

文章编号 1004-924X(2009)04-0738-07

外部导入激光的积分球辐射源的研制

徐秋云, 郑小兵, 李健军, 张 伟

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 遥感室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 为了满足光谱辐射遥感器的定标需求, 研制了一种新型的外部导入激光的积分球辐射源。这种积分球辐射源不仅完全满足辐亮度响应度定标对定标光源的要求, 而且可以对高光谱、超光谱仪器的光谱辐射响应度进行精细扫描。通过导入单波长激光对积分球辐射源的基本辐射特性进行了研究, 测试结果表明, 这种积分球辐射源的辐亮度非稳定性在 0.5 h 内为 0.09%; 平面非均匀性在积分球出口中心 $\Phi 63$ mm 内为 0.16%; $\pm 22^\circ$ 范围在水平面内和垂直面内的角度非均匀性分别为 1.8% 和 0.7%。由于其具有光谱辐通量高、单色性好、波长准确性高、可宽波段调谐等优点, 可以在辐亮度模式下直接标定仪器的光谱辐亮度响应度。

关键词: 积分球; 激光; 定标; 光谱辐亮度响应度

中图分类号: TP73; O432.2 **文献标识码:** A

Development of laser illuminated integrating sphere source

XU Qiu-yun, ZHENG Xiao-bing, LI Jian-jun, ZHANG Wei

(Remote Sensing Department, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: For calibration of a recent developed spectral radiation remote sensor, a new integrating sphere radiation source with an illuminated outside laser was developed. The radiation source not only could meet the demand of the calibration for radiance responsivity, but also could scan the spectral responsivity of hyperspectral detectors accurately. A single-wavelength laser was illuminated to research the basic radiometric characteristics of the integrating sphere source. The results show that the radiance instability of the radiation source is 0.09% in half an hour, the radiance plane nonuniformity is spatially 0.16% in the central region of the sphere exit port, and the angular nonuniformity in horizontal and vertical planes within a range of $\pm 22^\circ$ are 1.8% and 0.7% respectively. These results indicate that the proposed system can calibrate directly the spectral radiance responsivity for optical instruments under the radiance mode, for it has advantages of higher spectral flux, lower wavelength uncertainty, and wider tunable source wavelengths.

Key words: integrating sphere; laser; calibration; spectral radiance responsivity

1 引言

光谱辐亮度响应度定标对定标光源的基本要求是光源能充满探测器视场、光谱范围覆盖探测器的响应带宽、单色性好、无通道外辐射等,可以宽波段精密调节波长是光谱辐亮度响应度定标对定标光源的较高要求。

积分球是获得均匀面光源的有效手段。传统方法是通过在积分球内安装溴钨灯或卤钨灯在出口形成均匀、准朗伯性的面光源,这种光源已广泛应用于遥感器的实验室定标和星上定标。但是灯照明积分球光源(ISS)是全波段的光源,为了高精度定标遥感器的光谱辐射响应度,定标光源必须可精密调节波长,因此灯照明 ISS 无法满足光谱辐射遥感器的定标需求。

上世纪90年代初期,美国国家标准与技术研究所(NIST)^[1]、英国国家物理实验室(NPL)^[2]、日本国家空间发展处^[3]和西班牙应用物理研究所^[4]相继建立了一种新型的基于可调谐激光器和积分球的定标光源,它具有辐亮度均匀、光谱辐通量高、单色性好、波长准确性高、可宽波段调谐等优点,完全满足光谱辐亮度响应度定标对定标光源的要求。将其与基于探测器的新型光谱辐射传递标准相结合,可以有效提高绝对辐射定标的精度,并可以同时实现光谱定标以及响应度的均匀性、线性等特性检测。

