

千瓦级连续 CO₂ 激光器电子温度的自动双探针测量系统

李同宁 刘东华 李再光

漆启年

(华中工学院激光研究所)

(华中师范学院物理系)

提要: 本文提出了用 Z-80 微型机控制的电子温度双探针自动测量系统, 给出了数据处理的软件程序。在 HGL-81 型 2kW 级 CO₂ 激光器上对放电等离子体进行了测量。在不同电流、不同气压、不同气体混合比例、不同位置测得的平均电子温度为 (1.7~3.2)eV, 平均电子浓度为 $(0.62\sim 1.36)\times 10^{11}\text{ cm}^{-3}$, 平均比电场为 $2.0\times 10^{-16}\text{ V}\cdot\text{cm}^2$ 。

A microcomputer-controlled double-probe system measuring electron temperature of multi-kilowatt CW CO₂ lasers

Li Tongnin, Liu Donghua, Li Zaiguang

(Laser Institute, Huazhong University of Science and Technology)

Qi Qinian

(Physics Department, Huazhong Teachers College)

Abstract: A microcomputer-controlled double-probe system and the software for computing the electron temperature from the V-I curve measured with this system have been developed. At different discharge currents, gas pressures, ingredients of gas mixture and probe position of the 2kW CW CO₂ laser, the measured average electron temperature and electron density are in the range of (1.7~3.2)eV and $(0.62\sim 1.36)\times 10^{11}\text{ cm}^{-3}$ respectively. The E/N is about $2.0\times 10^{-16}\text{ V}\cdot\text{cm}^2$.

一、引言

Clark 和 Smith^[1]、Carswell 和 Wood^[2]、Novgrodov^[3] 以及 Nighan^[4] 等都发表了有关 CO₂ 激光器放电等离子体的理论与实验报

道。但他们所研究的 CO₂ 激光器的工作气压仅限于几 Torr 到 20 Torr, 且气体不是快速流动的。随着大功率激光器的发展, 为了提高它的电光转换效率并改善放电稳定性, 有必要对高压、快速流动条件下的放电等离子

收稿日期: 1984 年 11 月 20 日。

体进行研究。本文提出的微型机控制的双探针测量系统和数据处理程序,为这方面的研究提供了有效的方法。

二、双探针测量原理

双探针测量电子温度的原理与 Langmuir 1923 年提出的单探针原理相同^[5]。使用简化的探针理论,应满足五条简化条件^[6],在我们所研究的 CO₂-N₂-He 气体放电条件下能满足这些。

当两根探针靠得足够近时,可由双探针伏安特性曲线满足的方程求出^[7]

$$KT_e = \frac{eI_{i0}}{2} \left(\frac{dI_D}{dV_D} \right)^{-1} \Big|_{I_D=0} \quad (1)$$

式中, K : 玻尔兹曼常数; T_e : 电子温度; I_{i0} : 离子饱和流; I_D : 探针电流; V_D : 扫描电压。典型的双探针伏安特性曲线如图 1 所示。由曲线可以看出: 伏安曲线由三部分组成, 两个离子饱和区和一个过渡区。可以用四个特征参量 X 、 S_1 、 S_2 、 ΔV 来描述曲线特性。

Swift 和 Schar (1970 年) 给出了由四个特征参量确定的电子温度的经验公式:

$$T_e = \frac{\Delta V}{4} \times \frac{1+0.85S/X}{1-0.5S/X} \quad (2)$$

式中, $S = (S_1 + S_2)/2$ 。 X 、 S_1 、 S_2 、 ΔV 分别如图 1 所示。

Bohm 又给出了对应的电子浓度计算式

$$n_e = \left(0.40 e S_i \sqrt{\frac{2KT_e}{m_i}} \right)^{-1} \cdot I_{i0} \quad (3)$$

式中, S_i : 探针探入等离子体内的表面积;

