

谱线位移法测定等离子体射流的温度

王 鸿 章

(中国科学院等离子体物理研究所)

提 要

我们测定了大气压氩等离子体射流中氩原子谱线的增宽和位移,并与 Griem^[1~3]的理论值以及其他作者的实验值进行了比较,其结果与 Griem 理论值较好地符合。同时,用谱线位移法测定了等离子体射流的温度,测出的温度值与用其他光谱法测出的值很好地符合。我们的实验结果表明,谱线位移法可用于测定等离子体射流的温度,测温平均误差为 10%。

一、引 言

温度是等离子体射流的一个重要参数。采用光谱方法测定等离子体射流温度较为成熟。它们有各种测量的方法及其对应的原理^[2,4,5]:如用谱线的多普勒增宽来测定离子的温度;由连续光谱或离子谱线的发射系数测定电子或离子的密度;由原子或离子谱线的相对强度测定电子的温度;用氢谱线的斯塔克增宽测定电子密度等等。如果等离子体射流存在局部热力学平衡(L. T. E.),电子密度是温度的函数,则可以用测量电子密度的方法来确定温度。

自从 Griem 把谱线斯塔克增宽的理论计算扩展到某些重元素的谱线^[1],使有可能利用谱线的位移来测定等离子体的电子密度和温度。Griem 对氩原子谱线所计算的位移,已由许多作者^[6~9]用实验加以证明,实验值与理论值很好地符合。谱线位移法作为光谱诊断方法之一,在原理上已被很好地建立,但在实际诊断上的可靠性和精确性还需要实验验证。

首先,我们在大气压氩等离子体中测出某些氩谱线的增宽和位移,并与 Griem^[1~3]理论值以及其他作者^[6~10]的实验值进行了比较。其次,我们采用 Griem 理论数据计算了三条 A, I 谱线位移与等离子体温度的关系曲线,把它作为温标,进行测温。为了验证此方法的可靠性,我们同时采用氩原子和离子谱线以及连续光谱的发射系数,测定了等离子体射流的温度。

二、实 验 装 置

1. 电弧发生器和运转条件

电弧等离子体射流发生器的结构如图 1 所示。阴极为 $\phi 5$ mm 钨-钽棒(含 1% 钽),阳极是可更换的水冷铜喷嘴,喷口 $\phi 4$ mm。用两台 AGA-300 型直流焊机串联供电,空载电压 150V,工作电流 100~165A。电极间电压降为 19~30V。氩气作为工作气体,其纯

度为 99.9% 以上。气体流量为 1600~2000 l/hr。电弧用高频火花发生器引燃。

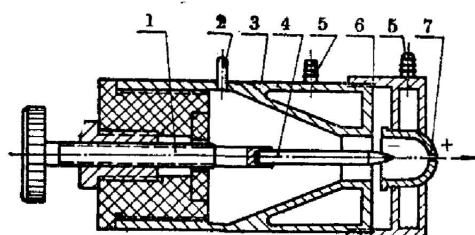


图 1 等离子体射流发生器结构

1—阴极转动杆；2—进气管；3—枪体；4—钨阴极；5—进出水管；6—前水冷套；7—螺旋式喷嘴；箭头表示等离子体射流

Fig. 1 Construction of plasma jet generator.

1—The screw rod of cathode; 2—gas inlet pipe; 3—plasma gun body; 4—tungsten cathode; 5—cooling water pipe of inlet and outlet; 6—front jacket cooled by water; 7—nozzle with screw; the arrowhead represents plasma jet

要得到稳定的等离子体射流，关键在于阴极对阳极的同轴度。我们将发生器连续运转半小时或更长的时间，在摄谱板上测出光强度变化平均不大于 $\pm 4\%$ 。影响射流重复性的主要原因是喷嘴容易被电弧烧蚀，改变气体流量和流形，从而改变了电极间的电压降和电流，可明显地影响到射流的温度场。为此，我们设计可替换的螺旋式喷嘴（见图 1 中 7）。

