

文章编号: 0253-2239(2009)05-1310-05

利用可调谐激光的积分球光源辐射特性测试

徐秋云 郑小兵 张 伟 李健军

(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 为了提高光谱辐亮度响应度的定标精度, 研制了新型的利用宽可调谐激光的积分球光源。把外部激光导入积分球, 在球出口形成均匀、准朗伯性的面光源。利用钛宝石激光器 710 nm 输出光研究了光源的辐射特性。双光路导入、采取消相干措施条件下, 光源辐亮度的非稳定性在半小时内为 0.06%, 在出口中心 $\phi 60$ mm 范围内平面非均匀性为 0.16%, $\pm 22^\circ$ 范围水平面内和垂直面内的角度非均匀性分别为 1.3% 和 0.7%。这种新型的积分球光源具有稳定性好、光谱辐通量高、光谱带宽窄、光源面积大、波长在宽波段内可调谐等优点, 联合响应度直接溯源于初级辐射标准低温辐射计的标准探测器, 可以有效降低定标不确定度。

关键词 激光器; 可调谐激光; 积分球; 光谱辐亮度; 定标

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092905.1310

Radiometric Characteristics Test of Integrating Sphere Source Using Wavelength-Tunable Laser

Xu Qiuyun Zheng Xiaobing Zhang Wei Li Jianjun

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

Abstract To reduce the calibration uncertainty of spectral radiance responsivity, a new tunable laser-based integrating sphere source was developed. In this facility, high-power, tunable laser outputs were introduced into an integrating sphere, producing uniform, quasi-Lambertian, high radiant flux planar source. Ti:sapphire laser 710 nm output light was used to study the radiometric characteristics of the source. While two-beam paths were introduced into the sphere and laser speckle was eliminated, the radiance instability was 0.06% in 30 min; the radiance was spatially uniform within 0.16% over the most central region $\phi 60$ of the sphere exit port; the angular nonuniformities in horizontal and vertical plane within the range of $\pm 22^\circ$ were 1.3% and 0.7% respectively. This source have the advantages of high stability, high spectral radiant flux, narrow bandpass, large area, tunable wavelength in broad spectral range, etc. The radiometric properties of the source couple with state-of-the-art standard detector whose responsiveness are directly traceable to primary radiometric scales can reduce the calibration uncertainty effectively.

Key words lasers; tunable laser; integrating sphere; spectral radiance; calibration

1 引 言

探测器的光谱功率响应度一般采用灯-单色仪系统通过调节激励源的波长进行定标^[1]。可见波段定标硅探测器的不确定度为 0.1%, 但是仪器的光谱辐照度或辐亮度响应度的定标不确定度较大。此

外, 在紫外和红外波段的不确定度更大。由于灯-单色仪系统的辐通量较低 ($\approx 1 \mu\text{W}$), 无法直接定标仪器的光谱辐照度或辐亮度响应度^[2]。灯-单色仪激励源的辐通量较低还限制了系统的有效动态范围。

可调谐激光器的发展, 使得在辐射定标领域引

收稿日期: 2008-08-11; 收到修改稿日期: 2008-10-08

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z106)资助课题。

作者简介: 徐秋云(1983-), 女, 博士研究生, 主要从事利用外部导入可调谐激光的积分球光源定标光谱辐亮度响应度研究。E-mail: qyxu@aiofm.ac.cn

