

空心阴极元素灯光谱的空间分布测量方法

吴振洲, 杜学维, 李朝阳, 柯刚扬, 王秋平*

中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029

摘要 提出利用成像光谱仪研究空心阴极元素灯光谱空间分布的检测方法。自制了基于 Offner 成像系统的推扫式凸面光栅成像光谱仪, 覆盖波长范围 400~1 000 nm, 视场角 22°, 光谱分辨率 2~3 nm; 利用该光谱仪第一次得到得到 Hg 元素灯光谱的空间分布, 给出了不同波长下的空间图像和不同空间位置的光谱分布信息, 具有较高的空间分辨率和光谱分辨率; 并同时获取了不同工作电流条件下的元素灯高光谱数据, 对比分析了处于不同工作状态下光谱空间分布的差异。这为空心阴极元素灯光谱的空间分布等性能研究提供了一个很好的工具, 相关方法也可以用来研究其他类型的光源。

关键词 空心阴极灯; 成像光谱仪; 空间分布; 光谱分布

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)10-2647-04

引言

空心阴极灯是一种低气压辉光放电锐线光源, 具有强度大、稳定性好、谱线半宽度窄、背景低、寿命长、使用方便等优点^[1]。作为原子吸收光谱分析的计量光源, 对其技术指标的要求是严格的, 在光源的研制开发中, 经常需要获取不同工作参数下(如工作电流、气体压强等)的光谱分布特性, 要求其发射的特征共振线辐射强度大、自吸小、宽度窄、背景低、稳定性好, 这些都是评判光源性能非常重要的参数^[2]。同时, 由于空心阴极灯本身是易耗品, 随着使用时间的延长, 其光谱性能会逐步的变化, 例如谱线宽度变大、波长漂移等, 在不同的分析实验中, 需要对光源的光谱分布进行准确的标定测试, 以避免不良性能的空心阴极灯在测试过程中引入误差, 对分析实验的准确度产生影响^[3]。因此, 建立一种能全面准确分析空心阴极灯光源光谱分布的实验方法具有重要的实用意义。

与此同时, 空心阴极灯空间光谱的分布信息也是一个非常重要的研究对象。通过获取不同工作状态下阴极灯光谱精确的空间分布, 可以更深入的了解“空心阴极效应”和分析阴极灯工作原理, 建立空心阴极灯工作模型, 这对于光源的性能分析和结构优化都有十分重要的意义^[4-8]; 为此国外学者们提出了一些用于测定空心阴极灯空间光谱分布信息的实验装置。Okamoto 等采用一种基于相位光栅分光的装置, 可以

得到光源在若干个波长时的图像, 但是其光谱分辨率低, 且成像空间范围有限^[9]; Debal 等同时使用多根光纤探测光源的不同空间位置, 经单色仪分光后, 运用相应算法重构出光源的空间光谱分布, 但受到光纤数量的限制, 不能达到高空间分辨率, 且仅适用于轴对称的光源^[10]。

成像光谱技术的发展, 为光源空间光谱分布信息的获取提供了一种新思路。成像光谱仪是成像技术和光谱技术的有机结合, 可同时获取研究目标的光谱和空间信息, 通过利用地物反射光谱特征识别目标, 广泛应用于农、林、水利、地质、石油、测绘和城市规划等领域。基于凸面光栅的成像光谱仪, 是在 Offner 成像系统的基础上发展出来的。它首先由美国喷气推进实验室(JPL)提出并实施, 现已用到美国的机载和星载的光谱遥感系统^[11]。Offner 成像系统是一个同心三反射镜光学系统^[12], 包括两个凹面球面镜, 一个凸球面镜。这种光学系统的像差小, 结构简单, 无色差(没有透镜), 具有 1:1 的光学成像^[13]。20 世纪 90 年代后期美国的 Chrisp 等提出把凸球面镜改为凸球面光栅, 在相当宽的波长范围内, 可以实现无像散和平焦场的效果, 光学系统成像畸变小, 光谱分辨率高^[14]; 通过空间线扫描(推扫式成像)每一时刻对目标物的一个狭长空间进行全部的光谱记录, 适合于观测目标与光谱仪之间有相对运动的体系。和其他类型的成像光谱仪相比, 它具有很好的光谱分辨率和空间分辨率, 大视场角, 光路简单, 仪器体积小等特点。由于它采用全反射系统, 覆盖的波长范围可以从紫外到红外(250~2 500 nm)。