2. 光学系统

我们用 KCA-1 型光谱仪摄谱，它具有较大的色散。等离子体射流发生器安装在光谱仪的光具座导轨上，可以在三个方向上调节。用焦距 $f=150\text{mm}$ 消色差透镜，将等离子体射流或标准光源放大三倍成像于狭缝上，这样可以对距喷口不同距离的等离子体截面进行摄谱。

在可见光谱区用 Agfa 微粒感光板；对 ArI 8521 Å 和 ArI 6965 Å，用 Agfa 红外感光板。用 MΦ-2 型测微光度计测量光密度，用喷涂铂的阶梯减光板测定乳剂特性曲线。

3. 波长和强度的标准光源

氩谱线波长标准采用低压氩放电管，它是一种长为 80 mm、直径为 10 mm 玻璃管，内充纯氩气，压力为 10^{-1} torr。此管由高频激发，它所发射的氩原子谱线的位移和增宽可以忽略。

我们用钨带灯和标准碳弧两种标准光源来标定光谱强度。钨带灯是用日本芝浦 LG-60 充气型标准灯，经计量科学研究院重新标定，其结果符合于原来说明书上的数据。由钨的光谱发射率可以计算出光谱能量分布。

标准碳弧电极是用上海生产的灯塔牌光谱纯碳棒，正电极直径为 6 mm，沿水平方向移动。负电极直径为 4 mm，与正电极成 120° 角，工作电流为 10~12.5 A。计量科学研究院和北京物理所对标准碳弧的阳极坎进行了标定。根据 1968 年国际温标，我们测出阳极坎的亮度温度为 $3813.7 \pm 7\text{K}$ （其中误差为偶然误差，未包括系统误差）。阳极坎的光谱能量分布如图 2 所示。我们所获得的测量数值居于 Euler^[11] 和 Magdeburg^[12] 测量值之间。

4. Abel 变换

由实验测得的谱线和连续光谱的强度，通过 Abel 变换，计算出对应的发射系数。变换

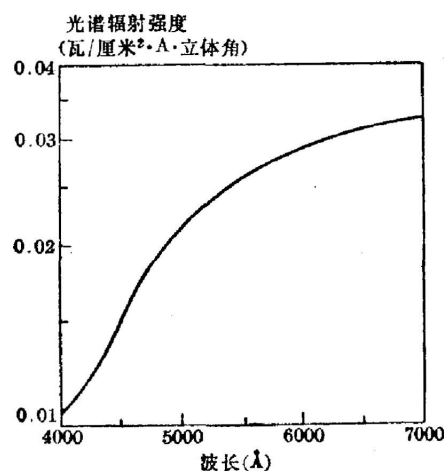


图 2 碳弧阳极坎光谱强度 L_λ 随波长 λ 分布
Fig. 2 Spectral intensity distribution of carbon arc anode. Spectral intensity L_λ ($\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{\AA} \cdot \text{Sterad}$) ~ wavelength λ (\AA)

系数采用 Bockasten^[13] 的数据。实验中用透镜把等离子体射流放大三倍成像在狭缝上。关于透镜张角对 Abel 变换的影响,我们采用光束中亮度相等原理,证明其影响是不大的。除了靠近边界处,其影响一般都小于 1%。

三、测量原理

1. 等离子体各粒子密度

在大气压电弧等离子体 ($KT \leq 5 \text{ eV}$) 中,电子与原子、离子之间碰撞占支配的情况下,我们可以假设存在局部热力学平衡。电子、原子和离子的密度可以简单地用热力学平衡方程来计算。在光性薄的等离子体 (optically thin plasma) 中,由于光电离和光复合之间不平衡,对电离平衡有一定影响。为此,我们曾经用电子碰撞电离截面和光复合几率系数,计算了电离和消电离过程,并用细致平衡原理,证明了大气压等离子体在 6000~30000 K 温度区域,其电离状态可以用 Saha 公式

$$\frac{n_e n_1}{n_0} = \frac{2U_1}{U_0} \frac{(2\pi m_e KT)^{3/2}}{h^3} e^{-\frac{E_1 - \Delta E_1}{KT}} \quad (1)$$