导师简介: 郑小兵(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高精度光辐射测量等方面的研究。

E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn

入高功率、单色、波长可调谐的光源成为可能^[3~5]。

基于激光的定标系统相对于传统的灯-单色仪系统具有许多优点。激光的波长不确定度大约为 0.001 nm, 而灯-单色仪系统的波长不确定度为 0.01 nm。灯-单色仪系统的光谱带宽为 4 nm, 为了得到光谱响应度必须利用光源的狭缝散射函数对光谱进行反卷积以消除光源非单色性的影响。激光的典型带宽为 0.001 nm, 是一种理想的单色光源, 更容易测量光谱响应度的精密细节。较高的辐通量和较低的杂散光使得基于激光的定标系统带外测量的动态范围为 10^9 , 相对灯-单色仪系统提高了 3 个量级。作为辐亮度均匀的单色面光源, 还可以快速表征和定标数字成像系统, 比如西班牙的 Alejandro Ferrero 等人对 CCD 的曝光量响应度进行绝对辐射定标^[6]。日本的 Yamamoto Yasuji 研制的光谱响应度定标系统同样由波长可调谐激光器和积分球组成, 用于定标大孔径卫星光学传感器^[7]。此外, 基于激光的定标系统不会由于定标光源和观测目标的光谱能量分布不同引起测量误差。

应用积分球光源定标探测器之前需研究它的辐射特性, 这也为评估定标不确定度提供光源参数。本文简要介绍了光源的各个组成部分, 包括激光器、积分球、消相干装置和光路导入方式等, 详细介绍了积分球光源在采取或不采取消相干措施、不同的光路导入方式下的辐射特性。

2 利用宽可调谐激光的积分球光源

图 1 是利用宽可调谐激光的积分球光源定标系统示意图, 其中 M1、M2、M3、M7 和 M8 是全反射镜, M4 是用于抬高光路的转折镜, M5 是玻璃片, M6 是分束镜。积分球光源的主要组成部件是抽运激光器、钛宝石激光器、波长计和积分球等。

钛宝石激光器 (Coherent, Inc. Model MBR-110)^[8] 输出光的波长范围为 700~1000 nm, 在 15 W 抽运源的激励下, 输出光功率可达 0.2 W~1 W。抽运激光器是二极管抽运的、倍频的 Nd:VO₄ 固体激光器 (Coherent, Inc. Model Verdi-V18), 波长为 532 nm。本次实验使用的是 MBR-110 710 nm 输出光。

积分球光源不仅面积大、空间均匀, 并且自身具有消干涉、消偏振的作用。积分球几何参数如下: 内径 $\phi 250$ mm, 出口 $\phi 80$ mm, 入口 $\phi 10$ mm。球内壁涂层是漫反射率在 250~2500 nm 波段高达 97% 的聚四氟乙烯。

利用积分球内部漫射板转动的技术消除激光散

斑。在球上开一个 $\phi 33$ mm 的开口, 把电机固定在球上, 电机带动一个 $\phi 30$ mm 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, 已经验证^[9] 有效去除散斑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。采用了微型直流电机, 它的旋转频率最高可达 7000 r/min。

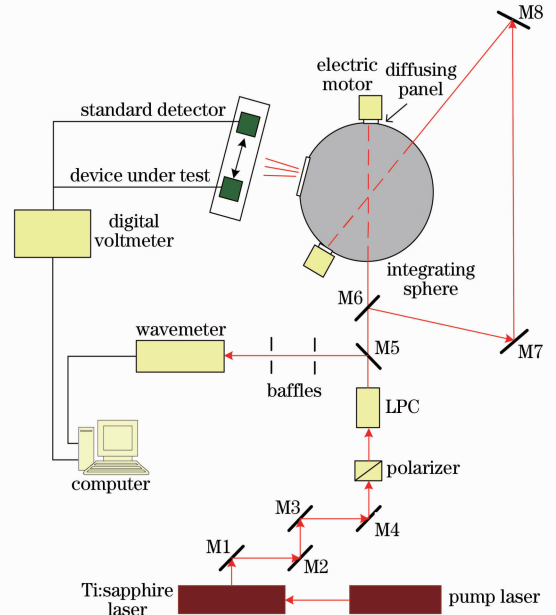


图 1 利用宽可调谐激光的积分球光源示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the integrating sphere source using a wavelength-tunable laser

为了使积分球光源出射光具有良好的角度均匀性, 设计外部激光双光路导入方式。分束镜采用双面镀膜的分光平片, 一面镀介质分光膜, 另一面镀增透膜, 因此具有能量损失低, 损伤阈值高的特点。

