

文章编号: 0258-702X(2002)02-0107-03

射频激励铜离子激光器阻抗特性 实验研究

黄建军¹, 余建华², D. Teuner³

(深圳大学¹ 理学院实验中心², 光电子系, 广东深圳 518060; 德国鲁尔大学电子工程与信息技术系, 德国波鸿 D-44780)

提要 利用自行研制的传感器和测量装置, 通过对射频放电电压电流及其相位角的测定, 结合放电管的等效电路, 对射频激励激光器阻抗特性进行研究, 得出射频激励激光器等离子体的伏安特性曲线, 以及等离子体电阻、容抗与气体压强、放电电流之间的实验曲线。

关键词 射频放电, 阻抗特性, 等效电路模型

中图分类号 TN 248.2+5 **文献标识码** A

Experimental Study on Impedance Characteristics of the Cu Ion Laser at RF Discharge Excitation

HUANG Jian-jun¹, YU Jian-hua², D. Teuner³

¹ Experimental Center of School of Science, ² Department of Optical Electrics, Shenzhen University, Shenzhen 518060
³ Department of Electrical Engineering and Information Technology, D-44780 Bochum Germany

Abstract The impedance characteristics of RF discharge CW laser are studied by measuring the current, voltage and phase angle. The $V-I$ characteristic, impedance and capacitance of the RF discharge plasma changing with the gas pressure and current are given.

Key words RF discharge, equivalent electrical circuit model, impedance characteristics

1 引 言

由于分布电容的存在而造成对测量仪器的干扰, 使得对射频放电电压电流及相位的测量到目前为止仍然是比较困难和昂贵的; 使用简单的电压电流探头而无干扰地精确测量出电压、电流和相位角, 从而计算出功率和复合阻抗几乎是不可能的。通过自行研制的传感器^[1], 以网络分析理论为基础, 采用数字与计算机技术, 对射频放电电压、电流、相位角以及功率进行精确的测量, 结合等效电路模型得到等离子体阻抗的相关信息。

2 RF 放电电压电流的测量原理

一个线圈就可以组成一个简便的电流探头, 用来测量和电流成正比的磁场强度 H , 但是要想完全屏蔽电场对电流探头干扰是很困难的, 因此仪表得到的电流示值, 我们用 S_I 表示, 是 RF 电压 U 和电流 I 共同叠加作用的结果

$$S_I = a_{11}I + a_{12}U \quad (1)$$

电压探头通常采用容性分压器, 用来测量和电压成正比的电场强度 E 。同样由于电流形成的磁场的耦合, 使仪表得到的电压示值, S_U 是 RF 电压 U 和电流 I 共同叠加作用的结果

收稿日期 2001-01-31; 收到修改稿日期 2001-03-19

基金项目 广东省自然科学基金(编号 980922)资助项目。

作者简介 黄建军(1862—)男, 深圳大学理学院高级实验师, 学士(目前为中国科学院等离子体物理研究所培养博士研究生), 主要从事应用等离子体技术研究。E-mail: huangjj@szu.edu.cn

$$S_U = a_{21}I + a_{22}U \quad (2)$$

从(1)和(2)式可以看出,要想精确地测量 RF 电压 U 和电流 I , 必须首先得到系数 a_{xx} 。通常情况希望 a_{12}, a_{21} 为零, 而 a_{11}, a_{22} 为实数。但令人遗憾的是, 在高频情况下这是很难实现的, 或者说要实现是非常昂贵的。如果使用已知阻值和性质的负载, 在输入已知功率的前提下, 就可以对传感器进行校正得到系数 a_{xx} , 这样 RF 电压 U 和电流 I 就可以通过下式计算得到

$$\begin{pmatrix} I \\ U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} S_I \\ S_U \end{pmatrix} \quad (3)$$

进而通过计算 $Z = U/I$, 就可以得到激光放电管的总阻抗 Z , U, I 相位角。这里(1)~(3)式中的各量均为复数, 电压和电流的相互叠加的结果, 不仅影响探头电压和电流输出示值的幅值, 而且影响它们的相位。测量出 U, I 之后, 在无射频放电的情况下, 测出放电管阻抗 $Z_0 = (j\omega C_0)^{-1}$ 计算出 C_0 , 电极间的电容 C_{p0} 则可用公式 $C_{p0} = \epsilon_0 \epsilon_r A/d$ 计算得出, 式中 ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为相对介电常数, A 为电极的面积, d 为电极间的距离; 则分布电容 $C_S = C_0 - C_{p0}$ 。实际测量得 $C_0 = 33$ pF, 计算 C_{p0} 约 1.8 pF。图 1 为激光管结构剖面图, 考虑到分布电容的存在, 其等效电路如图 2 所示^[2], 由图 2 得

