

极紫外BRV光源的研究

郭玉彬

摘要:设计了一种高强度 BRV 真空火花光源,该光源辐射强度高、波段覆盖宽、光谱平滑连续、使用寿命长。其重复性、稳定性均优于15%,最适合在非同步辐射的一般实验室中使用。在 VUV 光谱学和软 X 射线显微术、光刻等研究及应用技术领域具有广泛的实用价值。本文阐述了光源的工作原理、设计思想和具体结构,给出了较理想的光谱测试结果。

一、引言

随着软 X 射线—真空紫外光谱学研究的不断深入,人们对高强度真空紫外 (VUV) 连续谱辐射源的需求在逐步增长。1969年,Gar-ton^[1]首次制成了亮度仅次于同步辐射的 BRV 光源。该光源以其波段覆盖宽、光谱连续平滑、使用寿命长、造价低、实用性强等特点,迅速在真空紫外吸收光谱^[2]、标准辐射计量^[3]、瞬态光谱特性测试^[4]、软 X 线显微术、光刻等研究及应用技术领域得到广泛的应用。本文仅对我们研制的 BRV 光源,从光源工作原理、辐射机理、结构设计、光谱测试四个方面进行讨论。

二、工作原理

BRV 光源是一种以脉冲激发方式工作的高温等离子体箍缩装置^[5]。

低感存贮电容器连接在共轴的阳极和阴极间,通以20kV 直流高压后(阳极处于高电位),极间出现沿面放电。当触发脉冲作用到触发电极表面时,激发出滑动火花,使极间阻抗瞬间减小,电容器贮能随即全部释放。阳极靶材料由于加速电子的碰撞而升温,产生局部蒸发。而加速电子与电离蒸气间的剧烈碰撞,导致了阳极附近等离子体壳层的出现。强大的峰值脉冲电流所产生的感生磁场,使其发生径向箍缩,形成直径1~3mm高温致密的等离子体^[6],同时由于加速电子与阳极金属离子进行库仑碰撞的结果,爆发了高强度软 X 线—真空紫外连续谱辐射。为了得到高能电子,通常光源的工作气压应保持在 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ Torr,以便有效地利用加速电场,减少由于频繁碰撞而造成的能量损失。

三、辐射机理

BRV 光源等离子体的光谱辐射特性可以通过自由—自由(韧致辐射)的基本过程^[6]确定。高速电子突然被阳极靶表面形成的等离子体壳层阻挡后与包层中作热平衡运动的离子发生库仑碰撞,减速的同时产生韧致型连续谱发射。而由于电子在原子构成的阳极靶内传

注:本文作者的导师为李福田

输, 在阳极靶边缘区辐射出较强谱线。因此, 典型的韧致辐射显示了迭加在连续谱之上的特性辐射谱线。

韧致型辐射的短波长阈可由关系式

$$eV = h\nu_0 \quad (1)$$

$$\text{得出 } \lambda_{\min} = \frac{12400}{V} (\text{\AA}) \quad (2)$$

其中 V —— 极间电势差

h —— 普朗克常数

ν_0 —— 辐射输出的最大频率 (Hz)

e —— 电子电荷量

由此可见, λ_{\min} 受到 V 的限制。通过提高工作电压可以有效地降低短波长阈。

由量子力学理论^[1]可得到其韧致辐射量:

$$U_{f, \tau_e} = \frac{N_e N_i n z^2 e^6}{3\sqrt{6} \pi^{3/2} \epsilon_0^3 c^3 m^{3/2}} (KT_e)^{1/2} \bar{g} \exp(-hf/KT_e) \quad (3)$$

其中 U_{f, τ_e} —— 等离子体在单位体积中、在中心频率为 f 的单位频率间隔内所发射的辐射功率、 ϵ_0 —— 真空中的介电常数

T_e —— 电子温度, n —— 折射率 ~ 1 ,

z —— 原子序数, f —— 辐射中心频率,

N_e —— 电子密度, N_i —— 离子密度,

\bar{g} —— 自由——自由高登系数,

x_H —— 氢的电离能。 c —— 真空中光速

K —— 玻耳兹曼常数, m —— 电子质量

可得到:

$$U_{f, \tau_e} = 6.37 \times 10^{-53} N_e N_i z^2 (KT_e)^{1/2} \bar{g} \exp(-hf/KT_e) (\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Hz}^{-1}) \quad (4)$$

