

小型壁稳氩弧紫外-真空紫外光源的研究

李福田 孙国华 刘元群 陈星旦
(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

已研制成配有四级差分泵单元的2.5kW小型壁稳氩弧光源。其光谱辐射稳定性和重复性优于 $\pm 0.5\%$ ，一致性优于 $\pm 1\%$ 。其连续光谱分布可用Hofsaess理论计算，准确度达10%。等离子体光谱学诊断表明：氩弧电流40A、气压 1.75×10^5 Pa时，等离子体温度为12,650K，电子密度为 $1.29 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 。

一、引 言

壁稳氩弧是一种具有高稳定性和高重复性的真空紫外光源，被广泛用于确定跃迁几率、连续光谱系数、斯塔克加宽参量等光谱学工作及等离子体热学、电学性质的研究中。近年来利用黑体谱线方法^[1]及同步辐射方法建立紫外-真空紫外光谱辐射标准，壁稳氩弧作为其中一种标准^[2]和传递标准的光源^[3,4]，得到进一步的应用与发展。

本文描述我们研制的2.5kW小型壁稳氩弧的结构及其辐射特性，给出氩弧等离子体温度和电子密度的光谱学诊断结果，证实氩弧的连续光谱辐射可以用Hofsaess理论计算，准确度好于10%。

二、光源及测试装置

图1给出壁稳氩弧结构。其中铜制限弧片厚2mm，中心孔直径 3 ± 0.01 mm。限弧片间隔0.2mm，用聚四氟乙烯圈密封。内外密封圈的环形空隙构成冷却水通道。限弧片与水接触的表面喷涂一层厚 $30 \mu\text{m}$ 的聚四氟乙烯膜，以防漏电。氩弧的阴极和阳极用钨钍材料制成，直径分别为5mm和2.5mm，并与电极座绝缘。氩弧和电极总的冷却水流量为4l/min。采用流动方式为氩弧供气，氩气纯度为99.999%，流量4l/min，弧室内压强一般保持在 1.75×10^5 Pa，由压强传感器监测，准确度达 $\pm 0.1\%$ 。氩弧最大工作电流45A，电压55V，由直流稳流电源供电，其电流稳定度好于0.02%/h。

氩弧通过四级差分泵单元连接到真空紫外单色仪，以代替通常所用的窗口，这样就避免了窗口由于受强紫外线辐照而透过率不断下降(真空系统中有油)所带来的麻烦。差分泵单元由四台机械泵排气，各级真空度标注在图1中。

氩弧光源的光谱辐射测试及等离子体诊断装置，由微计算机控制下的一台1.5m分辨率可见-紫外光栅单色仪和一台1m真空紫外凹面光栅单色仪所组成，波长复盖范围为

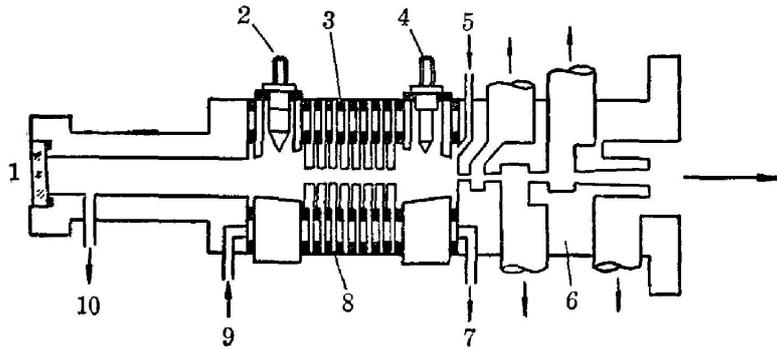


图 1

200~800 nm 和 50~300 nm。两台单色仪分别经石英窗和差分泵从氩弧两端接收辐射, 并通过前置镜(1米单色仪前置镜置于 1×10^{-5} Torr 真空室内)将氩弧成像到入射狭缝。缝宽 0.2 mm, 高 0.2 mm, 通光孔径 $f/60$ 。两单色仪的光电倍增管输出信号经放大后馈送到 7060 系统数字电压表。