收稿日期: 2011-01-18, 修订日期: 2011-04-10

基金项目: 国家(863 计划)项目(2007AA10Z202, 2010AA10Z201)资助

作者简介: 吴振洲, 1985 年生, 中国科学技术大学核科学技术学院博士研究生 e-mail: wzz567@mail.ustc.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: qiuping@ustc.edu.cn

中国科技大学和北京市农林科学院自主研制完成一台基于凸面光栅的成像光谱仪,能够得到高空间分辨率、高光谱分辨率的探测目标信息。目前国内对于空心阴极元素灯光源的空间光谱分布还没有详细的分析,本文将利用推扫式成像光谱仪探测空心阴极灯光源,精确获取成像范围内的空心阴极元素灯光谱信息,为光源检测和分析提供了一种新方法。

1 实验装置

实验装置布置如图 1 所示,其中推扫式成像光谱仪采用 Offner 凸面光栅系统,覆盖波长范围 400~1 000 nm,光谱分辨率 2 nm^[15],采集传感器选用 CMOS 面阵探测器。入射光通过前置镜成像在入射狭缝面上,通过入射狭缝的光线依次经过平面反射镜,球面反射镜一、凸球面光栅和球面反射镜二,不同波长的单色光聚于面阵 CMOS 探测器的成像面上。光谱仪每次拍摄目标空间的一条狭长区域,经过分光系统后可以一次采集该区域的全部光谱信息,再通过推扫式采集扫描整片区域,将图像拼接起来就可以得到目标区域的完整成像光谱图。

为配合光谱仪推扫式扫描工作原理,将空心阴极元素灯架设在光谱仪前方的导轨上,正对前置镜,使发光部位位于前置镜的焦平面前后,元素灯中心轴线和运动方向均位于光谱仪子午平面内。通过电脑控制步进电机运动带动导轨,使光谱仪推扫速度与 CMOS 相机采集速度相匹配,这样可以最大程度消除成像高光谱图像的几何畸变。实验中选用的是威格拉斯仪器(北京)有限公司生产的 KY-1 型 Hg 元素空心阴极灯,启辉电压<350 V,最大工作电流 10 mA,在室内弱光环境中拍摄,尽量减少环境光线的影响。在导轨带动 Hg 元素灯匀速运动的同时,光谱仪的 CMOS 探测器记录下采集到得二维原始信息。

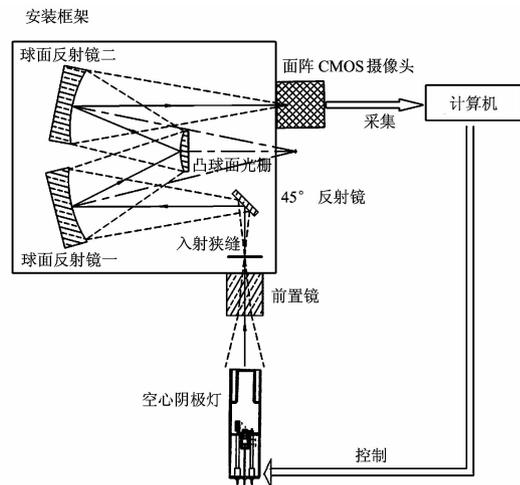


Fig. 1 Schematics of experimental set-up

光谱仪器的相关参数如表 1 所示。

Table 1 Design parameters of imaging spectrometer

入射狭缝宽度/ μm	40
入射狭缝长度/mm	10
视场角/ $^\circ$	22
瞬时视场角/mr	1.8
光谱范围/nm	450~900
光谱分辨率/nm	2~3
仪器尺寸/ mm^3	350×200×120

2 数据获取及分析

2.1 高光谱图像拼接

成像光谱仪输出的是数字量化后的二维灰度图像(灰度值范围 0~255),图像大小 1 400×1 024 像素,每帧原始图像记录了对应狭长区域的光谱信息,其中行方向是空间维狭缝方向,列方向是光谱维方向,对应波长 400~1 000 nm(实际数据处理时只考虑 450~900 nm 范围),相邻波长间隔为 0.66 nm。按照给定的狭缝宽度值,可以将图像沿光谱维方向分割成若干条带,每个条带代表入射狭缝在某个波段的成像。按照推扫拍摄的顺序,对采集到的序列图像进行分割,再将相同光谱维的条带图像按顺序进行拼接,生成各个波段的推扫成像图,得到目标区域的数据立方体,最后通过图谱显示软件读取和显示数据,即可得出不同波长下的空间图像和不同空间位置的光谱分布曲线。图 2 为光谱图像拼接示意图。

