

真空紫外双等离子管光源

王秋珍

摘要: 双等离子管光源是一低气压、热阴极弧光放电真空紫外(20nm—100nm)光谱光源。光源具有良好的稳定性和重复性,在光谱辐射计量及光谱学领域的研究中有广泛应用,它不但具有Penning光源和毛细管放电光源的优点,而且还补充了它们的不足。

一、概述

真空紫外光谱被广泛应用于高温等离子体、固体物理、光化学、天体物理等领域的研究中。实验室用真空紫外光源可分为:连续谱光源和线谱光源。连续谱光源主要应用于光谱吸收的研究中,其中同步辐射的光谱范围最广:从可见光到 α 射线。线谱光源又分为高电压小电流的冷阴极辉光放电光源、低电压大电流的热阴极弧光放电光源。双等离子管属于弧光放电光源。1962年 Samson^[1]将用于加速器中的双等离子管离子源进行改造,制成了双等离子管光源,应用不均匀磁场对带电粒子的束缚作用使其具有光谱分布广,谱线强度大等优点。本文从光源结构,放电原理,光谱测试三个方面对我们研制的双等离子管光源进行讨论。

二、光源结构

我们制做的双等离子管光源主要由以下四部分组成:灯丝阴极,中间电极,阳极和磁环。其结构见图1。

灯丝阴极采用发射率比较高的氧化物阴极,灯丝绕成双螺旋形状,采用直径0.8mm的钨做为灯丝的芯金属时,正常工作电流15A,此时阴极功率约60W。

中间电极由软铁做成,呈圆柱形,内径31mm,柱长63mm,靠近阳极的一端做成圆锥形,锥顶内径3mm,长4mm,阴极至锥顶距离可以变动,但存在一个光源容易被触发电燃的位置。我们的光源,阴极顶端至中间电极顶端距离16mm。

阳极是中间带有直径3mm的小

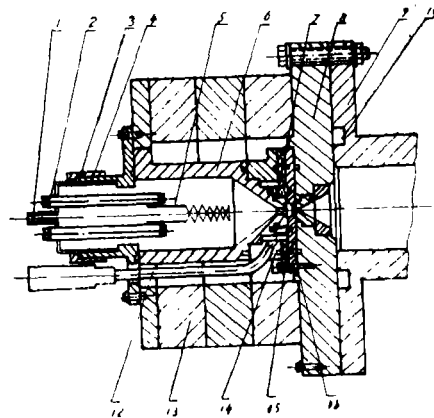


图1 光源结构

- 1—通气孔, 2—钨棒, 3—压帽, 4—阴极座
5—钨丝, 6—中间电极, 7—瓷环, 8—阳极座
9—法兰, 10—O型圈, 12—水管, 13—磁环
14—水套, 15—绝缘垫, 16—阳极板

注: 本文作者的导师为李福田。

孔的圆盘，盘的直径 53mm，阳极采用铜，这样做的目的一是使阳极冷却快，二是使中间电极和阳极间的磁场的最大值在靠近阳极的一边^[2]。阳极和软铁做成的法兰固定在一起。

磁场由三块绝缘性好的钕磁永久磁环提供，磁环外径120mm，厚 20mm，沿轴向磁化，表面磁场1200G。用钕磁永久磁环不但解决了阴阳极间的绝缘问题，而且减小了光源体积。若采用通电线圈虽然便于控制磁场大小，但需要冷却系统来冷却线圈，这无疑增加了光源体积。