1998年美国NIST利用这种外部导入激光的ISS对校验EOS辐亮度标准的传递辐射计VXR的辐亮度响应度进行了系统级定标,相对联合标准不确定度为0.25%^[5]。2002年日本的Yamamoto Yasuji等人利用波长可调谐激光器和积分球组成的光谱响应度定标系统定标了ADEOS-II卫星上的大孔径(直径177 mm)卫星传感器(Global Imager)的光谱辐亮度响应度^[6]。西班牙的Alejandro Ferrero等人则把这种新型辐亮度源用于CCD光谱辐射曝光量响应度的绝对辐射定标^[7]。目前国内尚无这方面的报道。

为了在实验室对辐射遥感器的光谱辐亮度响应度进行系统级定标,本文根据实验室现有可调谐激光器的输出波段和功率研制了外部导入激光

的ISS。本文讨论了外部导入激光的ISS定标系统工作原理,描述了积分球设计、激光的外部导入光路设计、监测探测器设计和消相干设计。文章最后给出利用单波长532 nm激光器测量ISS基本辐射特性的测试结果,包括辐亮度非稳定性、平面非均匀性和角度非均匀性。

2 外部导入激光的ISS定标系统工作原理

如图1所示,外部导入激光的ISS定标系统由以下几个模块组成:光源模块,包括可调谐激光器和积分球;探测器模块,包括标准探测器和监测探测器;激光功率稳定和特性测试模块和消相干模块。

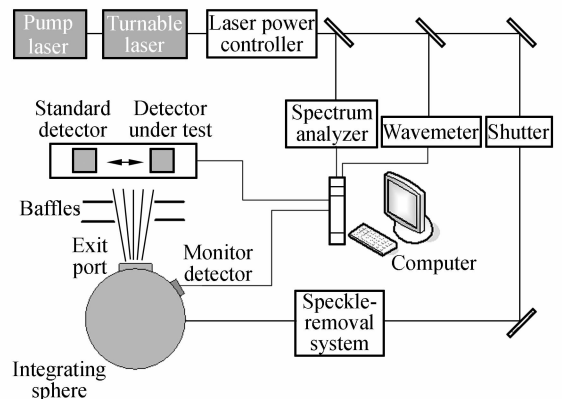


图1 外部导入激光的ISS定标系统

Fig. 1 Laser illuminated ISS calibration system

染料激光器的可调谐波长为415~700 nm,输出光功率>300 mW。钛宝石激光器覆盖680~1 050 nm波段,在15 W泵浦源的激励下,输出光功率可达0.2~1 W。倍频钛宝石激光器可以在350~500 nm波段范围内调谐波长,输出光功率一般在100~200 mW。可调谐激光辐射自身的特点决定了外部导入激光的ISS具有以下优点:单色性好、辐亮度水平高、波长准确性高以及可以在宽波段范围内调谐。

积分球是形成均匀、准朗伯光源的有效手段,并且其本身具有消偏振和消相干的作用,广泛用

于光辐射测量系统中。

标准探测器是基于 Trap 的辐亮度探测器^[8],它的光谱辐通量响应度直接溯源于低温绝对辐射计。监测探测器用于修正定标过程中入射激光功率波动引起的 ISS 辐亮度变化。

3 研制内容

3.1 积分球设计

为了得到大面积的单色面光源,综合考虑了实验用激光器输出波段和功率情况,设计积分球出口直径为 $\Phi 100$ 。

设计的积分球定标源针对在外场对地观测的辐射计,这种辐射计在应用中接收到的辐亮度上限是地物受到 1 个太阳常数照射、反射率为 1 时的反射辐亮度。地物反射太阳光产生的辐亮度用式(1)表示:

$$L(\lambda) = \frac{E(\lambda) \cdot \rho}{\pi}, \quad (1)$$

其中, $E(\lambda)$ 是太阳常数, ρ 是地物和大气总的反射率。太阳常数指平均日地距离时,在地球大气层上界垂直于太阳辐射的单位面积上所接受的太阳辐射能。这里假定 ρ 为 1。