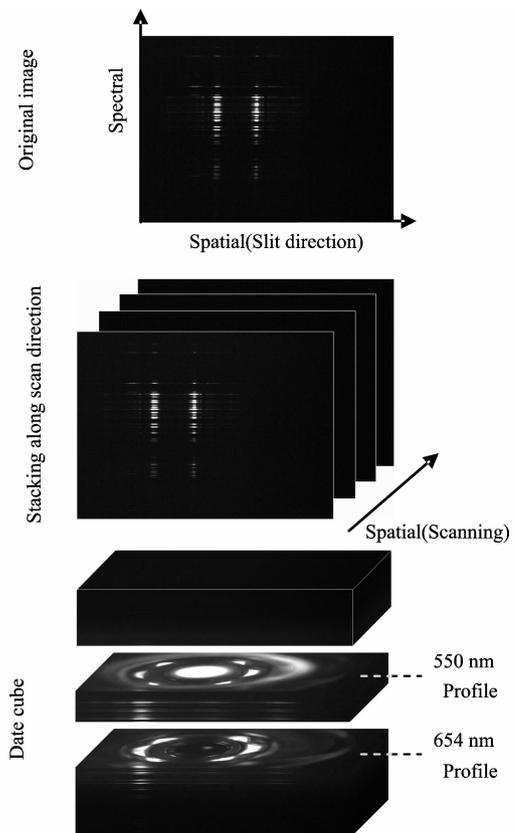


Fig. 2 Structure of hyperspectral data cube

2.2 不同波长下的空间图像

由于仪器光通量较小,原始高光谱图像的总亮度值较低,为方便观察,将高光谱图像整体乘以亮度系数,亮度增强后显示输出。实验中我们调节 Hg 元素阴极灯的工作电流,并分别记录下对应的高光谱数据,通过比对分析即可得出不同工作条件下阴极灯光谱信息的差异。由于完整的高光谱数据包含 400~1 000 nm 范围内所有波长的空间图像,无法一一查看,我们仅以 550 和 654 nm 特征波长为例,查看其对应空间图像,列于图 3 所示。

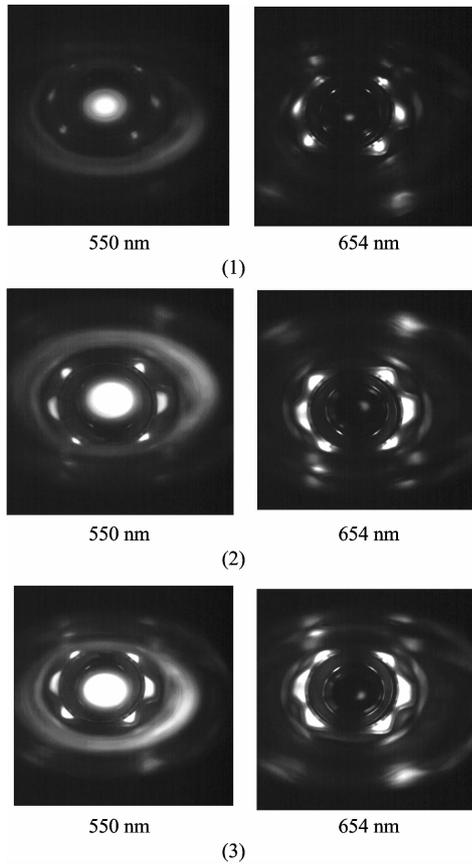


Fig. 3 Hyperspectral image of Hg-lamp at different wavelength (brighter)

1: Working current of 2 mA; 2: 4 mA; 3: 6 mA

单一波长下的空间图像描述了空心阴极灯在对应波长时亮度的空间分布,可以看出,550 nm 时光源亮度主要分布在光源中心及其周围六点,而 654 nm 时光源中心几乎没有亮度分布。同时随着工作电流的升高,550 和 654 nm 对应空间图像的总亮度逐渐增加,发光轮廓也有所变化,这对于光源的工作状态提供了很好的定量分析依据。通过查看空间图像对应的 3D 曲面图,可以更加直观的观察光源的亮度分布情况,图 4 是阴极灯 6 mA 工作电流时,550 nm 空间图像对应的 3D 曲面图。

