

真空紫外空阴极气体放电光源

陈波

摘要:真空紫外空阴极光源是一种稳定的气体放电光源,工作气体为 He、Ne、Ar、N₂、H₂、CO 等,工作气压 $10\text{torr}\sim 10^{-2}\text{torr}$,工作电流 $100\text{mA}\sim 400\text{mA}$,能在 $20\sim 200\text{nm}$ 波段产生丰富的原子和离子谱线,光谱辐射稳定性优于 $\pm 1\%$ 。

一、引言

真空紫外空阴极光源^{[1][2]}是一种高稳定性气体放电光源,本世纪六十年代 R.G.Newburgh^[3]首次研制成这种光源,其阴极由石墨制成,用绝缘钢架支承,阳极由铝制成,最大工作电流 800mA ,可产生很强离子谱线,其缺点是石墨阴极溅射率高,对测试仪器的污染较严重,因而限制了它的进一步应用。F.Paresce^[4]等人作了改进,研制成阴阳极同时水冷的空阴极光源,阴极用溅射率较低的铜钨合金制成,最大工作电流 800mA ,稳定性 $\pm 1\%/小时$,在 100 小时内各种性能无明显变化。八十年代初,美国国家宇航局^[5](NASA)为发射真空紫外探测卫星而进行一系列真空紫外探测器、反射镜、光栅性能的评价工作,其中 $20\text{nm}\sim 200\text{nm}$ 波段采用了 Paresce 空心阴极光源。最近西德物理技术研究院将其性能进一步提高,发展为软 x 线——真空紫外光谱辐射传递标准光源。实验证明空阴极光源是一种波段复盖范围宽、稳定性、重复性好的真空紫外光源。

为适应国内软 x 线——真空紫外短波段光学研究的需要,我们研制成功了具有高稳定性、高重复性的软 x 线——真空紫外空阴极光源,并已应用于软 x 线波段光谱辐射计量、软 x 线——真空紫外多层膜测试和软 x 线——真空紫外光谱学研究。本文描述我们所研制的软 x 线——真空紫外空阴极光源结构、工作原理及性能。

二、光源工作原理及结构

(一) 工作原理

常规辉光放电、电流很小,一般只有几十毫安,放电区域由八部分组成,其中,主要是阴极暗区、负辉区及正柱区,辉光放电时几乎全部电压都降落在阴极暗区,可产生很强的电场,一般可达 $10^3\sim 10^4\text{V/cm}$,电子和离子都是在这个区域得到加速,获得动能,获得动能后的电子紧接着进入负辉区与离子或原子发生碰撞使之成为激发态,激发态原子或离子跃迁到基态就产生了辉光光谱。正柱区大小是随电极间距离而变的,当将阴极制成圆筒状,就会环绕阴极筒壁形成环状辉光放电,当改变圆筒直径及放电气压,辉光放电区域就会发生变化,当辉光放电的负辉区都集中到圆筒的轴线上时就会发生空心阴极效应,此时在轴线上产生一个公共负辉区,光强和电流会突然增加很多,比一般辉光放电要大几百倍,最大放电电流可

达 2 A (如图 1 所示)。

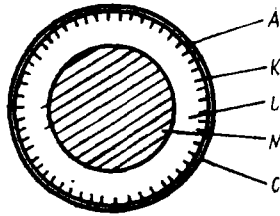


图 1

C—阴极；A—阿斯顿暗区；K—阴极光膜；
L—阴极暗区；N—负辉区

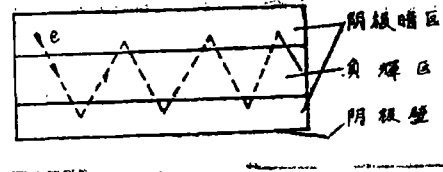


图 2

产生空心阴极效应时的大电流可用“电子摆动论”给以定性解释^[6]。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而产生光谱辐射，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发生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反回负辉区(如图 2 示)。