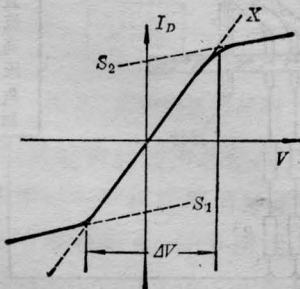


图 1 双探针特性曲线

e : 电子电量。

三、自动双探针测量系统

整个测试系统由两大部分组成: 硬件电路和软件程序。

1. 硬件电路

硬件电路方框图见图 2。

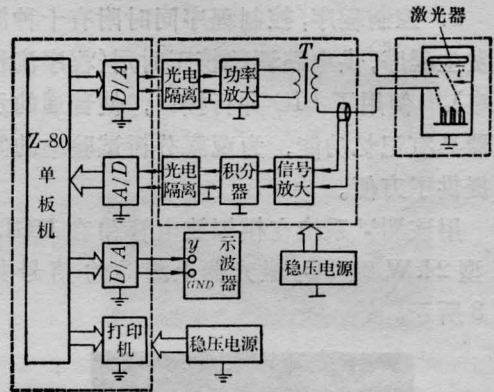


图 2 电子温度自动测量方框图

硬件电路由 Z-80 单板机、A/D 转换、D/A 转换、探针输入输出、光电隔离电路、功率放大电路、积分放大电路和电位配平校正电路组成。为了增强测试系统的抗干扰能力,采用共模抑制性能高的运算放大电路作输入放大;为使频率响应特性好,采用 OCL 电路作功放电路;为使测试系统在高压放电时正常工作,用隔离电压为 7500 V 的交流线性光电耦合元件 MOC 5010 作隔离电路,同时,采用了变压器和罗柯夫斯基线圈隔离;为减小测量误差,采取了屏蔽、悬浮地等措施,同时选用了双 T 型选通积分电路,抗干扰能力强。

电路工作原理简述如下:由 Z-80 单板机产生 0~5 V、频率为 (40~3 k) Hz 可调的锯齿波,经 D/A 转换到功率放大电路,然后送升压变压器,使扫描电压在 ±40~±65 V 可调,再将所需的扫描电压加在探针两端。探针的电流信号由罗柯夫斯基线圈感应获得,

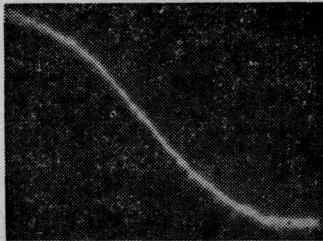
经积分放大电路后由 A/D 转换送到单板机中的 RAM 存储器中存放起来。根据需要,不但可以把伏安特性曲线实时显示在示波器上,而且可由 TP-801P 微型打印机打印出数据和曲线。

2. 软件程序

软件程序由控制程序和数据处理程序组成。控制程序用 Z-80 汇编语言编制,数据处理程序用 BASIC 语言编写。

a. 控制程序:控制程序同时附有十种波形发生程序,供电路调整校正时用(程序流程图略)。使用了 PIO 并行接口,使普通的示波器具有记忆功能,为观察分析试验中的问题提供了方便。

用该测试系统在模拟放电管和在 HGL-81 型 2kW 级 CO₂ 激光器上测得的信号如图 3 所示。



(a) 模拟放电管上获得的伏安曲线



(b) HGL-81 型激光器上获得的伏安曲线

图 3

b. 计算程序:一条伏安特性曲线由 256 个点组成。打印出来的数据用一元线性回归分析方法,对测量数据进行处理。用 BASIC 语言编制的流程图见图 4。在 Apple-II 微型机上拟合处理后,直接求出四个特征参量,并利用公式(2)、(3)算出电子温度 T_e 和电子浓度 n_e 。

采用了自动测量系统,测取一根伏安特

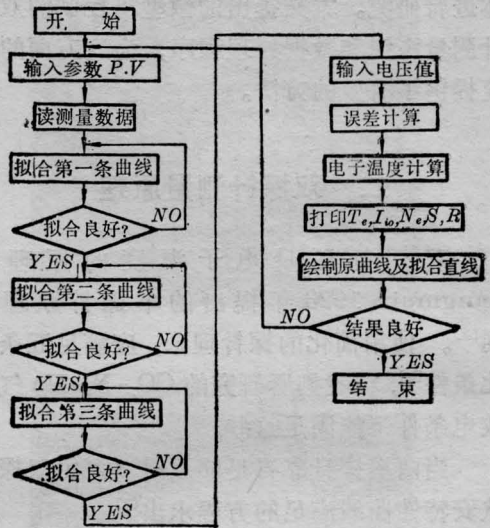


图 4

性曲线仅仅需要 18 ms,因而,是适应于快速流动等离子体的。考虑到高压运行时的修正系数 $f_t = 0.98^{[8]}$, 探针本身的测量误差约 10%^[9], 而用一元线性回归分析方法拟合直线误差 $\leq 4\%$, 故该测试系统精度达 15.3% 左右。

四、HGL-81 型激光器实验测量研究

HGL-81 型 2 kW 级 CO₂ 激光器采用三轴正交式, 高压运行, 工作气体快速流动, 封闭循环。电极结构和探针安装如图 5 所示。图 6 是双探针示意图。