3 积分球光源辐射特性测试

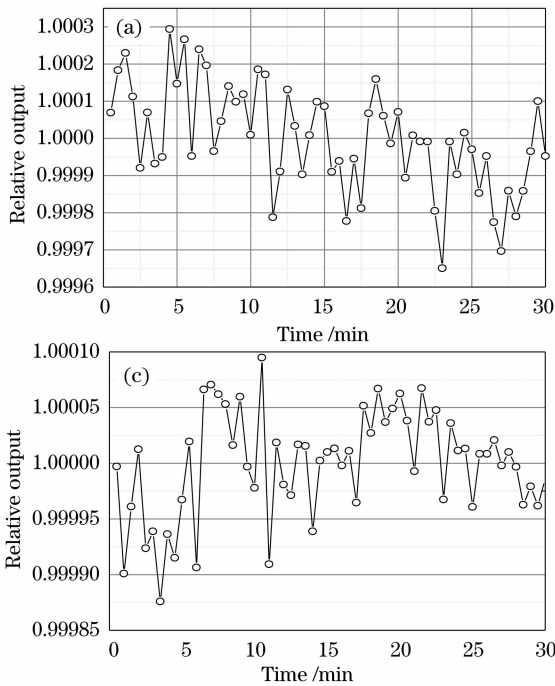
把外部激光导入积分球, 经内壁涂层多次漫反射在出口形成均匀、准朗伯性的扩展光源。辐亮度是描述扩展光源辐射特性的物理量, 根据它可以计算出光学系统接收到的辐通量。在应用积分球光源定标光谱辐亮度响应度之前需研究它的辐射特性, 这也为评估定标不确定度提供光源参数。

3.1 辐亮度非稳定性

利用积分球光源定标光谱辐亮度响应度需要一定的时间, 因此要评价光源的辐亮度非稳定性。比较双光路导入或单光路导入、电机旋转或不旋转条件下积分球光源的辐亮度非稳定性。非稳定性按照

$(V_{\max} - V_{\min}) / V_{\min}$ 计算。

测量积分球光源在 30 min 内的非稳定性。辐



亮度探测器的输出信号相对平均值归一化,图 2 给出在不同条件下的测量结果。

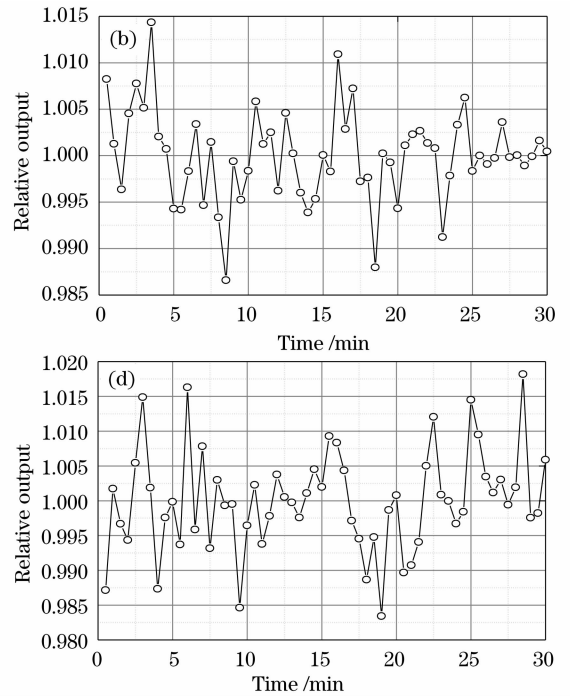


图 2 积分球光源辐亮度非稳定性。(a)双光路导入、电机旋转;(b)双光路导入、电机不旋转;
(c)单光路导入、电机旋转;(d)单光路导入、电机不旋转

Fig. 2 Instability of radiance of the integrating shpere source. for two beam paths with
(a) and without (b) motor rotation, one beam path, with (c) and without (d) motor rotation