目前常用光谱辐射传感器的典型波段宽度为 20 nm。为了产生足够的信噪比,希望外部导入激光的 ISS 的单色辐亮度与辐射计在外场接收到的通道内积分辐亮度相等。在聚四氟乙烯的漫射波段 250~2 500 nm 每间隔 20 nm 计算一个 $E_0(\lambda)$, $E_0(\lambda)$ 为所计算波长点左右 20 nm 带宽内的积分值。然后根据式(2)计算积分辐亮度:

$$L_0(\lambda) = \frac{E_0(\lambda)}{\pi}, \quad (2)$$

计算结果如图 2 所示。

积分球设计中关键的一点是根据出口大小和辐亮度水平的要求确定内径大小,并且开口比不能 $> 5\%$ ^[9]。为了方便,机械加工内径在 300、400、500 mm 中选择。

积分球出口辐亮度 L 与入射激光功率 ϕ 的关系式如下:

$$L = \frac{\phi}{A\pi} \times \frac{\rho}{1-\rho(1-f)} = \frac{\phi}{A\pi} \times M, \quad (3)$$

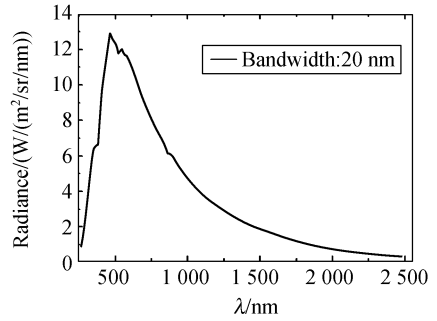


图 2 地物接收一个太阳常数照射,反射率为 1 时,辐射计通道内的积分辐亮度

Fig. 2 Integrating radiance of one band of radiometer while the object is illuminated by one solar constant and the reflectance is 1

其中, A 是积分球内壁的总面积, ρ 是积分球涂层的反射率, f 是积分球的开口比, M 是积分球多次反射因子。忽略其他开口对开口比的影响,只计入积分球出口面积。假定 $\phi = 1 \text{ W}$, $\rho = 0.97$ 。

对应于内径 300、400、500 mm, 积分球出口辐亮度分别为 19.14、13.6、9.89 $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{nm}$ 。可见内径为 300 mm 和 400 mm 时, L 都 $> L_0(\lambda)$, 由于积分球出口一定的情况下内径越大出口光的均匀性越好, 最终确定积分球内径为 400 mm。

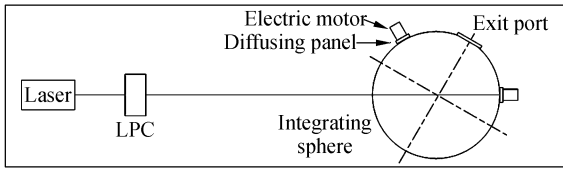
现有积分球制作磨具的内径为 $\Phi 250$, 出口直径为 $\Phi 80$ 。为了缩短加工周期, 最终采纳了现有积分球制作磨具的参数。积分球越小, 相同入射光功率条件下, 出口辐亮度越高, 因此仍然能满足传感器定标对 ISS 辐亮度水平的要求。

激光光束直径大约为 2 mm, 为了便于调节激光入射到球内的位置, 入口直径定为 10 mm。

3.2 激光的外部导入光路设计

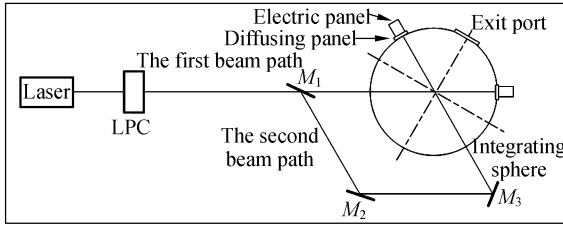
传统灯照明 ISS 一般是在球内对称安装多只溴钨灯, 比如 8 只或 16 只。对称安装是为了使出射光具有较高的角度均匀性。

