

软 X 射线-真空紫外大电流 空阴极光源的研究

王淑荣 唐玉国

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

摘要 描述了最近研制成功的用于软 X 射线-真空紫外光谱辐射传递标准光源的大电流空阴极光源。它由两个阳极、一个阴极和一个两级差分泵单元组成, 工作电流 2 A, 工作气体为氩和氦, 气压 10 Pa ~ 100 Pa。能在 13 nm ~ 200 nm 间产生 Ar⁺、Ar⁰、He⁺、He⁰、Al⁺、Al⁰ 和 Al⁰ 谱线。光源辐射稳定性优于 ±1%, 重复性优于 ±5%。

关键词: 光谱辐射标准; 空阴极光源; 软 X 射线-真空紫外

1 引言

近年来, 随着空间光学、同步辐射、受控核聚变和 X 射线激光研究的发展, 软 X 射线-真空紫外光谱辐射计量研究十分活跃。美国 NIST、德国 PTB、日本 ETL 及英国 NPL 等国家计量机构相继建立了软 X 射线-真空紫外光谱辐射标准。所建立的软 X 射线-真空紫外光谱辐射标准有两类, 一类是以探测器为标准, 另一类是以光源为标准。前者有 NIST 发展的软 X 射线-真空紫外稀有气体电离室标准探测器及其 Al₂O₃ 光电二极管传递标准探测器; 后者有 NIST 发展的软 X 射线-真空紫外壁稳氢弧标准, PTB 和 NPL 发展的软 X 射线-真空紫外壁稳氩弧黑体谱线(BLL) 标准和目前通用的软 X 射线-真空紫外同步辐射标准。光源标准中使用的传递标准光源在真空紫外波段有氙灯和小型壁稳氩弧, 在软 X 射线波段有激光等离子体、Penning 光源和近年 PTB 研制成功的软 X 射线-真空紫外大电流空阴极光源。激光等离子体光源一般由较大能量(1~2 J)的、脉冲宽度为 6 ns ~ 7 ns 的 YAG 激光器作激发源, 经透镜聚焦到圆柱型靶面。靶材一般选用钐和钷等。为保持光脉冲的稳定, 每次激发后靶面转动, 保持表面新鲜状态。激光等离子体光源在软 X 射线波段产生强而稳定的连续辐射, 脉冲持续时间仅为纳秒。

由于这套系统颇为复杂,使这种传递标准光源使用不便。德国物理技术研究院(PTB) Danzmann 在八十年代初提出使用大电流空阴极光源作为软 X 射线传递标准光源,近年来获得广泛使用。这种光源结构较为简单,性能稳定,使用方便。而 Penning 光源在更短波长有若干强而稳定谱线,近年来作为大电流空阴极光源的补充,也得到应用。

为适应国内空间光学遥感等相关工作的发展需要,我们在合肥同步辐射装置上开辟了计量光束线,建立了光谱辐射测试装置,进行同步辐射特性研究。与此同时,我们亦着手研制大电流空阴极光源作为软 X 射线-真空紫外光谱辐射传递标准光源。本文报导了我们研制的大电流空阴极光源的工作原理、设计、结构和性能。

2 工作原理和结构

空阴极光源中,阴极制成空心圆柱状,环绕阴极内壁形成环状辉光放电。改变圆柱内径、气压及放电电压时,辉光放电区就会发生变化,当辉光放电的负辉区都集中到圆柱的轴线上时就会产生空心阴极效应。通常的辉光放电经阴极暗区加速后只一次经过负辉区与原子或离子发生碰撞,因此产生的光谱辐射较弱。发生空心阴极效应时,由阴极逸出的电子经加速后进入负辉区与其中粒子碰撞损失一部分能量后飞向对面阴极暗区,在阴极暗区的电场作用下又返回负辉区。这样当阴极筒壁足够长时,电子可消耗全部动能,最后在电场作用下飞向阳极。一般辉光放电阴极压降约 300 V,而激发原子或离子能量约需几到十几电子伏特,所以可产生几十到几百次碰撞,于是电流和光强剧增。