Apple II Plus 微型计算机通过 IEEE-488 接口分别与两台单色仪的智能化步进电机驱动器及 7060 系统数字电压表相接。根据预先选定的测试项目, 在自编的 Basic 程序引导下, 以预定方式自动地进行单色仪波长扫描、光电信号采集、数据处理和最后结果的打印、显示及绘图。

三、实验结果

1. 氩弧辐射特性

图 2 是在三个波长给出气压为 1.75×10^5 Pa 时氩弧光谱辐射亮度和电流的关系(曲线在 40 A 处归一)。从图中可以看出, 氩弧光辐射亮度随电流而变化较大, 对不同波长, 其变化量不同。当电流保持不变时, 氩弧光谱辐射亮度和气压成正比, 可以表示为

$$I = ap + b, \quad (1)$$

式中 p 为压强; I 为归一化的光谱辐射亮度; a 、 b 为常数, 几乎与波长无关, 当氩弧工作电

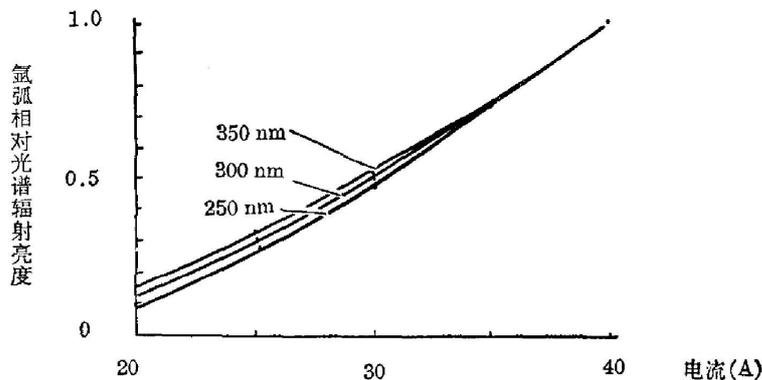


图 2 氩气相对光谱辐射亮度随电流的变化

Fig. 2 Variation of the relative spectral radiance at the mini-arc with arc current

流为 30 A 时, 它们分别为 1.578 和 0.578。

当限弧片尺寸(厚度、间隔及片数)确定后, 氩弧光谱辐射亮度主要由氩气气压和放电电流所决定, 而这两个量比较容易准确控制, 因此可以预期氩弧有较高的光谱辐射稳定性、重复性和一致性。测试表明: 波长 165~350 nm 间每小时光谱辐射稳定性好于 $\pm 0.5\%$, 连续十次启动光谱辐射重复性好于 $\pm 0.5\%$, 名义尺寸相同的氩弧间光谱辐射一致性误差小于 $\pm 1\%$ 。这是其它真空紫外光源所不及的。分析表明: 电极间距、限弧片中心孔偏差以及差分泵单元与限弧片不同轴是引起非一致性的主要原因。

图 3 给出氩弧径向光谱辐射亮度分布曲线。可以看出, 距轴线 ± 0.2 mm 范围内亮度比较均匀, 但超出这一范围, 亮度下降很快, 对于不同波长, 变化有所差异。为解释径向光谱辐射亮度分布随波长的变化, 我们引入稳态能量平衡方程^[5]

$$\sigma E^2 = U - \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(rK \frac{dT}{dr} \right), \quad (2)$$