来描述(误差 $< 0.1\%$)。式中 n_e 、 n_0 和 n_1 各为电子、原子和单电荷离子的密度; U_0 和 U_1 各为氩原子和离子的状态和; E_1 为氩原子的电离能; h 为普朗克常数; m_e 为电子质量; ΔE_1 是氩原子在等离子体中受到微观电场的作用而引起的电离能降低。根据 Griem^[2] 推导得到

$$\Delta E_1 = \frac{e^2}{\rho_D} = 2.9 \times 10^{-8} \sqrt{\frac{n_e}{T}} \text{ (eV)}, \quad (2)$$

式中 e 是电子电荷; ρ_D 是德拜屏蔽半径。

根据道尔顿定律和理想气体定律则有,总压力

$$p = (n_e + n_1 + n_0) KT = 1 \text{ atm} \quad (3)$$

和宏观电中性

$$n_e = n_1. \quad (4)$$

在我们的实验条件下,可忽略二次电离离子密度。

利用(1)、(2)、(3)和(4)式,计算出大气压下氩等离子体的电子、原子和离子的密度,它们可作为温度的函数。

2. 测定温度的方法

我们采用氩原子和离子的谱线以及连续光谱的绝对强度来测定等离子体射流的温度。等离子体中原子或离子谱线的发射系数为^[14]

$$I_\lambda = \frac{1}{4\pi} A_n^m g_m h\nu \frac{n_i}{U_i} e^{-\frac{E_m}{KT}}, \quad (5)$$

式中 n_i 和 U_i 是原子 ($i=0$) 或离子 ($i=1$) 的密度和状态之和; E_m 为谱线激发能; g_m 为上能级的统计权重; A_n^m 是谱线的跃迁几率。我们用以测温的 ArI 和 ArII 谱线的 A_n^m 值是引用 Olsen^[15] 数据。

等离子体中电子与离子相互作用产生连续光谱,当频率 $\nu \leq \nu_0$ 极限频率时,它的发射系数为

$$\varepsilon_\nu = \varepsilon_\nu^{ff} + \varepsilon_\nu^{fb} = 6.36 \times 10^{-47} \frac{n_e n_1}{\sqrt{kT}} \xi(\nu, T), \quad (6)$$

其中 ε_ν^{ff} 和 ε_ν^{fb} 各为自由-自由态和自由-束缚态跃迁的发射系数。Биберман等^[16], Schlüter^[17] 和 Hofsaess^[18] 在理论上计算出氩的连续光谱因子 $\xi(\nu, T)$ 。 $\xi(\nu, T)$ 的理论值与实验测量值^[19~21] 较好地符合。为了减少光学电离势降低的影响以及 Gaunt 因子的影响, 我们选择波长 $\lambda = 4140 \text{ \AA}$ 和 $\lambda = 5535 \text{ \AA}$ 。在我们实验的温度范围, 电子与原子相互作用的负连续光谱可以忽略。

我们用(5)和(6)式计算出各谱线和连续光谱的发射系数 I_λ 和 ε_λ 随温度 T 变化的曲线, 由实验测出 I_λ 和 ε_ν , 从而可以求出对应的温度。

3. 谱线的增宽和位移

在等离子体中处在激发态的原子受到电子和离子的作用, 使发射谱线产生斯塔克增宽和位移。Griem^[2] 用量子力学碰撞的近似计算了重元素的电子碰撞增宽 w ($\frac{1}{2}$ 半宽度) 和位移, 用准静态的近似计算了由离子引起的增宽和位移。他计算的重元素孤立谱线总宽度 $w_{\text{总}}$ 和总位移 $d_{\text{总}}$ 为

$$w_{\text{总}} \approx [1 + 1.75\alpha(1 - 0.75R)]w, \quad (7)$$

$$d_{\text{总}} \approx \left[\frac{d}{w} \pm 2.00\alpha(1 - 0.75R) \right] w. \quad (8)$$