大电流空阴极光源为轴对称型,其剖面图如图 1 所示。它由两个阳极、一个阴极和一个差分泵单元组成,水冷。阴极为空心柱体,中心孔直径 8 mm,外径 15 mm,长 60 mm,由铝制成,靠紧压配合压入铜制的水冷套内。两个阳极设计成圆锥形,既能防止弧光放电也能避免空阴极插件由于溅射沉积导致的短路。阳极由不锈钢材料制成,中心孔内径 4 mm。阳极和阴极间 pyrex 玻璃隔圈绝缘,隔圈外径 82 mm,内径 66 mm,长 29 mm。光源各部件由“O”圈密封,静态真空度优于 10^{-1} Pa。光源配有两级差分泵单元,能实现真空紫外无窗口观测。第一级差分泵限流孔直径 1.5 mm,使观测立体角限制在小于 3×10^{-4} sr。为防止孔的堵塞,进气孔设在阳极和第一级差分泵间,第二级差分泵法兰中心孔直径取为 1.2 mm。我们根据空气动力学理论对差分泵设计进行了优化。

空阴极光源由直流稳流电源供电。阳极接地,阴极取为负高压。采用 10Ω 镇流电阻保证放电稳定,同时做短路保护。使用的工作气体为氩和氦,纯度为 99.995%,压强为 10 Pa ~ 100 Pa,气体流量通过两级微调阀控制。当工作电流为 2 A 时,能连续工作 30 h,用稀释的盐酸溶液清洗、重装、点燃后依然保持重复($\pm 5\%$)。

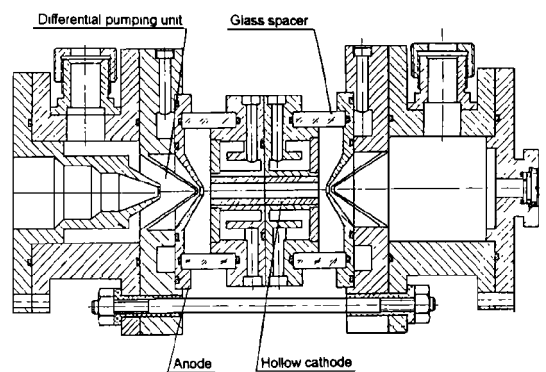


Fig. 1 The structure of soft X-ray and VUV high current hollow cathode source

3 性能测试

大电流空阴极光源测试在 3 m 凹面光栅真空紫外光谱仪和 2.2 m 凹面光栅软 X 射线-真空紫外光谱仪上进行, 如图 2 所示。

McPherson 2253M 5 3 m 真空紫外光谱仪工作波段 30 nm ~ 300 nm, 使用一块曲率半径为 3000 mm, 刻线密度为 1200 g/mm, 刻线面积 65 mm × 104 mm 凹面光栅。150 nm 处光谱分辨率为 0.002 nm。仪器由一个涡轮分子泵抽真空, 真空度达 10^{-4} Pa。光源与光谱仪入射狭缝相联。探测器为 EM19558QB 光电倍增管, 前面放置水杨酸钠荧光屏, 用来将真空紫外辐射转变为可见辐射加以探测。探测器输出经直流放大器放大, 送入 7060 型 6 位数字电压表, 又经 IEEE488 接口送入计算机。波长扫描步进电机由 Digiplan 1185A 步进电机驱动器驱动。驱动器通过 IEEE 488 接口与计算机相联。在计算机控制下完成波长扫描、数据采集、数据处理、谱线寻峰等功能。在 McPherson 247 掠入射单色仪上进行软 X 射线波段光谱测试。McPherson247 采用一块 1200 g/mm 凹面光栅 (~60 nm) 和一块 600 g/mm 光栅 (~120 nm), 光栅曲率半径 2.2 m, 刻线面积 30 × 50 mm²。McPherson247 有两种工作模式, 可摄谱也可作光电记录。当出射狭缝沿罗兰圆扫描时, 给出软 X 射线谱。探测器为通道电子倍增器, 其输出经放大, 送入数字电压表, 再经 IEEE488 接口送入计算机。在计算机控制下完成波长扫描及测量。

空阴极光源的辐射与放电电流、气压及极间压降有关。空阴极光源通常在恒流情况下工作。在惰性气体谱线情况下, 光谱线辐射亮度与电流近似成线性关系, 在空阴极溅射的金属离子谱线情况, 光谱线辐射亮度与电流的四分之一次方成正比, 实验证明了这一结果。