也可表示为

$$U_{\lambda, \tau_e} = 1.90 \times 10^{-34} \frac{N_e N_i z^2}{\lambda^2 (KT_e)^{1/2}} \bar{g} \exp\left(-\frac{12395}{\lambda KT_e}\right) (\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{\AA}^{-1}) \quad (5)$$

此式表明韧致辐射强度与 λ^2 成反比, 这是韧致型发射的典型特征。

将 (5) 式对 λ 求导, 可得

$$\lambda_{\max} = \frac{6200}{KT_e} (\text{\AA}) \quad (6)$$

将 (4) 式对 f 积分, 可得单位体积等离子体辐射的总功率

$$U_{\tau_e} = \sqrt{\frac{2\pi}{3}} \frac{z^2 e^6 N_e N_i}{6\pi^2 \epsilon_0^3 c^3 m^{3/2} h} (KT_e)^{1/2} = 1.54 \times 10^{-38} z^2 N_e N_i \sqrt{KT_e} (\text{W} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (7)$$

由 (6)、(7) 式可知峰值波长与电子温度成反比, 只有提高电子温度, 才会使峰值波长得到延伸, 短波输出增加。而韧致辐射强度与 z^2 成正比, 故采用高原子序数的阳极材料产生的等离子体可以有较强的发射。

用 NaCl 晶体^[6]测得 BRV 光源的最短波长发射为 $\sim 1 \text{\AA}$, 与用 22kV 电子产生的韧致辐射

短波长限(由(1)式算得 0.56 \AA)几乎相等,表明这种短波长辐射是由于通常的韧致辐射效应所致;而用分光光度计测试^[5]其连续谱吸收光强,得出强度是波长的函数($1/\lambda^2$),从而进一步证实了BRV光源是一种韧致型的发射。

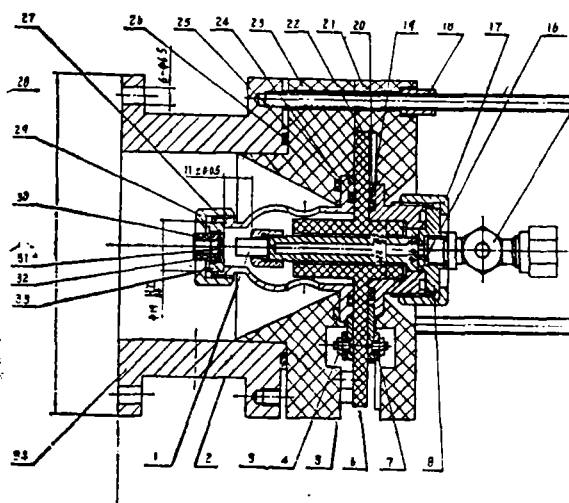


图1 光源结构图

- 1 — 阳极靶 2 — 固紧螺圈 8 — 阳极靶座 15 — 三通水管 16 — 正电极
 17 — 滚花螺母 20, 24, 25 — 密封“O”型圈 27 — 负电极 29 — 阴极保持环
 30 — 陶瓷绝缘管 31 — 云母片 32 — 触发器电极 33 — 阴极盘 34 — 连接法兰

四、结构设计

我们制作的BRV光源主要由阳极靶、触发器—阴极、阳极水冷和放电腔体四部分组成。其结构见图1。采用高原子序数、高熔点^[6]的铀作阳极靶,可得到高强度连续谱。由黄铜激励环和触发输入线构成的触发电极。置于阴极盘上,以云母片和陶瓷管绝缘,经环氧树脂封装后形成触发器—阴极单元。其对称结构可以确保它在使用中得到均匀对称的耗损。阴极盘通常由溅射率低,用易于加工的钨铜合金制成。阴极盘的内孔直径为 $\phi 2.5 \text{ mm}$,可使之通过阳极顶端发射的高纯度连续谱,滤除其边缘区域的线谱辐射。触发电极的内径应略小于 $\phi 2.5 \text{ mm}$,以防来自阳极的超声波和碎片对触发器和单色仪入缝的损害。阳极靶座选用散热、导电性好的黄铜制成,装上铀阳极靶,采用套接方式连入塑料水管,构成空心水冷式阳极,将其从光源的后部插入,用滚花螺母固紧,使之与触发器—阴极一起包容在由负电极导体构成的放电腔体内。此结构便于更换阳极、调整光路。可将放电腔体的内径减小到 $\phi 15 \text{ mm}$,以利于提高放电电流密度,增强感生磁场的放电箍缩^[7]。