这样在阴极筒壁足够长时，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 300V，而激发原子或离子能量为几到十几电子伏特，所以可以产生几十到几百次碰撞，于是就产生了光强剧增的光谱辐射。

(二) 光源结构

我们所研制的软 x 线——真空紫外空心阴极光源由筒状阳极、空心阴极及差分室三部分组成，结构如图 3 所示。由于产生空心阴极效应时，阴极温度较高(约 1000 K)，电流大，溅射严重，工作气压高，因此需解决以下几个方面的问题。一、阴极散热，二、阴极材料，三、低真空高真空过渡。

辉光放电时阴极附近会产生很大的阴极位降，大量正离子经阴极位降加速而轰击阴极表面，使阴极温度急剧上升，为了解决阴极散热，我们采用了水冷方式冷却且在放电区域采用导热好耐高温的金属材料制成。如图 3 示，阴极座用导热，导电性能良好的铜制成，且采用双壁水冷方式冷却，阴极帽由铜钨合金制成。

另外由于空心阴极光源要在较大工作电流及较低的真空度下工作，因而阴极溅射变得极为突出，已知 Ar 气气氛下阴极材料溅射经验公式为：

$$S \sim (V_i - V_0)^2 \quad \text{离子能量 } 150\text{eV}$$

$$S \sim (V_i - V_0) \quad \text{离子能量 } 150 \sim 400\text{eV}$$

$$S \sim V_i^{1/2} \quad \text{离子能量 } 400 \sim 5000\text{eV}$$

S——溅射量； V_i ——离子动能； V_0 ——临界能量，虽然钨的溅射率最低，但由于其机械加工性能较差，不易加工，且导电、导热性能差，因而我们采用性能较好的铜钨合金制成阴极帽。

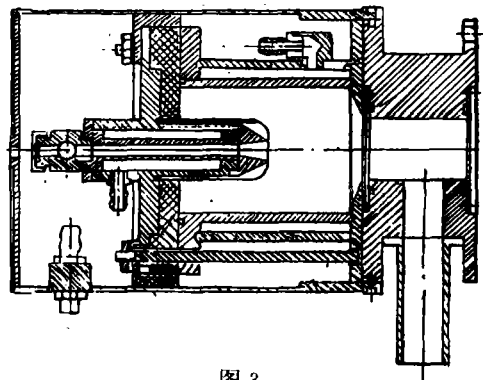


图 3

铜钨合金阴极帽和铜阴极座两部分共同组成空心阴极，阴极帽内径10mm，外径25mm，呈锥形，整个阴极组装后长90mm，内径5mm，外径25mm，阴极外装有φ28mm石英屏蔽罩，阻止阴阳极间侧向放电。阳极由铝制成，内径φ60mm呈筒状，采用双壁水冷方式冷却，阴阳极间用聚四氟乙烯绝缘。

空阴极光源一般在 10^{-4} torr光谱辐射最强，而真空紫外测试仪器一般真空度要好于 10^{-4} torr，为了解决真空过渡问题，光源与仪器间附加了一级差分泵系统。这样在光源前不需加任何窗口就能解决低真空间高真空的过渡，同时也有效地利用了光源的辐射。

如此结构的空阴极光源，能直接看到阴极辉光区光谱辐射，可产生较强离子谱线，阴阳极冷却好，阴极溅射率低，可长期稳定工作，稳定性好于±1%/小时，且可长期使用。

(三) 高压稳流电源

空阴极光源辐射强度与供电电流间关系由经验公式 $I = ai^n$ 给出

I ——光强； i ——放电电流； a, n 为常数，其中 n 随工作气体不同而异，如用 Ar 气时 $n \approx 2$ 。

由上式不难得出光强与电流相对误差间关系为 $\frac{\Delta I}{I} = n \frac{\Delta i}{i}$ ，对于 Ar 气，电流稳定性应是光强稳定性的 2 倍，如 $\frac{\Delta I}{I} = \pm 1\%$ 则要求 $\frac{\Delta i}{i} = \pm 0.5\%$ ，因此对电源稳定性要求很高。