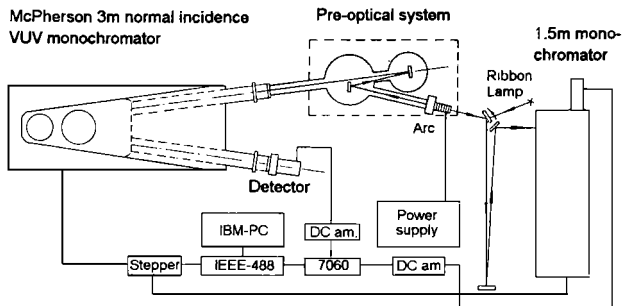


Fig.2 VUV spectroradiometer

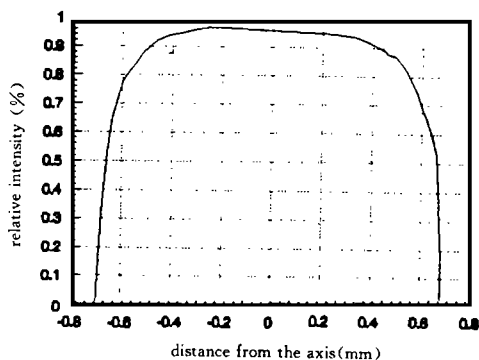
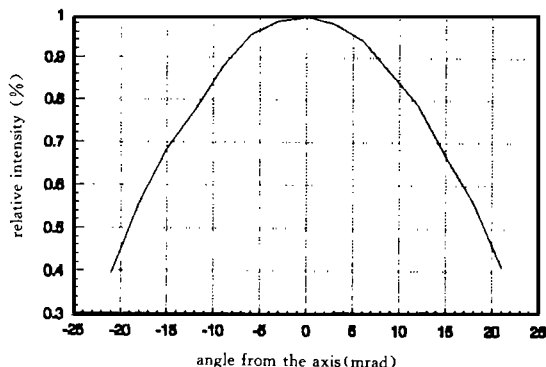


Fig.3 The angle distribution of the spectral radiance

Fig.4 Radial distribution of the spectral radiance

空阴极光源的光谱辐射亮度径向分布和角分布特性如图 3-4 所示。测量是在 McPherson 2253M5 3 m 真空紫外光谱仪上进行的,光源经平面-凹面反射镜 1:1 成像到光谱仪入射狭缝,凹面镜曲率半径 1 m。镜室抽真空。光源安装在 X-Y 调节架上,光源可沿其光轴的垂向移动,给出各光谱线径向光谱辐射亮度分布。调节架还可做角度调节,给出各谱线光谱辐射亮度角分布。

在 McPherson 2253M5 3 m 真空紫外光谱仪上进行大电流空阴极光源真空紫外波段测试。光源工作气体为氮和氩,工作电流 2A 电压分别为 240 V 和 220 V。图 5-6 给出大电流空阴极光源真空紫外光谱图。

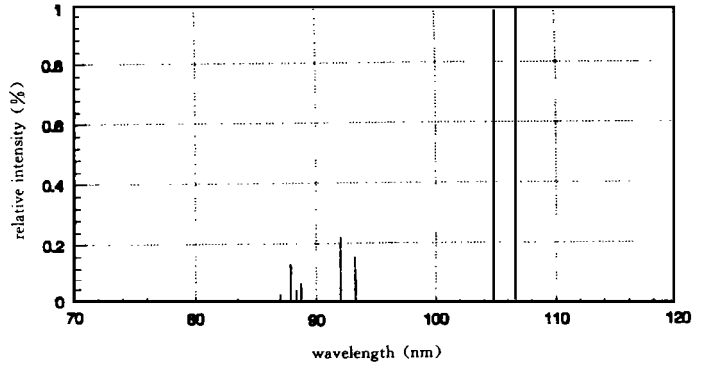


Fig. 5 VUV spectral distribution of the source (Ar as working gas)

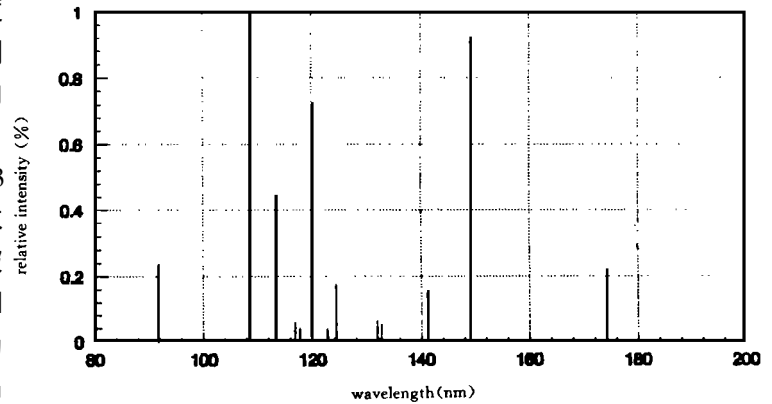


Fig. 6 VUV spectral distribution of the source (N₂ as working gas)