参考灯照明 ISS, 设计了外部激光双光路导入方式, 如果只利用一条光路则为单光路导入, 如图 3 所示。图中 LPC 是激光功率控制器 (Laser Power Controller)。BEOC 公司 NIR-LPC 的工作波段为 400~1 100 nm, 8 h 稳定性标称值为 0.05%。



(a) 单光路导入

(a) One beam path



(b) 双光路导入

(b) Two beam path

图3 激光外部导入积分球光路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of path of outside laser illuminated into integrating sphere

3.3 消相干设计

当空间相干性和时间相干性都很好的光波照射在光学粗糙的表面(反射型漫射板)或通过光学粗糙的透射板(透射型漫射板)之后,在漫射板之后一定距离处的接收屏上将得到杂散无规的斑点式光强分布,这种分布称为斑纹,也叫散斑。由于用非相干光照明就看不到散斑,因此,只要降低照明的相干性就可以减弱散斑。这主要有两种方法:一是降低照明的时间相干性,另一是降低照明的空间相干性。Arsenault 和 Lowenthal 通过插入单个运动的漫射板,以便在整个光束范围产生无规相位调制,来降低相干光束的空间相干性^[10]。Tiziani, Schroder 以及 Lowenthal 和 Joyeaux 使用了更有效的技术^[10],即使用两个紧密接触的漫射板,一个相对另一个运动,从而以更快的速率调制相位。西班牙的 Alejandro Ferrero, Joaquin Campos 和 Alicia Pons^[6]就是利用后一种方法使外部激光导入积分球内之前先通过一个透射型的旋转漫射板,在积分球出口产生均匀的辐亮度源,此处积分球相当于静止的漫射板。

考虑到透射型漫射板比如毛玻璃的透过率一般比较低,损失激光功率严重,我们使用漫射率较高的反射型漫射板,该漫射板由聚四氟乙烯制成,在 250~2 500 nm 漫射率高达 97%。在积分球

上开一个 $\Phi 33$ 的开口,把电机固定在球上,电机带动一个 $\Phi 30$ 的漫射板旋转,外部激光入射在旋转漫射板上。关于电机的旋转频率,西班牙的 Alejandro Ferrero^[4]等人已经验证有效去除散斑噪声并不需要太高的旋转频率,但是为了消除漫射板旋转自身的不稳定需要增加旋转频率。漫射板旋转频率和消相干效果之间的定量关系还需进一步的研究,本文采用了微型直流电机,它的旋转频率最高可达 7 000 r/min。

3.4 监测探测器设计

在积分球上安装单片硅光电二极管作为监测探测器,用于修正定标过程中入射激光功率波动引起的 ISS 辐亮度变化。

对于硅光电二极管的选择,一是要选取在测量波长处有较高响应度的光电二极管,二是要选取分流电阻尽可能大的光电二极管,以保证探测器具有较高的信噪比。综合上述考虑,本文选择的是滨松公司生产的 s1337-1010BQ。

设计的单片硅光电二极管探测器的电路原理示意图如图 4 所示。光电二极管的输出电流经一个由运放和反馈电阻组成的 I-V 转换网络,实现电流-电压的转换。

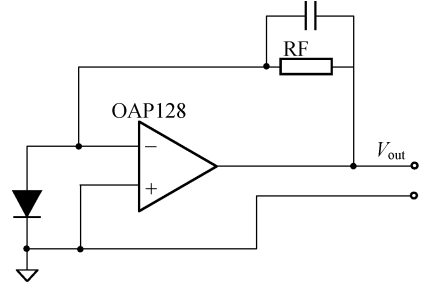


图4 单片硅光电二极管探测器前置放大器原理示意图

Fig. 4 Principle diagram of pre-amplifier in single silicon photodiode detector

单片硅光电二极管探测器电子学设计的主要任务是选取合适的前放和反馈电阻,设计高性能 I-V 转换网络。根据对输入光电流的估算,确定反馈电阻为 50 k Ω 。积分球上监测探测器开口大小为 $\Phi 10$ 。