积分球光源在不同测量条件下的辐亮度非稳定性测量结果如表 1 所示。

由表 1 可知,电机旋转时,单光路导入稳定性优于双光路导入;电机旋转稳定性远远好于电机不旋转,表明漫射板旋转有效去除了散斑噪声。

表 1 积分球光源辐亮度非稳定性测量结果

Table 1 Measurement resulte of radiance instability of integrating shpere source

	Instability / (%)	
	Motor rotation	No motor rotation
	Two-beam paths	0.06
One-beam path	0.02	3.5

图 2(a)表明积分球光源辐亮度随时间呈下降趋势,实验表明是由激光功率控制器(LPC)出射光功率衰减引起的。

3.2 辐亮度平面非均匀性

由辐亮度的定义^[10]可知,扩展光源的辐亮度一般与发光面元的位置有关。辐亮度响应度定标要求在探测器的视场范围内观测到的光源辐亮度与位置无关,即要求定标光源是辐亮度平面均匀的光源。

为了评价积分球光源的辐亮度平面非均匀性,把辐亮度探测器固定在二维平移台上以一定的间隔进行网格状扫描测量。由于探测器自身对积分球出射光的反射影响光源的辐亮度分布,因此我们在探测器到出口不同距离处进行测量。平面非均匀性按照相对标准偏差计算。表 2 给出测量结果。

表 2 平面非均匀性测量结果

Table 2 Measurement results of planar nonuniformity

	Relative standard deviation ($\phi 60$)	
	One-beam path	Two-beam paths
Distance to exit port is 1.5 cm	3.5×10^{-3}	2.4×10^{-3}
Distance to exit port is 15 cm	2.2×10^{-3}	1.6×10^{-3}

由表 2 可知,探测器离积分球出口越远辐亮度平面均匀性越好,可能有两个因素造成这一结果:

- 1) 离出口越远,观察的光源面积越大;
- 2) 离出口越远,探测器自身的反射对光源的影响越小。

表 3 给出双光路导入、探测器离出口约 15 cm 时在出口中心 $\phi 60$ 范围内的测量结果,所有测量点值相对中心点测值归一化。

表 3 积分球出口辐亮度平面非均匀性测量结果

Table 3 Measurement results of planar nonuniformity of integrating shpere exit port radiance

$x \setminus y$	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
-30					1.004	1.004	1.004	1.004	1.004				
-25				1.004	1.004	1.004	1.004	1.004	1.004	1.004			
-20			1.004	1.004	1.004	1.004	1.003	1.004	1.004	1.004	1.004		
-15		1.005	1.004	1.004	1.003	1.003	1.003	1.003	1.004	1.004	1.004	1.004	
-10	1.005	1.005	1.004	1.004	1.003	1.002	1.002	1.002	1.003	1.003	1.004	1.004	1.004
-5	1.005	1.005	1.004	1.003	1.002	1.001	1.001	1.001	1.001	1.002	1.003	1.004	1.004
0	1.006	1.005	1.004	1.002	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.002	1.003	1.004	1.004
5	1.006	1.005	1.003	1.002	1.000	0.999	0.999	0.999	1.000	1.001	1.002	1.004	1.004
10	1.006	1.005	1.003	1.002	1.000	1.000	0.999	0.999	1.000	1.001	1.002	1.004	1.004
15		1.004	1.003	1.002	1.001	1.000	1.000	1.000	1.001	1.002	1.003	1.004	
20			1.003	1.003	1.002	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.002	1.003	
25				1.003	1.003	1.002	1.002	1.002	1.002	1.002	1.003		
30					1.003	1.002	1.002	1.002	1.002				

3.3 辐亮度角度非均匀性

一个理想的漫射面应是遵循朗伯定律的,亦即不管入射光来自何方,沿各方向漫射光的发光强度总与 cos θ 成正比,从而辐亮度相同[11]。积分球内壁涂层是漫射率高达 97% 的中性漫射材料。为了评价外部导入激光的积分球光源的朗伯特特性,在水平面内和垂直面内改变辐亮度探测器的观测角度进行扫描测量。

将探测器固定在积分球角度特性测量台上,分别在水平面内和垂直面内旋转探测器,使探测器始终对准出口中心,在±22°范围内以 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。各点测量均值相对于 0°点测量均值归一化。角度非均匀性按照相对 0°测值的最大偏差(最大值/0°测值-1)计算。