其中 R 是德拜屏蔽参数; α 是离子增宽参数。只要满足 $\alpha < 0.5$ 、 $R < 0.8$, 则(7)和(8)式是足够准确的。Griem^[2~3] 已经计算出氩原子某些谱线的 w 、 d/w 和 α 的数值。

四、实验结果

我们用 ArI 6965 \AA 和 ArII 4806 \AA 、ArII 4879 \AA , 以及连续光谱 5535 \AA 等发射系数进行测温。对电流 = 120 安培, 氩气流量 = 2000 升/小时, 距喷口 1 毫米的等离子体射流截面上, 测出温度分布画在图 3 上。测温平均误差为 $\pm 3 \sim 5\%$ 。

测定 ArI 6965 \AA 谱线增宽轮廓是用 5 微米狭缝, 它对应的光谱宽度只有 0.16 \AA 。对于宽度达到几埃的谱线, 其光谱积分重迭的影响并不大。在温度 $T = 15000 \text{ K}$ 、电子密度 $n_e = 1.82 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 下, 我们将测出的 ArI 6965 \AA 谱线增宽轮廓画在图 4 上。半宽度为 0.89 \AA , 在实验误差范围内符合于 Griem 理论值 0.95 \AA 。

我们用 Ar 谱线波长标准, 测出 ArI 4300 \AA 、4158 \AA 和 4259 \AA 三条谱线在某些温度下的位移 $d_{\text{总}}$, 实验结果各画在图 5、图 6 和图 7 上。为了进行比较, 在图上同时绘上 Griem 的理论值^[2~3], 以及不同作者的实验值^[6~10]。在图 5 上的虚线代表 Popenoe 等^[6] 实验值, 我们是取其实验测量点的平均数值。在图 5、6 和 7 上 Δ 代表 Minnhagen^[8] 的实验值, 我们是引用 Griem^[2] 把它们校正过的数值。从图可看出, 除 Chapelle^[10] 实验值外, Popenoe^[6]、Bauder^[7]、Minnhagen^[8] 和 Queffelec^[9] 以及我们的实验值都很好符合 Griem 理论值。因此, 可以认为氩原子谱线位移 $d_{\text{总}}$ 在 16000 K 以下区域是温度比较灵敏的函数, 但在 9500 K 以下 $d_{\text{总}}$ 很小 ($< 0.1 \text{ \AA}$), 在测量上有困难, 所以谱线位移法只适合测量 9500 ~ 16000 K 温度范围, 它与连续光谱方法测温范围差不多。

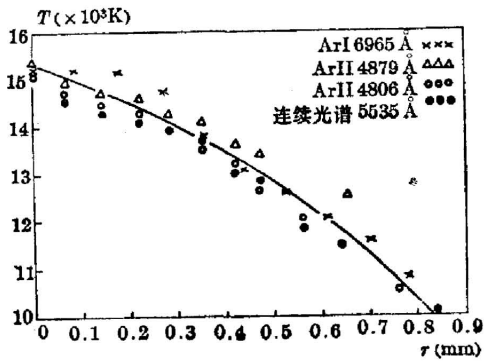


图 3 距喷嘴 1 毫米处等离子体射流截面的温度 T 径向分布。电流 = 120 安培

Fig. 3 Radial temperature distribution of the cross-section in plasma jet at 1 mm distance from nozzle. Electric current = 120 Amp. Temperature $T(\times 10^3\text{K}) \sim$ Radius $r(\text{mm})$