电源由高压主回路，方波锯齿波触发器，基准取样、误差放大及预燃触发五部分组成，方框图如图 4 所示。这种电源在高压、大电流下连续可调且具有很好的电流稳定性。

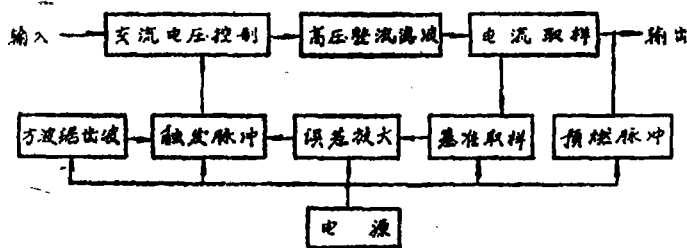


图 4

高压主回路采用可控硅控制单相变压器升压，桥式整流滤波，使输出直流电压纹波较小。为使空阴极光源能在较高的真空度下点燃，电源还附设触发电路，可使光源能在 $\sim 10^{-2}$ torr下触发点燃。

电源所能提供最大供电电压-2000V，最大工作电流400mA，稳流精度±0.5%/小时，并能提供-4000V、脉宽50ms的触发脉冲。

三、实验结果

光源软 x 线——真空紫外性能测试工作是在 Mcpherson 247 掠入射软 x 线——真空紫外单色/摄谱仪上完成的，测试系统如图 5 所示。

Mcpherson 247 所用光栅曲率半径 2.2m，刻线密度为 600l/mm, 300l/mm, 1200l/mm，系统光路如图 6 示。

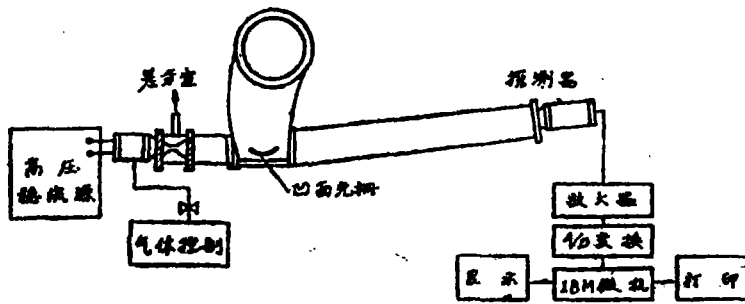


图 5



图 6

入缝、出缝、光栅都在罗兰圆上，当调换不同光栅时，谱仪可在1nm~250nm波段内工作，分辨率300l/mm为0.03nm；600l/mm 0.015nm；1200l/mm 0.008nm。

所用接收方法为光电接收及摄谱两种。用摄谱法拍摄光谱时，可将Mcpherson 247仪器上的谱盒装好，用真空紫外干板拍摄出清晰的光谱分布图。所用光电接收器有通道电子倍增器及光电倍增管两种，通常的光电倍增管由于窗口性能的限制一般只能用到180nm，为了使其能在更短波段使用，在光电倍增管前加一块水杨酸钠荧光屏，可使探测波段延伸到30nm。我们实验用通道电子倍增器为Mcpherson 247配套产品，光电倍增管为EMI 9558QB。通道电子倍增器或光电倍增管输出的电信号经放大后输入计算机A/D卡，经模/数转换后存入计算机内存，最后存入IBM微机硬盘中，以备显示、打印及数据处用，最后给出完整光谱分布曲线。

四、光谱特性

空阴极光源在软x线到可见波段都能产生很强光谱辐射，工作气体为He、Ne、Ar、N₂、CO、H₂等气体。空阴极光源在可见波段应用较为成熟，国内已有专著，这里不再赘述。本文只就软x线——真空紫外波段光谱辐射特性进行讨论，实验所用气体为He、Ne、Ar、等惰性气体。