为减小放电回路的电感,整个光源呈旋转对称结构,各部件均可拆卸,其接触面间用“O”圈密封,以

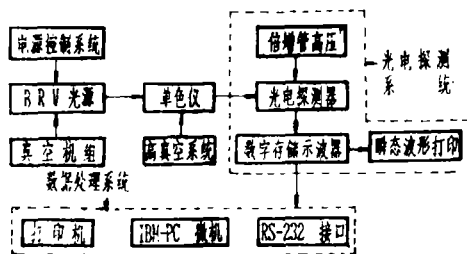


图2 光谱特性测试系统方框图

便长期使用后清洗，更换电极。

五、光谱测试

1. 实验装置

我们采用图 2 所示的测试系统，研究了光源在 50~300nm 波段的光谱特性。其实验装置可分为 BRV 光源、Seya-Namioka 单色仪、光电探测和数据处理系统四部分。

光源的光辐射经单色仪分光进入光电探测系统。首先落到水扬酸钠荧光屏上，转变为可见光，由 EMI9659QB 光电倍增管接收，其输出的光电流馈送到带宽 1G Hz 的存储示波器 (Tektronix11401) 转换为数字信号。数据处理系统由 RS-232 接口、IBM 微机和打印机组合。计算机可通过接口对示波器暂存的测量数据进行采集处理，最终由打印机给出结果，并自动存入软盘。也可控制示波器实时打印其测得的瞬态光脉冲波形。

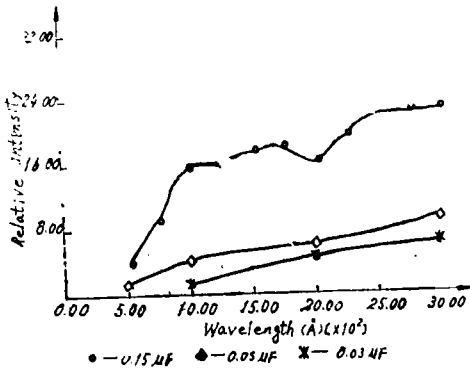


图 3 相对光谱分布特性曲线

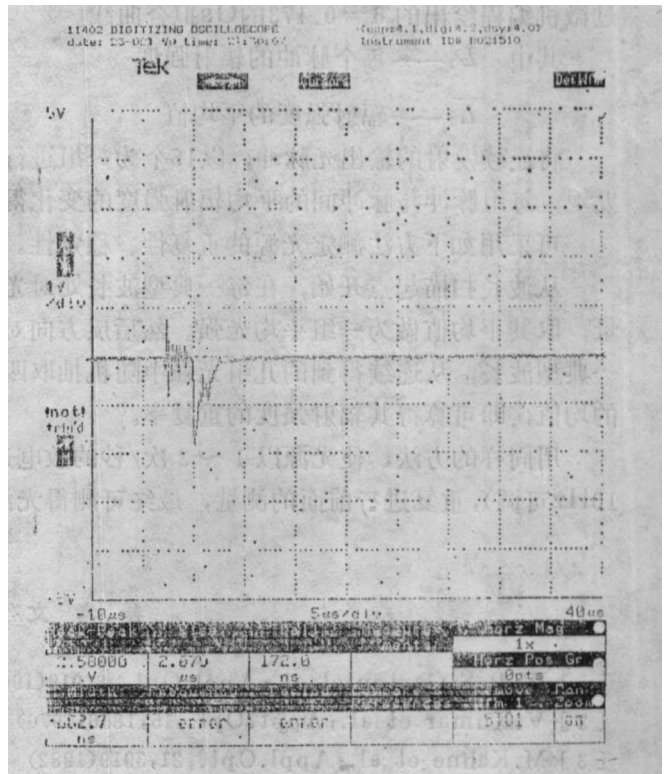


图 4 典型光脉冲瞬态波形 (300nm)

2. 光谱分布特性

使单色仪入缝、出缝均为 50mm，倍增管高压 - 1200V，使用不同的储能电容，给出了典型波长点处的相对辐射强度。图 3 给出使用铝 + MgF₂ 光栅测得的相对光谱分布曲线，可以看出，光源输出强度和短波长限由于电容的不同会发生很大变化，这主要是因为存储电容直接决定了其放电强度和辐射能量。尤其是短波长的能量。而图 3 显示的短波能量的衰减主要是由于光栅效率影响的缘故。