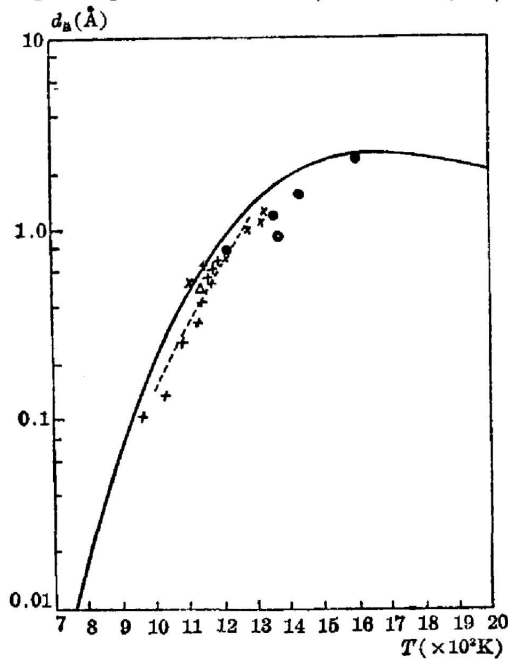


图 5 ArI 4300 Å 谱线位移 d_B 和温度 T 关系

理论值: —Griem^[1-3]。实验值: 1. Popenoe 等^[6]测量平均值; 2. $\times \times \times$ Bauder 等^[7]; 3. Δ Minnhagen^[8]; 4. $+++$ Queffelec 等^[9]; 5. \circ Chapelle 等^[10]; 6. 本文。

Fig. 5 Dependence of the shift d_{total} of neutral argon line $\lambda = 4300 \text{ \AA}$ on temperature T

Theoretical value: —the solid curve calculated according to Griem's theory^[1-3]. Experimental values: 1. the dashed curve averaged according to Popenoe's measuring points^[6]; 2. $\times \times \times$ Bauder et al^[7]; 3. Δ Minnhagen^[8]; 4. $+++$ Queffelec et al^[9]; 5. \circ Chapelle et al^[10]; 6. present investigation

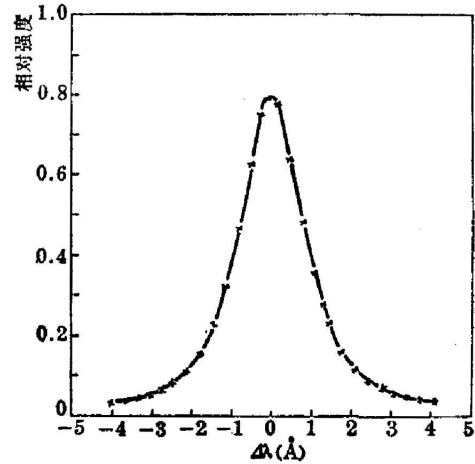


图 4 ArI 6965 谱线轮廓 (温度 $T = 15000\text{K}$, 电子密度 $n_e = 1.82 \times 10^{17}$ 厘米⁻³)

Fig. 4 The profile of line ArI $\lambda = 6965 \text{ \AA}$. (Temperature $T = 15000\text{K}$, electron density $n_e = 1.82 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$) Relative intensity $I_0 \sim \Delta\lambda(\text{ \AA})$. Wavelength distance from line center

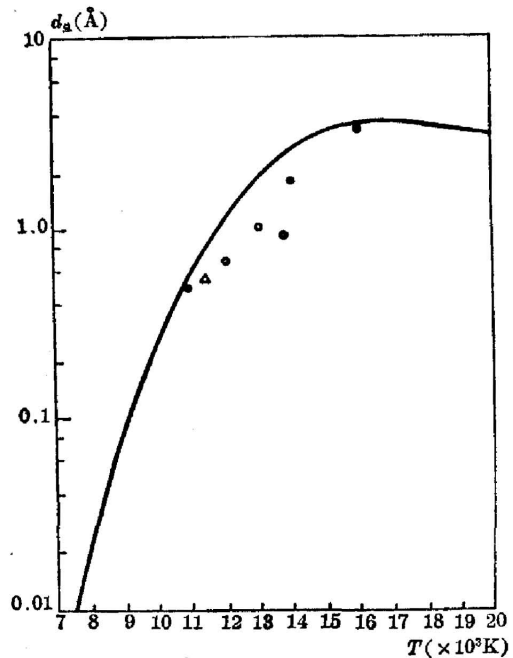


图 6 ArI 4259 Å 谱线位移 d_B 和温度 T 关系

理论值: —Griem^[1-3]。实验值: 1. Δ Minnhagen^[2]; 2. \circ Chapelle 等^[10]; 3. 本文

Fig. 6 Dependence of the shift d_{total} of neutral argon line $\lambda = 4259 \text{ \AA}$ on temperature T