Table 1 Soft X-ray and VUV spectral lines and classification of the source

VUV		VUV		soft X-ray		VUV		VUV	
λ (nm)	Clssi	λ (nm)	Clssi	λ (nm)	Clssi	λ (nm)	Clssi	λ (nm)	Clssi
83.4	Ar	91.7	N	13.0	Al	154.0	Al	141.2	N
87.0	Ar	108.6	N	16.0	Al	155.7	Al	149.3	N
87.8	Ar	113.5	N	23.7	He	160.7	Al	160.7	Al
88.3	Ar	116.8	N	24.3	He	161.2	Al	161.2	Al
88.7	Ar	117.7	N	25.6	He	167.1	Al	167.1	Al
92.0	Ar	120.0	N	30.4	He	172.1	Al	172.1	Al
93.2	Ar	122.8	N	58.4	He	172.5	Al	172.5	Al
104.8	Ar	124.3	N			176.4	Al	174.3	N
106.7	Ar	132.0	N			185.5	Al	176.4	Al
119.2	Al	132.8	N			186.2	Al	185.5	Al
138.0	Al	138.0	Al					186.2	Al
138.4	Al	138.4	Al						
Ar as working gas		Ar as working gas		Ar as working gas		Ar as working gas		Ar as working gas	

大电流空阴极光源软 X 射线波段的测试是在 McPherson 247 光谱仪上进行的。工作气体

选为氦和氩时,在软 X 射线波段有很强的 He α 、He β 、Ar α 、Al α 、Al β 和 A α 谱线。表一列出大电流空阴极光源软 X 射线-真空紫外主要光谱线及分类,可以看出,在真空紫外波段出现 N α 、N β 、Ar α 、Ar β 、Al α 、Al β 和 Al γ 谱线。测试还表明当电流稳定好于 $\pm 0.2\%$ 时,光谱辐射稳定性优于 $\pm 1\%$ 。当电流、电压、气压等条件相同时,光源拆装前后光谱辐射重复性优于 $\pm 5\%$ 。

参 考 文 献

- [1] Paresce F, Kumar S, Bowyer C S. Continuous Discharge Line Source for the Extreme Ultraviolet. Applied Optics. 1971, **10**(8): 1904 ~ 1908
- [2] Danzmann K, Gunther M, et al. High Current Hollow Cathode as a Radiometric Transfer Standard Source for the Extreme Vacuum Ultraviolet. Applied Optics. 1988, **27**(23): 4947 ~ 4951
- [3] Danzmann K, Kock M. Oscillator Strengths of Ti α from Combined Hook and Emission Measurements. J. Phys., 1980, **B13**: 2051 ~ 2055
- [4] Danzmann K, Fischer J. A High Current Hollow Cathode as a Source of Intense Line Radiation in the VUV. J. Phys., 1985, **D18**: 1299 ~ 1305

Studies on High-current Hollow Cathode Source in Soft X-Ray and VUV

Wang Shurong, Tang Yuguo

(State Key Lab. of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

This paper describes the newly developed high current hollow cathode source as a soft X ray and vacuum ultraviolet spectral radiation transfer standard source. It consists of two anodes, a cathode and a two stage differential pumping unit operated at a constant current of 2A with helium or argon as buffer gas at pressures 10 Pa- 100 Pa. Several spectral lines of Ar α , Ar β , He α , He β , Al α , Al β and Al γ appear at spectral range 13 nm- 200 nm. The spectral radiance stability is better than $\pm 1\%$ and the reproducibility is better than $\pm 5\%$.

Key words: Spectral radiance standard, Hollow cathode source, Soft X-ray and VUV

王淑荣 女, 1983 年在哈尔滨科学技术大学技术物理系毕业后, 在长春光机所从事光学系统象质评价工作, 89 年获硕士学位。现致力于软 X 射线-真空紫外光学与光谱学工作。