4 外部导入激光的 ISS 辐射特性测试

为了定量评价这种新型的外部导入激光的

ISS 的辐射特性,利用基于 Trap 的辐亮度探测器和 532 nm 单波长激光器测量了 ISS 的辐亮度非稳定性、平面非均匀性和角度非均匀性。

4.1 辐亮度非稳定性

将探测器垂直于积分球出口中心测量 ISS 的辐亮度非稳定性。所有仪器预热半小时,每隔 30 s 测量一次,每次测量采样 36 个点取平均,连续测量 30 min。ISS 辐亮度非稳定性按式(4)计算:

$$u = \left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}} - 1 \right) \times 100\% , \quad (4)$$

其中, u 为非稳定性; V_{\max} 为最大测量值; V_{\min} 为最小测量值。

对每次测量相对平均值归一化,图 5 给出了双光路导入时的测量结果。按照式(4)计算,非稳定性为 0.09%。

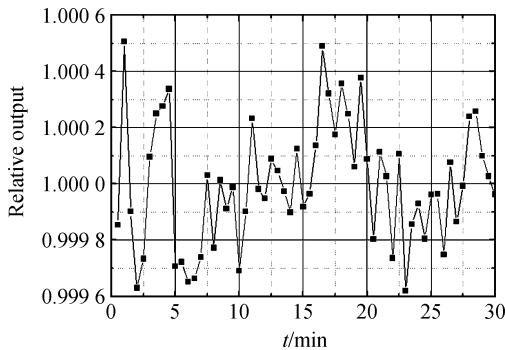


图 5 双光路导入 ISS 的辐亮度非稳定性

Fig. 5 Radiance instability of ISS while two beam path is illuminated into integrating sphere

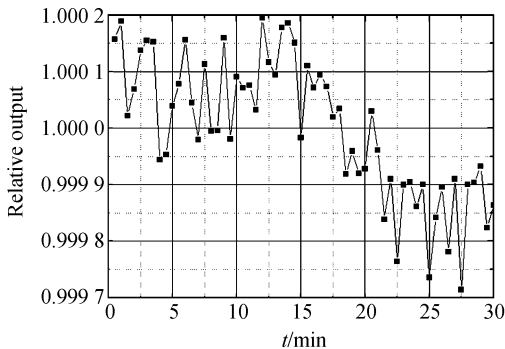


图 6 单光路导入 ISS 的辐亮度非稳定性

Fig. 6 Radiance instability of ISS while one beam path is illuminated into integrating sphere

在相同条件下,测量了单光路导入时的非稳定性。按照式(4)计算非稳定性为 0.05%,测量结果如图 6 所示。

实验表明双光路导入 ISS 辐亮度稳定性略低于单光路导入,这可能是由于分束引起的。为了实现双光路导入,增加了一片分束镜和两片全反射镜,2 路光相对 1 路光路径比较长,受空气扰动等环境影响比较大。

4.2 辐亮度平面非均匀性

将探测器固定在二维平移台上垂直于出光口面,以积分球出口中心为原点,沿水平方向(x 轴)左右平移、沿竖直方向(y 轴)上下平移进行网格状扫描测量。所有测量点值相对中心点测值归一化,图 7 给出测量结果,其中平移间隔定为 7 mm。在直径 63 mm 的圆形区域内,平面非均匀性按照相对标准偏差计算为 0.16%。