1. —Griem's theoretical value^[1-3]; 2. Δ Minnhagen^[2]; 3. \circ Chapelle et al^[10]; 4. present investigation

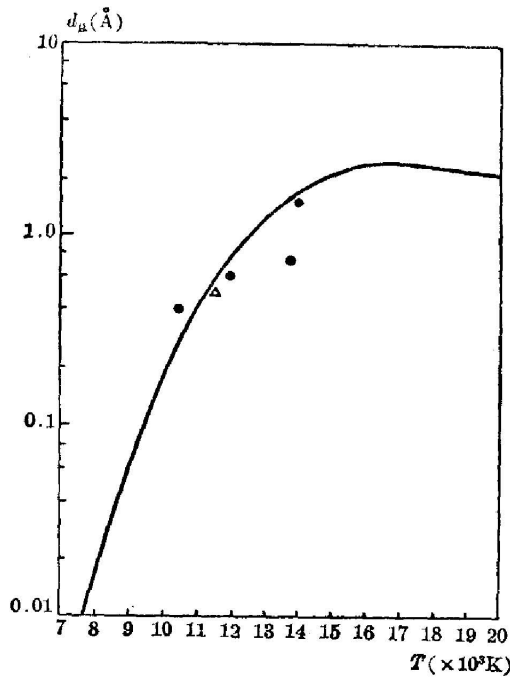


图7 ArI4158Å 谱线位移 d_{λ} 和温度 T 关系
理论值:—Griem^[1-3]。实验值: 1. Δ Minnhagen^[8];
2. \circ Chapelle 等^[10]; 3. \times 本文

Fig. 7 Dependence of the shift d_{total} of neutral argon line $\lambda = 4158\text{\AA}$ on temperature T
1. —Griem's theoretical value^[1-3]; 2. Δ Minnhagen^[8];
3. \circ Chapelle et al^[10]; 4. \times present investigation

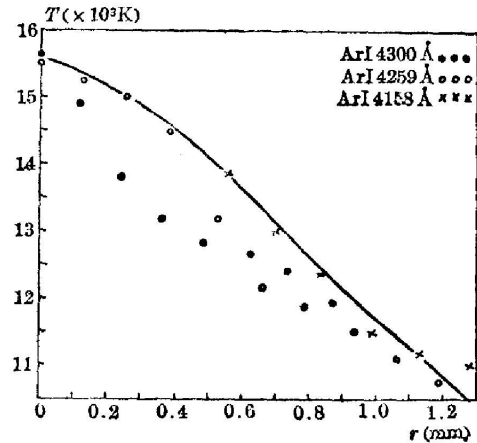


图8 等离子体射流径向温度分布

实线——系用 ArII 4806Å、ArI 8521Å 和连续光谱 (4140Å) 等发射系数测出温度值。各点 \bullet \circ \times 系用 ArI 谱线位移测出的温度值。

Fig. 8 Radial temperature distribution in plasma jet.

Temperature $T(\times 10^3\text{K}) \sim$ Radius $r(\text{mm})$. The solid curves are temperature values measured by emission coefficients of lines (ArII 4806Å and ArI 8521Å) and of continuum (4140Å). The points \bullet \circ \times are temperature values measured by the shift of neutral argon lines

我们用谱线位移法, 测出电流 165A 和氩流量 1600 l/hr 的等离子体射流截面的温度, 测量结果示在图 8 上。我们同时采用 ArII 4806Å 和 ArI 8521Å 以及 4140Å 连续光谱的发射系数, 测出射流温度分布也绘在图 8 上进行比较, 它由实线表示。从图 8 可以看出用谱线位移法测出的温度值与用其他光谱方法测出的温度值很好地符合, 它的测温平均误差为 10%。