2.3 不同空间位置的光谱信息

高光谱图像最大优点在于具有图谱合一的特点,在光源检测分析等应用中需要得到光源某些特定部位的光谱分布,运用高光谱成像技术,可以对成像范围内任意空间点或任意

空间范围内的光谱信息实现精确分析,且具有很高的光谱分辨率。通过对 Hg 元素灯推扫拼接得出的高光谱数据,空间范围内的任一点都对应了一维光谱数据,我们在空间范围内选取两个不同特征位置,分别得出在不同工作电流下的灰度分布曲线,列于图 5 所示。

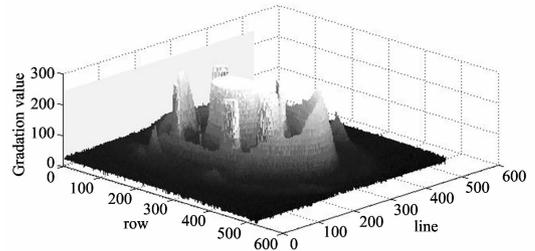


Fig. 4 3D surface of space image(6 mA, 550 nm)

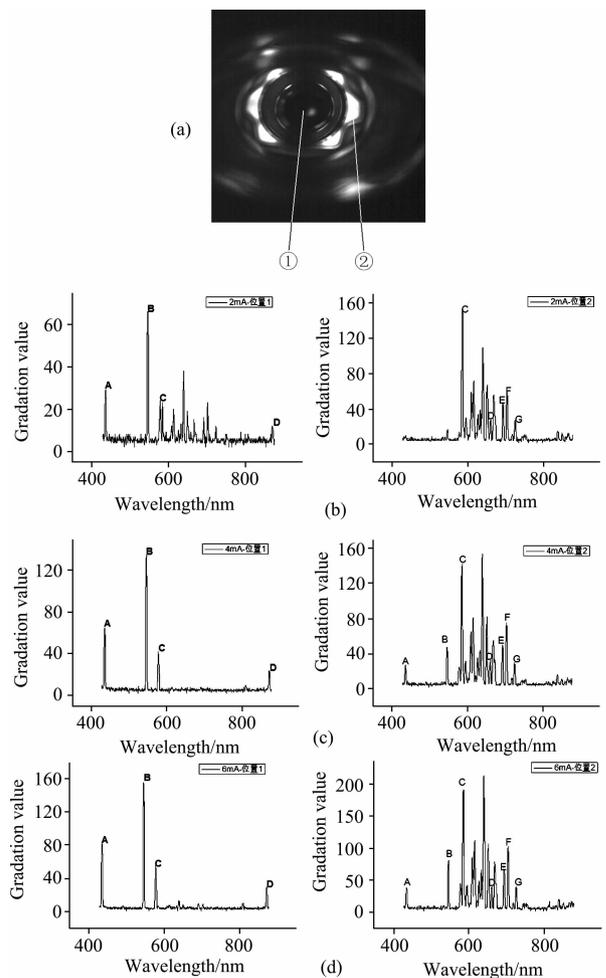


Fig. 5 Spectral distribution curve of different positions

(a): Spatial positions; (b): Working current of 2mA; (c): 4 mA; (d): 6 mA

这里得出的光谱分布曲线是数字量化后的灰度曲线,为了得到真实的目标光谱信息,需要对成像光谱仪进行辐射标定,得到仪器的光谱响应曲线,再将上述灰度曲线除以光谱响应,即可还原出实际的光谱信息,消除了光学系统和传感器对不同波长的响应不同所带来的影响。分析上述空间点在

不同工作电流时的光谱分布,可以看出当工作电流为 4 和 6 mA 时,同一空间点的光谱分布曲线轮廓相同,仅存在曲线强度上的差异,且工作电流越大,对应谱线的强度越大;但工作电流为 2mA 时,光谱分布曲线轮廓与其他两组存在较大差异。

