SBUV/2 specification compliance and calibration data book volume II for flight model # 8, [S/N009]. 2001. Ball Aerospace & Technologies Corp.
- [5] JAROSS G, CEBULA R, DELAND M, *et al.*. Backscatter ultraviolet instrument solar diffuser degradation[J]. *SPIE*,1998,3427:432-444.
- [6] 任虎. 多种表面双向反射分布函数理论建模与试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [7] REN H. *The theoretical model building and experimental research of bidirectional reflectance distribution function of polytype surfaces* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2006.
- [7] 金伟其,胡威捷. 辐射度光度与色度及其测[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006:103-104.
- [7] JIN W Q, HU W J. *Radiancy Luminosity and Chroma and Its Measurement* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press,2006:103-104.

作者简介:



李 博(1981—),男,吉林梨树人,中科院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室在读博士研究生,主要从事紫外光学遥感技术的研究。E-mail:libo0008429@sohu.com



李明明(1981—),男,07年毕业于吉林大学物理学院,硕士,空军航空大学助教,主要从事相对论星及核天体方向的研究。E-mail:limingming404@sohu.com.



林冠宇(1976—),男,中科院长春光学精密机械与物理研究所博士,助理研究员,目前从事紫外遥感仪器结构设计。



李 杰(1961—),男,吉林梨树人,2001年毕业于吉林农业大学,硕士,吉林省农科院研究员,主要从事能源与金属材料的研究。



张明宇(1984—),男,吉林松原人,中科院长春光学精密机械与物理研究所在读博士研究生,研究方向为图像传感器应用及图像处理技术。E-mail:mingyuzmy@yahoo.com.cn

● 下期预告

折射/衍射球柱有晶体眼人工晶体的设计

王肇圻^{1,2}, 饶 丰^{1,2}, 王 雁³, 左 彤³, 赵堪兴³

(1. 南开大学 现代光学研究所, 天津 300071; 2. 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071; 3. 天津医科大学 天津眼科医院屈光手术中心, 天津 300020)

为了提高白光下人眼的视觉质量,设计了一款折射/衍射球柱有晶体眼人工晶体(Phakic Intraocular Lens, PIOL)。根据实际人眼的角膜地形图、眼内各组分的轴向间距和波前像差,运用Zemax光学设计软件,构建了个性化眼模型,然后运用该模型,设计了球柱PIOL和折射/衍射球柱PIOL。研究表明:与球柱PIOL相比,折射/衍射球柱PIOL能够全面提高人眼的白光调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)和非中心波长下的MTF,这有利于获得良好的视觉质量。研究还表明:折射/衍射球柱PIOL只需要在4 mm区域设计二元面就能够满足要求。最后分析了加工工艺问题。折射/衍射球柱PIOL在先进视觉矫正方面具有潜在的应用价值。