3. 时间结构

在同一实验条件下，用 0.15μF，0.02μH 的低感电容，测量了 VUV 辐射光脉冲的时间分辨光谱。波长 300nm 光脉冲瞬态波形见图 4，在 50~300nm 之间，随着波长的增大，光

脉冲的半宽度 (FWHM) 从136.7ns连续增加到662.7ns。

4. 光源的稳定性、重复性

重复性、稳定性是衡量高强度脉冲等离子体光源的一个重要指标。通常由于辐射输出的脉冲特性和有效发射点的不确定性,脉冲与脉冲间的输出强度变化可达2.3倍。这可以通过外部放电参数的最佳选择而得以改善。如果在阳极顶端加一聚四氟乙烯帽,由于限制了箍缩放电区域及提高了放电密度,不仅增大了光辐射密度,也可使其重复率达±0.99%。

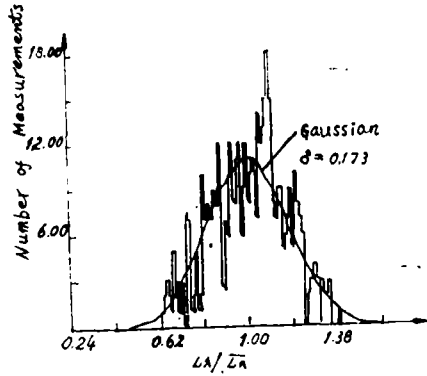


图5 脉冲与脉冲间倍增管信号分布曲线

图5给出了在200~300nm波段测得的477个光脉冲辐射强度与其平均值的偏差的直方图及通过微机编程绘出的 $\sigma = 0.173$ 的Gs拟合曲线。

其中 L_n —— 每个脉冲的辐射强度

\bar{L}_n —— 辐射强度的平均值

将连续发射的输出光脉冲,以15个为一组进行划分,取每组的平均值作平均光强。可以发现,每组脉冲与脉冲间的平均辐射强度的变化得到明显改善。

可采用如下方法测定光源的重复性、稳定性。

从波长扫描起点开始,在每一典型波长处对光源连续15次发射的输出光强进行顺次测量,取其平均值做为一组平均光强。然后反方向对上述波长光强输出进行重复测试。对于每一典型波长,从连续得到的几组光强中随机抽取四组,用取样标准偏差除以这四组平均光强的均值,即可算得其辐射强度的重复率。

用同样的方法,使光源以1~2次/秒的放电速率持续发射2000次(光源重复速率为1~10Hz可调),重复进行前面的测量,最终可测得光源的重复性、稳定性均优于15%。

参 考 文 献

- [1] W.R.S.Garton et al., Appl.Opt., 8,919(1969)
- [2] V.Kumar et al., Appt.Opl., 15,1856(1976)
- [3] M.Kahne et al., Appl.Opt., 21,3919(1982)
- [4] T.B.Lucatorio et al., Appl.Opt., 18,2916(1979)
- [5] J.N.Fox and J.E.G.Wheaton, J.Phys.E., 6,655(1973)
- [6] J.A.R.Samson, Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy, London 1967
- [7] 项志遵、俞昌旋,《高温等离子体诊断技术》,上海科学技术出版社,1982
- [8] Balloffet G.Romand J and Vodar.B; C.R.Acad.Sci.Paris, 252 1961 4139-41
- [9] H.Damany, et al., Appl.Opt., 5,297(1966)

Investigation on Extreme Ultraviolet BRV Discharge Source

Guo Yubin

Abstract

A BRV intense vacuum spark source has been designed. It offers several advantages, high intensity, extended and smooth continuum, a good viability. It is capable of producing a smooth continuum spectrum from the visible down to at least 4nm. Its reproducibility and stability is found to be better than 15%. It is best suited to use in the general laboratories which do not require the specific properties of the synchrotron radiation. It has widespread practical value in the field of research and technology of VUV spectroscopy, soft X ray microscopy and photoetching etc. The paper mainly describes the operation principle, the design thought and the specific structure of the source.

The time—resolved spectra of the BRV plasma source has been studied at different wavelength in a range of 50—300 nm. The temporal response of optical pulse radiation on the order of millimicrosecond has been probed. We determined relative spectral distribution characteristic of the source. It is discussed that the influence of several outer discharge parameter on the spectral characteristic and the discharge stability. By adding a cap made of teflon on top of the anode, the reproducibility and radiance have been improved further.