磁场的磁路由磁环、中间电极、阳极法兰组成，磁流由磁环的一极出来到阳极法兰，经过中间电极和阳极间的间隙到中间电极，然后回到磁铁的另一极。

光源除灯丝阴极的供电部分外，另有两路电源分别在灯丝和中间电极间以及中间电极和阳极之间供电，阳极处于高电位。

三、气体放电原理

双等离子管光源中，阴极发射的快电子产生电离，电子可视为符合麦克斯韦分布。和一般热阴极气体放电光源一样，阴极前有一鞘层存在，流出阴极的电子流密度和流向阴极的离子流密度之间存在下列关系^[3]。

$$j_e \leq \left(\frac{M_i}{M_e}\right)^{1/2} j_i$$

阴极附近产生的自由等离子体柱流向中间电极，在中间电极入口处受中间电极约束，产生密度较大的等离子体。探针测量结果表明^{[4][5]}：中间电极入口处有一球形双鞘层存在，电子经过鞘层被加速和准直，鞘层决定了光源的稳定性。鞘层体积内的等离子体存在下列平衡关系^[6]：

$$\frac{n}{n^*} I_A 2r_b p \theta_i = n_i e \left(\frac{KT_e}{m_i}\right) F_b$$

对于双等离子管的情况，上式给出：

$$n_i \approx n_e \approx 5 \times 10^{12} I_A \text{ cm}^{-3}$$

r_b ——鞘层半径， P ——考虑除快电子的电离以外的电离系数， F_b ——碰撞空间的表面积， n ——中性粒子密度， n^* ——温度为 0°C 气压为 torr 时的粒子密度。对双等离子管来说，一般情况 $I_A < 10\text{A}$ ，所以鞘层内粒子密度 $n_i \approx n_e$ 约为 10^{13}cm^{-3} 数量级。

中间电极孔道内的等离子体和一般放电正柱一样，粒子除有轴向的定向运动外，和壁之间还发生双极散射，由

$$[(eu_{i1})/KT_e]^{-1} \exp(eu_{i1}/KT_e) = 1.16 \times 10^7 C^2 P^2 R^{2(1)}$$

取 $P = 10^{-1}\text{torr}$ ， $R = 0.15\text{cm}$ ， $u_{i1} = 15.7\text{V}$ ， $C = 5 \times 10^{-3}(\text{A})$ ，我们得到电子的温度介于 5eV 和 8eV 之间。式中 u_{i1} 为第一电离电位， R 为放电柱半径， P 为气压， C 为与气体有关的常数。

等离子体由中间电极出来，进入中间电极和阳极间有约束磁场的区域，此区间的等离子体密度更大。由于离子质量和电子质量相比较有 $M_i \gg m_e$ ，所以磁场的约束主要对电子而言。当光源工作在较低气压时，可略去粒子的径向运动，如果粒子的通量一定，粒子密度和磁场间有

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{H_1}{H_2} \quad [8]$$

对于我们的光源阳极区最大场强与中间电极出口处场强比 $\frac{H_1}{H_2} \approx 10 \sim 100$ ，我们估计阳极电子密度 $n_e \approx 10^{14} \sim 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 数量级。

在纵向磁场作用下的等离子体的密度大而温度低。根据在每一能级上存在的碰撞激发、

碰撞电离, 碰撞衰减, 自发辐射的平衡方程 $dN_k/dt = 0$ 及光强正比于 $N_k A_{ki}$ 的关系, 可以对等离子体的参量进行估计。 N_k 为 K 能级上的粒子数密度, A_{ki} 为 K 能级到 i 能级的自发辐射跃迁几率。