式中 σ 为电导率, E 为电场强度, U 为辐射流密度, K 为热导率。方程的边界条件:

$$T = T_0 \Big|_{\text{边壁}} \quad \frac{dT}{dr} = 0 \Big|_{\text{轴线}}$$

其中 T_0 为限弧片温度。

该方程的意义是: 氩弧轴向电场输入的电能量等于因辐射及限弧片形成的边壁热传导损失的能量之和。当氩弧处于局部热力学平衡态时, σ 和 K 仅是温度的函数, (2) 式可化简为 Elenbeas-Heller 方程。求解 (2) 式给出限弧片中心孔直径为 3 mm、电流 30 A 时, 氩弧径向温度分布。又由 (5) 式进一步计算出波长 250 nm 和 350 nm 处, 氩弧径向光谱辐射亮度分布(见图 3), 可以看出与实测结果比较一致。

氩弧光谱辐射亮度角分布也与波长有关, 但影响较小。测试表明在配有差分泵的情况下, 氩弧光谱辐射亮度角分布的均匀区在 $\pm 0.5^\circ$ 之内。

2. 等离子体温度和电子密度的光谱学诊断

我们用了三种方法做氩弧等离子体温度和电子密度的光谱学诊断:

- a. Richter 方法^[6];
- b. 氩原子线和离子线强度比值法;
- c. 氩原子线和离子线绝对强度法。

因 Richter 方法既不要测出谱线或连续光谱强度的绝对值, 也不需要知道跃迁几率及氩弧的实际弧长, 所以准确度较高。

根据等离子体理论, 对局部热力学平衡条件下的等离子体我们有 Saha 方程、Dolton 定

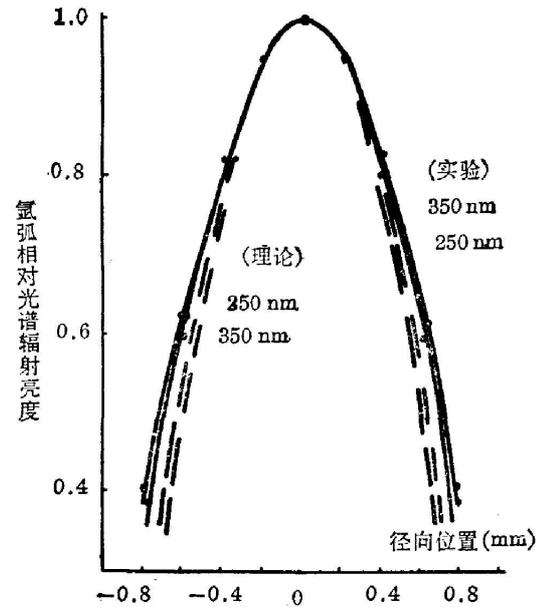


图 3 氩弧径向光谱辐射亮度分布
(电流 30 A, 气压 1.75×10^5 Pa)

Fig. 3 Relative radial distribution of the spectral radiance of the mini-arc at 30 A and 1.75×10^5 Pa

律和宏观电中性条件

$$\begin{cases} n_+ = n_e, \\ \frac{n_+ n_e}{n_0} = S(T) = 2 \frac{U_+}{U_0} \frac{(2\pi m k T)^{3/2}}{h^3} \exp(-x/kT), \\ n_0 + n_+ + n_e = n = p/kT, \end{cases} \quad (3)$$

其中 n_0, n_+, n_e 分别为中性原子、离子和电子的密度, U_+ 和 U_0 为离子和原子的配分函数, x 为电离能, p 为压强。

这组方程描述了温度和电子密度及中性原子密度的关系。引入德拜修正及高密度下电离势降低修正后,用迭代法求解(3)式,在 10000~20000 K 间分隔 10 K 给出压强 1.75×10^5 Pa 时的电子密度及中性原子密度。设起始电子密度值为 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 迭代精度 0.01%, 通常只需五次迭代就可得到满意的结果。