根据波长标定后的谱线图可以判断,位置①的谱线图中 A 和 B 波长分别为 435.73 和 546.08 nm,与 Hg 元素的谱线吻合,而 C 的标定波长为 577.86 nm,判定此处为多条谱线(576.97, 578.97, 579.09 nm)的重叠, D 的标定波长为 871.49 nm,为谱线 A 的二阶谱,所以①处为 Hg 元素发出的谱线。在 Hg 的工作电流为较小的 2 mA 时,可以很明显的看见有一些杂散谱线,此时 Hg 灯没有达到正常的工作状态,引入了一些电极或者别的元素的谱线。对位置②中的谱线进行标定后,谱线 A, B, C, D, E, F, G 的标定波长分别为 435.86, 546.19, 585.5, 660.08, 693.07, 703.38,

724.66 nm(其他谱线由于相互重合,未进行标定),可以看出 A 和 B 为 Hg 元素的谱线,而其他谱线为元素灯电极其他金属材料激发产生的谱线,并且随着工作电流的增大,其谱线强度没有明显的增强趋势。

3 结果与讨论

本文利用成像光谱仪技术,提出了一种新的空心阴极灯空间光谱分布的探测方法,同时获取扫描范围内空心阴极灯的空间和光谱维信息,得出不同波长下光源的空间图像和不同空间位置的光谱分布曲线,具有较高的空间分辨率和光谱分辨率,并以此为依据获取不同工作电流下阴极灯的高光谱图,比对了分析的结果。该方法可以应用于空心阴极元素灯的性能研究。

References

- [1] WU Lian-chun, PAN Chun-fang(吴连春,潘纯芳). *Modern Instruments(现代仪器)*, 1997, (3): 42.
- [2] WU Ting-zhao, LIU Ji-lin(吴廷照,刘纪琳). *Analytical Laboratory(分析试验室)*, 1983, 6: 99.
- [3] CUI Yan-jie, MA Lian-di, SUN Hong-wei(崔彦杰,马联弟,孙宏伟). *China Metrology(中国计量)*, 2009, 11: 79.
- [4] Adamowicz T M, Donko Z, Szalai L, et al. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 1997, 65(4-5): 613.
- [5] Wagatsuma K. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*, 2001, 56(5): 465.
- [6] Maric D, Malovic G, Petrovic Z L. *Radicals and Non-Equilibrium Processes in Low-Temperature Plasmas*, 2007, 86: 12009.
- [7] Maric D, Skoro N, Malovic G, et al. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, 162: 012007.
- [8] Al-Hawat S, Akel M. *Acta Physica Polonica A*, 2010, 117(6): 911.
- [9] Okamoto T, Takahashi A, Yamaguchi I. *Applied Spectroscopy*, 1993, 47(8): 1198.
- [10] Debal F, Wautelet M, Dauchot J P, et al. *Measurement Science & Technology*, 1997, 8(6): 618.
- [11] Folkman M, Pearlman J, Liao L, et al. *SPIE*, 2001, 4151: 40.
- [12] Offner A. U. S. Patent, 3748015, 1973.
- [13] Offner A. *Opt. Eng.*, 1987, 26: 294.
- [14] Chrisp M P. U. S. Patent, 5880834, 1999.
- [15] TONG Ya-jun, WU Gang, ZHOU Quan, et al(佟亚军,吴刚,周全,等). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2010, 30(4): 1148.

Measuring Method of Spatial and Spectral Distribution of Hollow Cathode Lamp

WU Zhen-zhou, DU Xue-wei, LI Chao-yang, KE Gang-yang, WANG Qiu-ping*

National Laboratory of Synchrotron Radiation, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China

Abstract In the present paper, the authors propose a method to measure the spatial and spectral distribution of hollow cathode lamp by imaging spectrometer. A push-broom convex grating imaging spectrometer based on Offner system is presented, with wavelength range 400~1 000 nm, field angle 22° and spectral resolution 2~3 nm. The spatial distribution of Hg hollow cathode lamp was measured for the first time; this gives the spatial intensity distribution for different wavelengths and spectral distribution at different positions, with high spatial and spectral resolution. Also the hyperspectral data under different working current condition was obtained in order to analyze the differences of the distribution. It will be a powerful tool for the spatial and spectral properties measurement of hollow cathode lamps and other kinds of light sources.

Keywords Hollow cathode lamp; Imaging spectrometer; Spectral distribution; Spatial distribution

* Corresponding author

(Received Jan. 18, 2011; accepted Apr. 10, 2011)