1. 摄谱。为能对空阴极光源在软x线——真空紫外波段光谱有一个全面的了解，我们用Mcpherson 247摄谱，所用干板为KODAK SWR真空紫外干板。工作气体为Ar气，光源气压10⁻⁴torr，放电电流380mA，放电电压1.5kV，谱仪入缝30μm，谱仪真空度10⁻⁴torr，曝光时间2分钟，拍摄出很强氩原子，离子谱线如图7所示



图 7

其中有Ar I 104.8nm、Ar I 106.7nm原子线，Ar II 93.2nm、Ar II 92.0nm离子线等。

工作气体为He—Ne混合气体时，光源气压 4×10^{-4} torr，放电电流 400mA，放电电压 1500V，谱仪入缝 $30 \mu\text{m}$ ，谱仪真空度 10^{-4} torr，曝光时间 3 分钟，拍出He—Ne谱线如图 8 示。

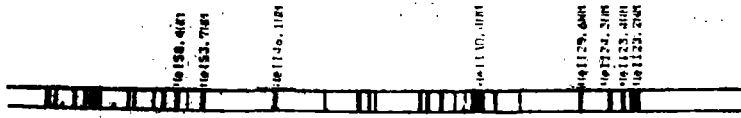


图 8

其中最强的离子谱线为 He II 30.38nm 最强的原子线为 He I 58.4nm，还有 He I 53.7nm，He I 52.2nm、Ne I 60.3nm、He II 24.3nm、He II 25.6nm、Ne II 46.1nm 等谱线。

2. 光电记录。光电记录的谱线不如摄谱拍出的谱线那么丰富，但还是有众多的谱线可以记录下来，并容易看出谱线间的相对强度。所用探测器为通道电子倍增器，光信号经通道电子倍增器系统放大后存入计算机，最后打印绘制出光谱分布谱。在工作气体为 Ar 气，光源气压 10^{-4} torr，电流 300mA，电压 1200V，谱仪前缝 $30 \mu\text{m}$ 、后缝 $50 \mu\text{m}$ 、气压 10^{-4} torr，探测器高压 2420V 扫描出 Ar 气光谱分布如图 9 示。