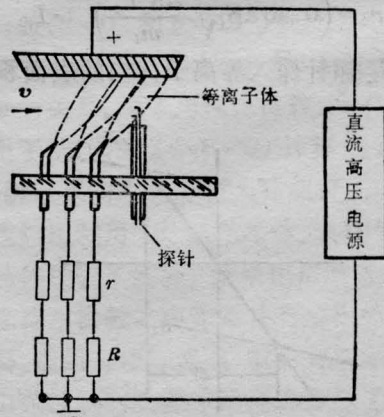


图 5 电极结构及探针安排

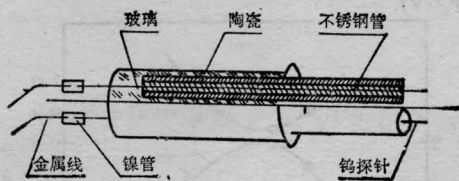


图6 双探针示意图

探针用半径为 0.15 mm 的钨丝制成。两探针间隔 1.6 mm，伸入等离子体内长度为 2 mm。探针安装在距第三排放电针分别为 10、13、20 mm 的地方。

在不同电流、不同气压、不同气体混合比例、不同位置测得的平均电子温度为 (1.7~3.2) eV，平均电子浓度为 (0.62~1.36) × 10¹¹ cm⁻³，平均比电场为 2.0 × 10⁻¹⁶ V·cm²。下面就放电参数对电子温度的影响进行讨论。

1. 电子温度与放电电流的关系

图 7 是电子温度随放电电流变化的规律。由图可见，随着 I 加大， T_e 具有下降的趋势，而电子浓度则有所增加。其原因可由正柱区电场和平均自由程随 I 上升而下降来定性解释。图 8 给出的是探针电位和正柱区电场随电流变化的规律。在气体快速对流冷却放电情况下，由 I 引起的热效应对 T_e 的影响，在较短时间内可以不考虑。已知：

$$T_e \propto \lambda_e E \quad (4)$$

$$n_e \propto J_e / \bar{v} e \quad (5)$$

式中 λ_e ：电子平均自由程； J_e ：电子电流密度； \bar{v} ：电子平均速度。当电流 I 上升时电子浓度会增加，而电子浓度的增加会导致平均自由程的下降；同时，如图 8 所示，电流加大，电场下降，使电子温度下降。故可定性用 (4)、(5) 来解释 T_e 和 n_e 随电流的变化规律。

2. 电子温度与气压的关系

当气压在 60 Torr 到 100 Torr 之间变化时，测量放电等离子体的电子温度如图 9 所示。在三种气体混合放电时，电子温度以 0.029 eV/Torr 的速率下降。因而，适当提高

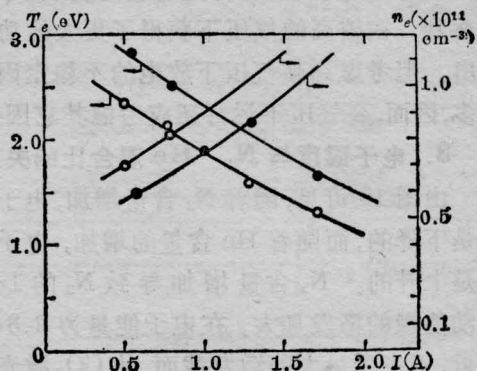


图7 电子温度随电流变化关系

●—CO₂:N₂:He=1:7:20; ○—CO₂:N₂:He=1:8.7:20; P=90 Torr; v=50 m/s; 共 80 根针放电; I=1.4 A

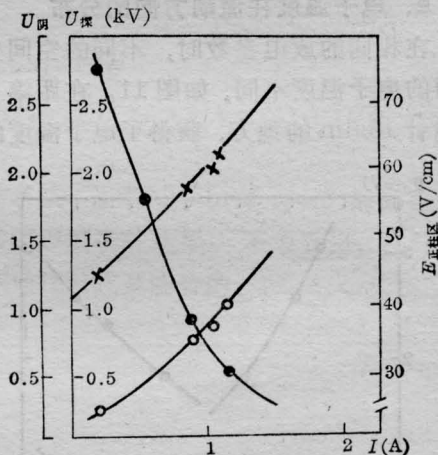


图8 正柱区电场随电流变化规律

CO₂:N₂:He=1:7:20; P=90 Torr; v=50 m/s; 80 根针放电; ×—U_探; ○—U_阴; ●—E_{正柱区}

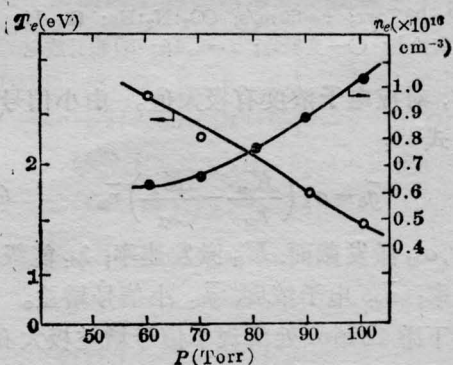


图9 电子温度与气压关系曲线

I=1.7 A; v=50 m/s; CO₂:N₂:He=1:7:20
80 根针放电

放电气压,对激光器运行是有利的。实验中也观察到,在较高的气压下获得了更大的功率输出。但考虑到高气压下放电的不稳定因素增多,因而,高气压下运行还应考虑其它因素。

3. 电子温度与 N₂、He 混合比的关系

由图 10 可见,随着 N₂ 含量增加,电子温度是下降的,而随着 He 含量的增加,电子温度是上升的。N₂ 含量增加导致 N₂ 的 1~8 振动能级的激发加大,在电子能量为 2.3eV 附近,可产生最大的激发截面,使 CO₂ 激光上能级的粒子数由于共振转移也增加。而低电子温度对激光是有利的,适当加大 N₂ 的比例,激光功率上升,这已在实验中观察到了。