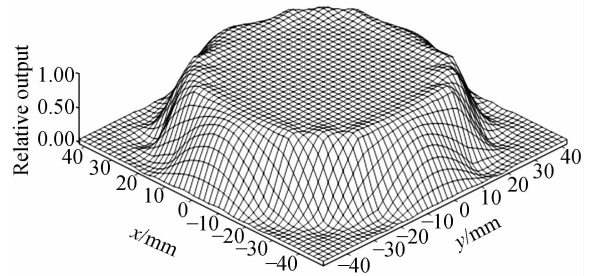


图 7 ISS 辐亮度平面非均匀性测量结果

Fig. 7 Measurement result of plane nonuniformity

4.3 辐亮度角度非均匀性

为了定量评价 ISS 的朗伯特特性,需测量它的角度非均匀性。将探测器固定在积分球几何特性测试系统角度特性测量台上,分别在水平和垂直面内旋转探测器,使探测器始终对准出口中心,在 $\pm 22^\circ$ 内以 2° 为间隔进行扫描测量。角度为出口法线与探测器轴线的夹角,逆时针为正。各角度点采样 36 次取均值,各点测量均值相对于 0° 点测量均值归一化。用相对 0° 测值的最大偏差(最大值/ 0° 测值-1)表示 ISS 的角度非均匀性。

4.3.1 水平面内角度非均匀性

如图 8 所示,双光路入射时角度非均匀性是 1.8%;单光路入射时为 2.4%。

如果增加观测角度范围将有可能观察到积分球入口处,因此只测量水平面 $\pm 22^\circ$ 范围内的角度特性。尽管实验过程中两束光路的光功率不相

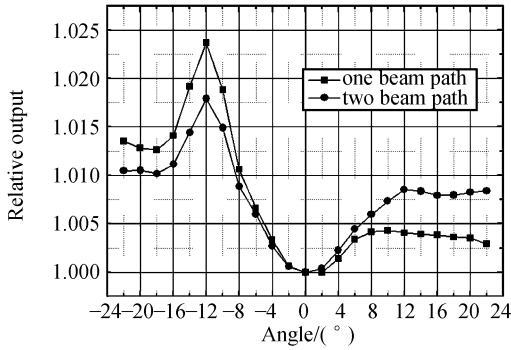


图8 ISS水平面内的角度非均匀性

Fig.8 Angular nonuniformity of ISS in horizontal plane

等,但是由图9仍然可以看出双光路导入相对单光路导入增加水平面内的角度均匀性。

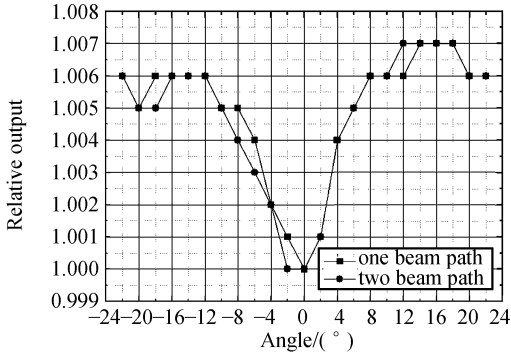


图9 ISS垂直平面内的角度非均匀性

Fig.9 Angular nonuniformity of ISS in vertical plane

参考文献:

- [1] MIELENZ K D, SAUNDERS R D, SHUMAKER J B. Spectroradiometric determination of the freezing temperature of gold[J]. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1990,95:49 - 67 .
- [2] ANDERSON V E, FOX N P, NETTLETON D H. Highly stable, monochromatic and tunable optical radiation source and its application to high accuracy spectrophotometry[J]. *Appl. Opt.*, 1992,31(4): 536-545.
- [3] YASUJI Y. Radiometric calibration facility for optical sensors using wavelength-tunable laser [C]. *SICE Annual Conference in Fukui*, 2003:38-41.
- [4] FERRERO A, CAMPOS J, PONS A. Low-uncertainty absolute radiometric calibration of a CCD[J]. *Metrologia*, 2006,43:S17-S21.