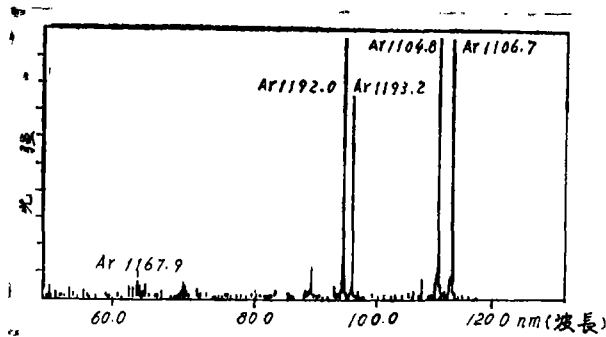


图 9

在其它条件不变光源气压变为 5×10^{-4} torr，探测器高压降为 2360V、衰减倍数提高 10 倍时扫描出纯 He 气的光谱分布图如图 10 所示。

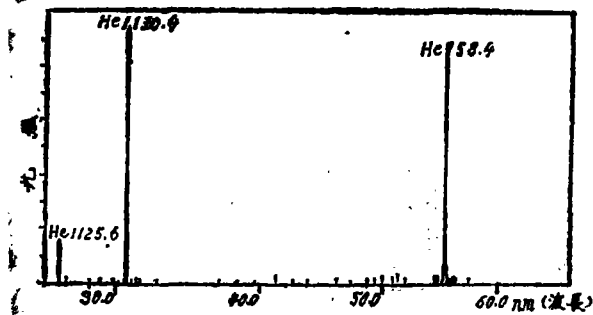


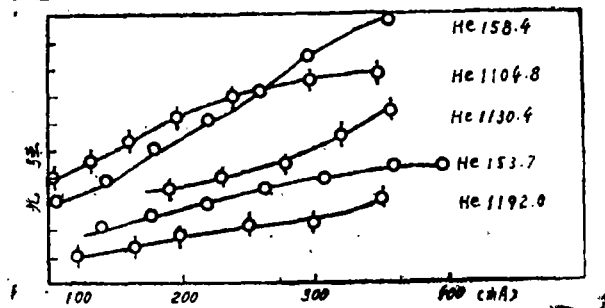
图 10

五、放电参量讨论

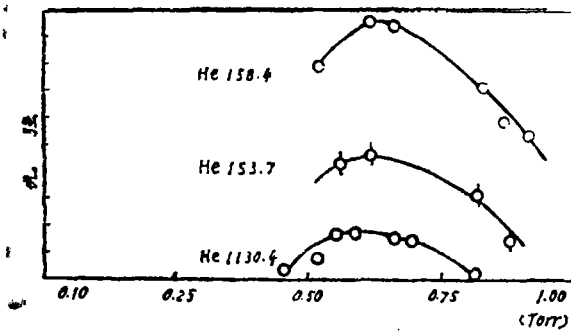
空阴极光源光谱辐射产生于空心阴极效应时的辉光放电，其辐射强度随气压、电流变化极为明显，如图11、12示。

实验表明所有谱线强度随放电电流增大而增强，其变化关系近似为 $I = ai^n$ a, n 为常数，但从实验曲线(图11)上看出离子线与经验公式符合较好，而原子线却发生了明显偏离，分析表明这主要是由于原子线自吸所引起的。

光强随气压变化如图12示，压强增大，等离子体密度增加，电子运动自由程减小，而辉光放电时电压基本不变，因而电子动能减小使谱线强度随气压增大而加



放电电流
图11



放电气压
图12

强，在 2×10^{-4} torr 达最大值，而后逐渐减弱，这种现象对波长较短的离子谱线尤为明显，当光源气压增大到一定数值、这些短波离子谱线强度很快就降为零。这一过程其严格推导可由Saha方程给出。

当光源在较高气压工作时，自吸影响会变得很明显，且退激碰撞几率增加，如3p态的原子线He I 53.7nm。

由于发生 $He^* + He \rightarrow He_2^+ + e$ 退激碰撞，使其光强随气压变化极为明显。

六、结束语

真空紫外空阴极气体放电光源，结构简单、操作方便、性能稳定、可长期连续使用，能在24nm~200nm波段产生极为丰富的原子、离子谱线、适合于真空紫外光谱学及光谱辐射计量方面的应用。

参 考 文 献

- [1] James A.R. Samson, Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy, Wiley, New York, 1967
- [2] A.N. Zaidel and E. Ya. Shreider, Vacuum Ultraviolet Spectroscopy, London, N.C.I., 1970
- [3] R.G. Newburgh, L. Heroux, et. al., Applied Optics, No.6 November 1962, 1, 733
- [4] F. Paresce, S. Kumar, and C.S. Bowyer, Applied Optics 10, No.8 August, 1971, 1904
- [5] Stan Mroks, Chris Martin, et. al., SPIE, 689, 1986, 108
- [6] 周开亿, 空心阴极放电及其应用, 真空科学与技术杂志社, 北京, 1983.

VUV Hollow Cathode Gaseous Discharge Source

Chen Bo

Abstract

VUV Hollow Cathode Source is a stable gaseous discharge source. The operating characteristics of the source and its spectral output with various gases, such as He, Ne, Ar, N₂, H₂, and CO, are presented. The discharge current varies between 100 mA and 400 mA and the operating pressure varies between 10 torr and 0.01 torr. The source can product rich atomic and ionic lines between 20 nm and 200 nm. The stability of spectral radiation is better than $\pm 1\%/1\text{hour}$.