4. 电子温度在流动方向的分布

在相同的放电参数时,不同的空间坐标测得的电子温度不同,如图 11。在距第三排放电针 13mm 的地方,获得了电子温度的极

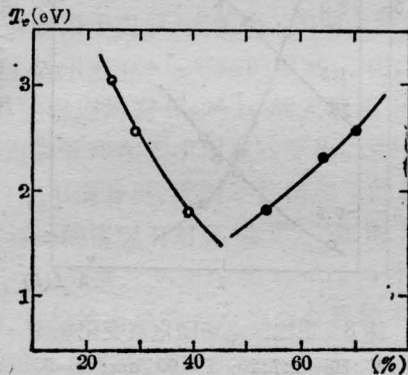


图 10 电子温度与 N₂、He 比例的关系

P=90 Torr; v=50 m/s; CO₂:N₂:He; ●—He 实验点; ○—实验点; I=1.4A; 80 根针放电

小值,对应电子浓度有极大值。由小信号增益公式^[10]:

$$\bar{g}_0 = \sigma_s \left(\frac{K_u}{\lambda_u} - \frac{K_1}{\lambda_1} \right) \bar{n}_e \quad (6)$$

式中,σ_s: 激发截面; K_i: 激发速率; λ_i: 能级弛豫速率; n̄_e: 电子浓度; ḡ₀: 小信号增益。对应在下游 13mm 处出现小信号增益极大值。电子温度沿流动方向的分布规律,为光腔与放电区匹配设计提供了实验依据。通过计算,得到对应 HGL-81 型激光器的光腔与放

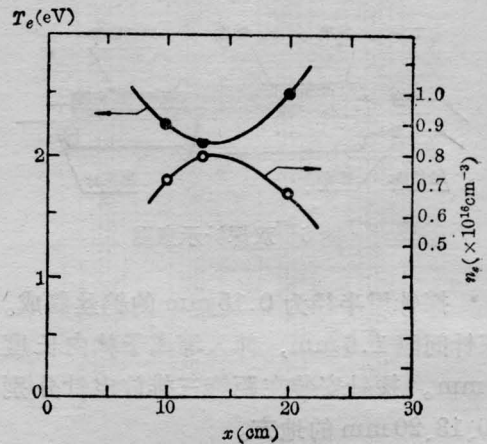


图 11 T_e、n_e 在流动方向的分布

第一、二排 80 根针放电; I=0.8 A;

CO₂:N₂:He=1:7:20; v=50 m/s

电位置最理想的配合。

利用正柱区电场,计算典型的运行条件: CO₂:N₂:He=1:7:20, P=90 Torr, 比电场 E/N ≈ 2.0 × 10⁻¹⁶ V·cm²。

理论表明^[10],激光器在低 E/N 值下运行是有利的。我们采用了多排针-平板放电结构,由于前排放电对后排的预电离作用,使 E/N 值减小。同时采用倾斜钨针代替钨针作阴极,不仅降低 E/N 值,对放电稳定性有好处,而且成本低,加工方便,有实用价值。

参 考 文 献

- [1] P. O. Clark, M. R., Smith; *Appl. Phys.*, 1966, **9**, 367.
- [2] A. I. Carswell, J. I. Wood; *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**, 3028.
- [3] M. Z. Novgordov; *Candidatie's Dissertation Defended at the P. N. Lebedev Physics Institute, Academy of Sciences of the USSR, Moscow, on October 4, 1971, p. 59-114.*
- [4] W. L. Nighan; *Phys. Rev. A*, 1970, **2**, No. 5, 1989.
- [5] E. O. Jomson; *Phys. Rev.*, 1950, **80**, No. 1, Oct.
- [6] 江剑平、翁甲辉等合编;《阴极电子学及气体放电原理》,国防出版社出版。
- [7] 项志遛,俞昌旋编著;《高温等离子体诊断技术》,上册,上海科学技术出版社出版。
- [8] J. D. Swift; *Electrical Probes for Plasma Diagnostics*, London Iliffe Books Ltd, 1970.
- [9] J. Irisawa, P. K. John; *Rev. Sci. Ins.*, 1973, **44**, 1021.
- [10] 秋业稔光ほか,《レーザー研究》,1976, **4**, No 3, 242.