四、光谱测试

我们用的是 Mcpherson 247 掠入射四面光栅软 x 线-真空紫外单色仪, 所配光栅 600 L/mm , 闪耀波长 120 nm , 分辨率 0.03 nm , 入射角 88° , 以通道电子倍增器为探测元件, 用纯度 99.99% 的氩为工作气体, 保持放电电流 3 A , 灯丝电流 15 A , 工作气压 10^{-1} torr , 得到了波长从 47.39 nm 到 106.67 nm 的 Ar 线光谱, 它们是下列能级之间的跃迁产生的: Ar I: $3P^6 4P$, $3P^6 4S \rightarrow 3P^6$; Ar II: $3P^4 4S$, $3P^4 4d$, $3P^4 3d$, $3P^4 5S$, $3P^4 5d \rightarrow 3P^6$, $3S 3P^6 \rightarrow 3P^6$; Ar III: $3P^3 4S$, $3P^3 3d$, $3S 3P^5 \rightarrow 3P^4$ 。在同样的放电条件下, 用 He 作为工作气体, 得到图 2 所示的谱线, 单色仪入射和出射狭缝均为 $10 \mu\text{m}$ 。四条谱线的计数率分别为 5.2×10^2 , 4×10^3 , 4.7×10^3 , 4×10^4 计数/秒。谱线强度在低气压下随放电电流近似于线性变化, 光源的工作电压不但与气压有关, 而且与灯丝的发射情况有关。当 $I_f = 15 \text{ A}$, $P = 10^{-1} \text{ torr}$, $I_d = 3 \text{ A}$ 时, 我们测得光源稳定性和重复性优于 0.5% 。

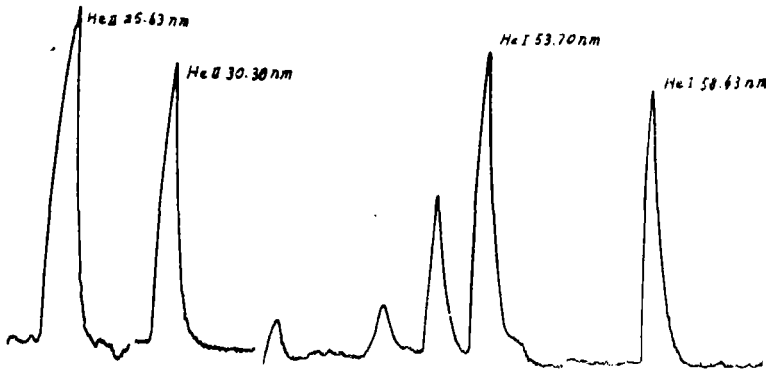


图 2

实验室常用的光源中, Penning 光源可给出 $10 \text{ nm} - 100 \text{ nm}$ 的 EUV 光谱线, 但谱线较 EUV 弱^[9]; 毛细管放电光源只能给出 50 nm 以上的谱线^[10], 我们制做的双等离子管光源辐射谱线为 $20 \text{ nm} - 100 \text{ nm}$, 而且谱线特别强。

五、结 论

用双等离子管光源我们可以得到波长 $20 \text{ nm} - 100 \text{ nm}$ 的真空紫外光谱线, 谱线强度大且稳定性和重复性好。

参 考 文 献

- [1] James. A. R. Samson, Rev. Sci. Instrum., 1962 33.1340
- [2] Bechever R. et. al., J. phys., et radium 1962 23 S₁₂₁
- [3] T. S. Green, Report on Progress in Physics 1974 37 1258
- [4] R. A. Demivkhanov, H. Fröhlich, Rep. Ist. Int. Conf. on High Energy Accelerators 1962. 224
- [5] A. Sepiter et al, Nucl. Instrum. Meth. 1965, 38. 41
- [6] A. E. Mustafa, «9th. Int. Conf. Pheno. Ionized Gases» 217
- [7] Manfred Von Ardenne, «Tabellen der Elektronen Physik Ionenphysik und übermikro- skope» Band II 1956
- [8] M. II 葛波维奇著, 万春候等译, «等离子体离子源物理与技术» 科学出版社
- [9] 关志远等, 光学机械 1983, 1, 50

Duoplasmatron as a VUV Source

Wang Qiuzhen

Abstract

In the duoplasmatron a hot cathode low pressure gas discharge is run under the confinement by an intermediate electrode and axial magnetic field in the anode region, and a highly concentrated low temperature plasme is formed. We used the radiation from the plasma as a VUV radiation source. The paper mainly discusses the construction the discharge mechanism and the spectra radiation of the source developed in our laboratory. The radiation wavelength of this source is shorter then 100nm and its stability and repeatability is better than 0.5%.