由光谱学理论,原子线、离子线及连续光谱辐射亮度可写为

$$\begin{cases} I_0(\lambda, T) = \frac{h c g_{0k} n_0}{4\pi \lambda_0} \frac{A_{0k}}{U_0} \exp(-E_{0k}/kT), \\ I_+(\lambda, T) = \frac{h c g_{+k} n_e}{4\pi \lambda_+} \frac{A_{+k}}{U_+} \exp(-E_{+k}/kT), \\ I_c(\lambda, T) = (c_0 n_e^2 / \lambda^2 \sqrt{T}) l \xi(\lambda, T), \end{cases} \quad (4)$$

式中 A_{0k}, A_{+k} 为自发跃迁几率, g_{0k}, g_{+k} 为统计权重, U_0 和 U_+ 为配分函数, l 为平均弧长。 $\xi(\lambda, T)$ 是波长和温度的函数,见(5)式。

将(3)式求得的电子密度及中性原子密度代入(4)式,我们进一步得到压强 1.75×10^5 Pa 时 10000~20000 K 间 ArI 430.0 nm、ArI 714.7 nm 原子谱线和 ArII 480.6 nm 离子谱线及 431.4 nm 和 482.7 nm 处连续光谱辐射亮度的理论计算值。为适应 Richter 方法,分别以 ArI 原子谱线和连续谱的光谱辐射亮度的对数作为纵坐标,以 ArII 离子谱线的光谱辐射亮度的对数为横坐标绘制成四条对数-对数曲线,均以温度为参量。图 4 给出了理论对数-对数曲线的一个例子。

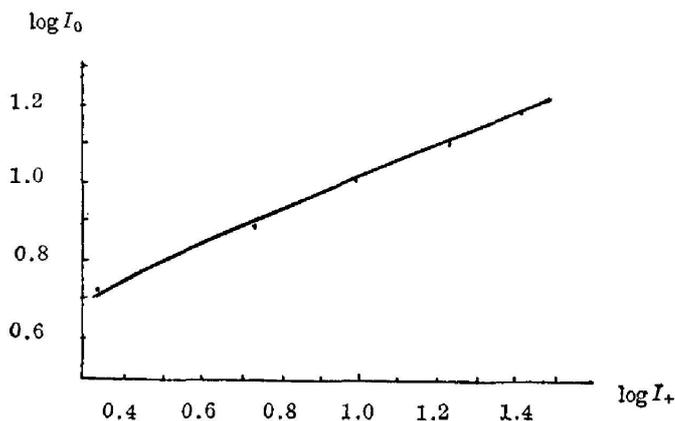


图 4 ArI 430.0 谱线和 ArII 480.6 谱线的对数-对数曲线

Fig. 4 Log-log curve for Ar 430.0 and Ar 480.0 nm

为求得氩弧的等离子体温度,分别取电流值 24 A、28 A、32 A、36 A 和 40 A,在 1.5 米单色仪上,测出 429.1~431.8 nm 间 ArI 430.0 nm 线,714.1~715.4 nm 间 ArI 714.7 nm 线和 479.7~481.5 nm 间 ArII 480.6 nm 线的相对积分光谱辐射亮度及 431.4 nm 和 482.7 nm 处相对连续光谱辐射亮度,在微计算机控制下自动完成求积,采样间隔 0.01 nm。由于线翼损失和线翼重迭,在有限波长间隔内求积的谱线的光谱辐射亮度会有误差,为此采用计算机谱线重构法对测量结果进行修正,以得到真实的积分光谱辐射亮度。而后以电流为参量构成与理

论对数-对数曲线相应的四条实验对数-对数曲线。用作图法和计算机最佳拟合法求出实验同理论对数-对数曲线的最佳拟合解, 得出氩弧在不同工作电流时的温度, 再由(3)式得出相应的电子密度, 结果列于表1。误差分析(从略)表明: 用 Richter 方法得到的温度准确度达 ± 100 K。

表1 按 Richter 方法得到的 1.75×10^5 Pa 时氩弧等离子体温度和电子密度

Table 1 Plasma temperature and electron density of the mini-arc under pressure 1.75×10^5 Pa based on Richter method