如图 3 所示,水平面内双光路导入和单光路导入角度非均匀性都是 1.3%。但是双光路导入条件下辐亮度分布更加对称。探测器轴线相对出口法线有一定角度时,一次反射光进入探测器视场,所以探测器信号相对 0°测值增大。单光路导入测量曲线不平滑可能是由于长时间测量之后实验室温度升高、湿度增大造成光源不稳定引起的。

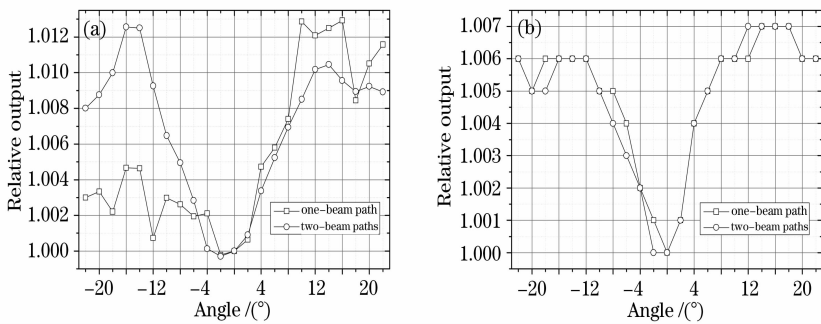


图 3 积分球光源角度特性。(a)水平面内;(b)垂直面内

Fig. 3 Angular characteristics of integrating shpere soure. (a) in horizontal plane; (b)in vertical plane

双光路导入并不影响垂直平面内的角度均匀性,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。这里给出的是前期利用 532 nm 单波长激光器导入积分球测量辐射特性的结果。垂直平面内角度非均匀性为 0.7%。

积分球光源。它具有稳定性好、光谱辐通量高、辐亮度均匀、波长在宽波段内可调谐等优点。经标准传递,作为辐亮度已知的定标源可以对滤光片辐射计的光谱辐亮度响应度进行高精度系统级定标,还可以定标 CCD 阵列探测器的光谱辐射曝光量响应度。

4 结 论

我们研制了一种新型的利用宽可调谐激光器的

参 考 文 献

1 Larason T. C., Bruce S. S., Parr A. C., Spectroradiometric Detector Measurements, Natl. Inst. Stand. Technol. Spec.

- Publ. 250—41, US Government Printing Office, Washington, DC, 1998
- 2 G. Eppeldauer, M. Racz, T. Larason, Optical characterization of diffuser-input standard irradiance meters[C]. *SPIE*, 1998, **3573**; 220~224
- 3 K. D. Mielenz, R. D. Saunders, J. B. Shumaker, Spectroradiometric Determination of the Freezing Temperature of Gold[J]. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1990, **95**: 49~67
- 4 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
- 5 Steven W. Brown, George P. Eppeldauer, Joseph P. Rice *et al.*. Spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources (SIRCUS) facility at NIST[J]. *SPIE*, 2004, **5542**: 363~374
- 6 Ferrero A, Campos J, Pons A. Low-uncertainty absolute radiometric calibration of a CCD[J]. *Metrologia*, 2006, **43**: S17~S21
- 7 Yamamoto Yasuji. *Development of a Spectral Response Calibration System Using a Wavelength-Tunable Laser and an Integrating Sphere*[M]. Osaka SICE, 2002, 5~7
- 8 Coherent. Model MBR-110 Operator's Manual
- 9 Ferrero A, Campos J, Pons A, 2005 Radiance source for CCD absolute radiometric calibration, presented at NEWRAD 2005 (Davos)
- 10 Nicodemus H J, Kostkowski H J, Hattenburg A T. Self-study manual on optical radiation measurement [R]. 1976. Chapter2
- 11 Zhao Kaihua. *Optics* [M]. Beijing: Peking University Press, 1982, p126
- 赵凯华. 光学[M].北京: 北京大学出版社, 1982, p126