氩谱线位移法测温不仅能用于纯氩等离子体射流, 对其他气体如氮、氢等, 只要掺入一定量氩气, 也可以用此方法测温。它和 H_{β} 谱线测温有些类似。 H_{β} 不仅能用于纯氢气体, 而对其他气体, 只要掺入 1~5% 氢就可以利用 H_{β} 谱线测温。用氩谱线位移法, 则需要掺入稍为高一些的氩气压。

参加上述实验和计算工作的还有: 隋全武、夏忠新、赵景悠、徐和生以及赵学礼、秦希珍同志。在此谨表谢意。

参 考 文 献

[1] H. R. Griem. Phys. Rev., 1962, 128, No. 2 (Oct), 515.
[2] H. R. Griem., «Plasma Spectroscopy» (McGraw-Hill, New York, 1964).
[3] H. R. Griem., «Spectral Line Broadening by Plasmas» (Academic Press, New York, 1974).

- [4] R. H. Huddleston, S. L. Leonard; *«Plasma Diagnostic Techniques»* (Academic Press, New York, 1965).
- [5] W. Lochte-Holtgreven; *«Plasma Diagnostics»* (Amsterdam, North-Holland, 1968).
- [6] C. H. Popenoe, J. B. Schumaker Jr.; *J. Res. NBS (A)*, 1965, **69**, No. 6 (Nov-Dec), 495.
- [7] U. H. Bauder, D. L. Bartelheimer; *IEEE. Trans. Plasma Sci.*, 1973, **PS-1**, No. 4 (Dec), 23.
- [8] L. Minnhagen; *Arkiv. Fysik*, 1949, **1**, 425.
- [9] J. L. Queffelec, M. Girault; *Revue Phys. Appl.*, 1971, **6**, No. 3 (Sep), 401.
J. L. Queffelec, M. Girault; *C.R. Acad. Sci. (Paris)* 1970, **270B**, No. 7 (16 Feb), 471.
- [10] J. Chapelle, A. Sy *et al.*; *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer*, 1968, **8**, No. 5 (May), 1201.
- [11] J. Euler; *Ann. Physik*, 1953, **11**, No. 4~7, 203.
- [12] H. Magdeburg; *Z. Naturforsch.*, 1965, **20a**, No. 7 (Jul), 980.
- [13] K. Bockasten; *J. O. S. A.*, 1961, **51**, No. 9 (Sep), 943.
- [14] W. Finkelnburg, H. Maecker; *«Handbuch der Physik»* **22**, (Springer-Verlag, Berlin, 1956), 254~440.
- [15] H. N. Olsen; *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer*, 1963, **3**, No. 1 (Jan-Mar), 59.
- [16] Л. М. Биберман, Г. Э. Норман; *УФН*, 1967, **91**, № 2 (Фев) 193.
- [17] D. Schlüter; *Z. Physik*, 1968, **210**, No. 1 (5 Feb), 80.
- [18] D. Hofsaess; *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer*, 1978, **19**, No. 3 (Mar), 339.
- [19] H. Meiners, C. O. Weiss; *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer*, 1976, **16**, No. 3 (Mar), 273.
- [20] R. C. Preston; *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer*, 1977, **18**, No. 3 (Sep), 337.
- [21] K. Erhardt, I. Meyer *et al.*; *Z. Naturforsch.*, 1977, **32a**, No. 1 (Jan), 21.

Temperature measurement of plasma jet by spectroscopic line shift

WANG HONGZHANG

(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei)

(Received 2 January 1981)

Abstract

The broadening and shift of the spectral lines of neutral argon in plasma jet at 1 atmospheric pressure are measured. The experimental results are compared with earlier experimental values obtained by other workers, and found good agreement with theoretical values calculated by Griem^[1~3]. The temperature of plasma jet are measured by line shift method. The plasma temperature measured by this method are found to be in good agreement within experimental accuracy with those obtained by other spectroscopic methods. From the experimental investigation, it is shown that the shift of spectral line can be used to determine the temperature of plasma jet. The error of this method for the determination of temperature is about 10%.