电流 (A)	ArI 430.0~ArII 480.6 $T(K)$	ArI 714.7~ArII 480.6 $T(K)$	Cont431.4~ArII 480.6 $T(K)$	Cont482.7~ArII 480.6 $T(K)$	平均值 $T(K)$	N_e (cm^{-3})
24	11360	11370	11550	11640	11480	6.52×10^{16}
28	11750	11730	11950	12030	11870	8.38×10^{16}
32	12020	12000	12240	12350	12150	9.90×10^{16}
36	12280	12270	12500	12600	12410	1.14×10^{17}
40	12500	12500	12730	12860	12650	1.29×10^{17}

表2 按谱线绝对强度诊断方法得到的 1.75×10^5 Pa 时氩弧等离子体的温度和电子密度

Table 2 Plasma temperature and electron density of the mini-arc under pressure 1.75×10^5 Pa based on absolute technique

电 流 (A)	ArI/ArII $T(K)$	ArI430.0 $T(K)$	ArII480.6 $T(K)$	平 均 值 $T(K)$
28	12025	11780	11830	11880
32	12310	12060	12145	12170
36	12595	12320	12380	12430

表2 列出氩原子谱线和离子谱线强度比值法及氩原子谱线和离子谱线绝对强度法的诊断结果。为得出谱线的绝对积分光谱辐射亮度值, 使用了国家计量院标定的石英窗口钨带灯, 在 430.0 nm、480.6 nm 和 714.7 nm 处为 1.5 米单色仪定标, 以给出单色仪系统的绝对光谱灵敏度。氩弧和钨带灯的光谱辐射亮度相差三个数量级, 这给标定带来一定困难。

3. 165~350 nm 间氩弧光谱辐射特性

165~350 nm 间除少数 ArII 线与杂质谱线外氩弧光谱辐射是连续的。表3 列出了 165~350 nm 间出现的 ArII 线及杂质线的波长。E. Schulz-Gulde^[7] 给出仅考虑氩原子自由-束缚, 自由-自由跃迁时(氩离子的贡献较小, 可以忽略), 光性薄的氩等离子体连续光谱

表3 在 165~350 nm 间氩离子线和杂质线的波长及分类

Table 3 Wavelength and identification of impurity and argon ion lines of the mini-arc appearing in the spectral region 165~350 nm

波长(nm)	165.72	174.27	174.53	175.19	187.31	188.90	193.09
分 类	CI	NI	NI	CI	ArII	ArII	CI

辐射亮度

$$I_c(\lambda, T) = (c_0 n_e^2 / \lambda^2 \sqrt{T}) l \xi(\lambda, T), \quad (5)$$

其中 $\xi(\lambda, T) = [1 - \exp(-c_2/\lambda T)] (g_+/U_+) \xi_{fb}(\lambda, T) + G \exp(-c_2/\lambda T)$,