4.3.2 垂直平面内角度非均匀性

测量结果表明双光路导入并不增加垂直平面内的角度均匀性,如图9所示。因为两入射光路对于垂直平面对称的,从几何结构上也能得到这样的结论,垂直平面内角度非均匀性为0.7%。

5 结论

为了满足光谱辐射遥感器的定标需求,本文研制了新型的外部导入激光的积分球辐射源;测量了积分球辐射源的基本辐射特性,测试结果表明这种新型定标源在30 min内的稳定性高达0.09%,在积分球出口中心 $\Phi 63$ mm范围内平面非均匀性为0.16%, $\pm 22^\circ$ 范围内在水平面内和垂直面内的非均匀性分别为1.8%和0.7%,表明其具有良好的稳定性、平面均匀性和朗伯特性。相对于灯照明积分球辐射源,它具有光谱辐通量高、波长准确性好、可宽波段调谐等优点,可以在辐亮度模式下直接标定仪器的光谱辐亮度响应度。

- [5] JOHNSON B C, BROWN S W, EPELDAUER G P, *et al.*. System-level calibration of a transfer radiometer used to validate EOS radiance scales[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 2003,24(2):339-356.
 - [6] YASUJI Y. Development of a spectral response calibration system using a wavelength-tunable laser and an integrating sphere[C]. *SICE*, 2002:2082-2087.
 - [7] FERRERO A, CAMPOS J, PONS A. Low-uncertainty absolute radiometric calibration of a CCD[J]. *Metrologia*, 2006(43):17-21.
 - [8] 郑小兵,吴浩宇,章骏平,等. 不确定度优于0.035%的绝对光谱响应率标准探测器[J]. *光学学报*, 2001, 21(6):749-752.
- ZHENG X B, WU H Y, ZHANG J P, *et al.*. Absolute spectral responsivity standard detectors with uncertainty less than 0.035% [J]. *Acta Optica*

Sinica, 2001, 21(6):749-752. (in Chinese)

- [9] Labsphere Inc. A guide to integrating sphere theory and applications [OL]. <http://www.labsphere.com/tecdocs.aspx>.
- [10] J. C. 丹蒂. 激光斑纹及有关现象[M]. 北京: 科

学出版社, 1981:127-128.

DAINTY J C. *Laser Speckle and Related Phenomena* [M]. Beijing: Science Press, 1981:127-128. (in Chinese)

作者简介:



徐秋云(1983—),女,河南濮阳人,博士研究生,主要从事光谱辐亮度响应度的实验室定标工作。E-mail: qyxu@aiofm.ac.cn



李健军(1980—),男,安徽桐城人,助理研究员,主要从事光学遥感器高精度辐射定标方法的研究。E-mail: jili@aiofm.ac.cn

导师简介:



郑小兵(1969—)男,安徽合肥人,研究员,博士生导师,主要从事光辐射精密测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和海洋光学等方面的研究。E-mail: xzbzheng@aiofm.ac.cn



张 伟(1952—),男,山东枣庄人,高级工程师,主要从事光机电综合工程和激光技术、光辐射定标等方面的研究。E-mail: zhangwei@aiofm.ac.cn

● 下期预告

提高 RB-SiC 基底反射镜表面改性效果的有效方法

申振峰^{1,2},高劲松¹,王笑夷¹,王彤彤¹,陈 红¹,郑宣鸣¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,中国科学院 光学系统先进制造技术重点实验室,长春 130033;2. 中国科学院 研究生院,北京 100049)

为了满足空间应用中大口径、复杂轻量化结构的 RB-SiC 基底反射镜对高性能表面质量的应用需求,针对 RB-SiC 基底的特性,改进了表面改性工艺方法。采用高能量考夫曼离子源辅助,预先对基底进行碳化和加镀 C 缓冲层,并制备 Si 改性涂层的方法对 RB-SiC 基底进行了表面改性。测试结果表明:与单纯霍尔离子源辅助方法相比,此工艺方法制备的 Si 改性涂层生长得更加致密、均匀,抛光特性良好;改性抛光后表面粗糙度(rms)降低到 0.635 nm,已达到 S-SiC 基底的水平;改性后 RB-SiC 基底的反射率明显提高,已经达到抛光良好的微晶玻璃的水平。结果表明该工艺方法是提高 RB-SiC 基底表面改性效果的一种十分合理有效的方法。