$$c_0 = (2\pi/3km^3)^{1/2} (e^6/24c^2\pi^3\varepsilon_0^3),$$

g_+ 为离子的基态统计权重,

U_+ 为离子的配分函数,

G 为自由-自由跃迁 Gaunt 系数,

$\xi_{fb}(\lambda, T)$ 为自由-束缚系数。

用 Hofsaess^[8] 给出的 $\xi(\lambda, T)$ 值和以上得到的氩弧等离子体温度和电子密度, 由(5)式求出

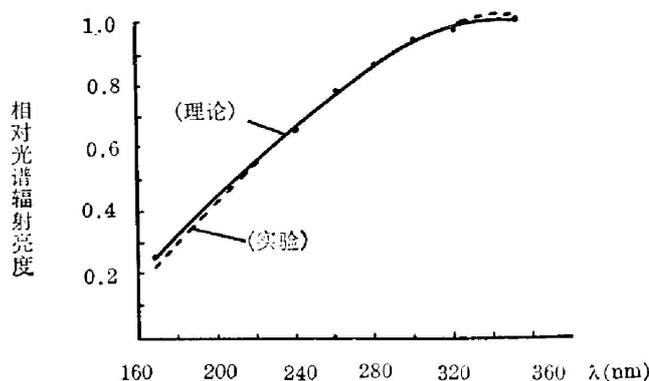


图5 氩弧电流 40 A, 气压 1.75×10^5 Pa 时相对光谱辐射亮度

Fig. 5 Relative spectral radiance of mini-arc at 40 A and 1.75×10^5 Pa

电流 40 A 时 165~350 nm 间氩弧连续光谱辐射亮度, 表示在图 5。

为验证理论的准确性及等离子体诊断结果的可靠性, 我们用一只氟化镁窗口氘灯作标准, 分别在 1.5 米可见-近紫外单色仪及 1 米真空紫外单色仪上标定氩弧光谱分布, 结果在图 5 中给出。标定中避开了那些靠近杂质谱线, 光谱辐射的不稳定区。氟化镁窗口的氘灯用英国国家物理实验室(NPL)以同步辐射为标准的、紫外-真空紫外标准灯标

定过, 准确度达 $\pm 2.5\%$ 。由图 5 看出氩弧 165~350 nm 间连续光谱分布和理论计算差别在 10% 以内, 为便于比较, 两条曲线分别在 350 nm 处归一。Preston 曾报道过类似的结果^[4], 但使用的方法有所不同, 他未直接对小氩弧作温度和电子密度诊断。

四、结 束 语

2.5 kW 小型壁稳氩弧光源的光谱辐射稳定性及重复性优于 $\pm 0.5\%$, 一致性优于 1%, 是理想的真空紫外光源。Richter 方法、谱线强度比值法和谱线绝对强度法的光谱学诊断结果, 在误差范围内彼此一致。氩弧工作电流 40 A、气压 1.75×10^5 Pa 时, 等离子体温度为 12,650 K, 电子密度为 $1.29 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。165~350 nm 间氩弧光谱辐射亮度和理论计算结果符合到 10% 以内, 进一步证实了 Preston 的实验结果。

参 考 文 献

- [1] G. Boldt; *Space Sci. Rev.*, 1970, **11**, No. 5 (Dec), 728.
- [2] R. C. Preston; *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1977, **18**, No. 3 (Sep), 337.
- [3] J. M. Bridges, W. R. Ott; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 2 (Feb), 367.
- [4] R. C. Preston *et al.*; *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1980, **13**, No. 11 (Nov), 1206.
- [5] U. H. Bauder, H. H. Maecker; *Proceedings of the IEEE*, 1971, **59**, No. 4 (Apr), 588.

- [6] J. Richter; *Z. Astrophys.*, 1965, 61, 57.
[7] E. Schulz-Gulde; *Z. Phys.*, 1970, 230, 449.
[8] D. Hofsaess; *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1978, **19**, No. 3 (Mar), 339.

Studies of miniaturized wall-stabilized argon arc as a UV and VUV radiation source

LI FUTIAN SUN GUOHUA LIU YUANQUN AND CHEN XINGDAN
(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 6 February 1984; revised 14 June 1984)

Abstract

A miniaturized argon arc running at maximum current 45 A and pressure 1.75×10^5 Pa with a differential pumping interface unit has been developed. The measurement in UV and VUV range indicated that the stability, both short term and long term, and reproducibility of the spectral radiance of the mini-arc were better than $\pm 0.5\%$ and the similarity among mini-arcs was better than $\pm 1\%$. The theoretical calculation of the spectral radiance of the mini-arc based on Hofsaess theory agrees with the measurement results within 10%.

Richter method was used to carry on the plasma diagnostics of the mini-arc. The results show that the argon plasma temperature is 12650 K and the electron density is $1.29 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ when the current of the mini-arc is kept at 40 A and the pressure at 1.75×10^5 Pa.