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{U} = \left(\frac{1}{Z_p} + j\omega C_S \right) \quad (4)$$

则, 等离子体阻抗

$$Z_p = \left(\frac{1}{Z} - j\omega C_S \right)^{-1} \quad (5)$$

根据欧姆定律 $I_p = U/Z_p$ 求得放电电流 I_p , 进而得出 R_p-I_p 及 X_C-I_p 之间的关系。

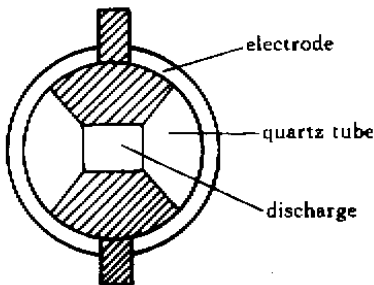


图 1 激光管结构的剖面图及参数

电极面积 4×200 mm²; 电极间距 4 mm; 石英管内径 15 mm

Fig. 1 Discharge configuration and the cross section of the laser tube

electrode area: 4×200 mm²; electrode distance: 4 mm;

quartz tube: internal diameter 15 mm

3 实验装置

图 3 为实验装置图。测量探头结构详见文献 [13], 匹配网络采用 L 型, 因为 L 型匹配网络的传输效率较 π 型高出 15%^[4]; 射频功率计采用日本 DAIWA 公司的产品, 最大量程为 1.5 kW; RF 功率发生器采用德国 Huettinger 公司生产的, 频率为 13.56 MHz, 最大功率输出为 1 kW; 50 Ω 校正传感器假负载 (High-Power Attenuator) 为德国 Rohde & Schwarz 公司生产的, 其技术指标为 40 dB, 0~1 GHz 的带宽, 功率为 1 kW; 数字存储示波器为美国 Tektronic 公司生产的 TDS360, 双通道(分别输入 S_I, S_U), 带宽为 1 GHz。

4 实验结果

对上述激光管充 He 气, 压强从 3 kPa 到 10 kPa, 输入射频功率从 10 至 80 W, 频率为 13.56 MHz, 在实现匹配的情况下(电压驻波比(VSWR)约为 1.1), 分别测量出激光管通过的电流、端电压以及其相位, 结合放电管的等效电路模型计算出通过等离子体的电流及其阻抗, 图 4 为不同气压和输入功率下放电装置的伏安特性曲线, 图 5(a) 为不同气压下等离子体电阻随电流变化的关系曲线, 图

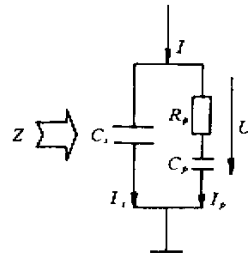


图 2 激光管等效电路

U : 测量电压; I : 测量电流; I_p : 穿过等离子体的放电电流; I_s : 穿过寄生电容的电流; C_S : 激光管寄生电容; R_p : 等离子体电阻; C_p : 等离子体电容; Z_p : 等离子体阻抗 $R_p + \frac{1}{j\omega C_p}$; Z : 激光管总的等效阻抗

Fig. 2 Equivalent electrical circuit of the laser tube

U : measured voltage; I : measured current; I_p : discharge current through plasma; I_s : current flowing through stray capacitance; C_S : laser tube stray capacitance; R_p : plasma resistance; C_p : plasma capacitance; Z_p : plasma impedance $R_p + \frac{1}{j\omega C_p}$; Z : overall equivalent impedance of the laser tube

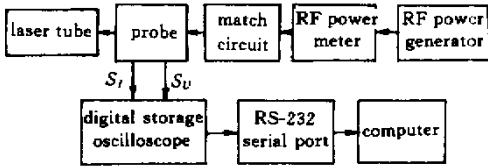


图 3 实验装置图
Fig.3 Experimental setup

5 结 论

使用经校正的传感器可以精确地测量出放电电压、电流及其相位角。放电管的总阻抗表现出容性、电压和电流间的相位角与充入气体的压强有关,其范围为 $-84^\circ < \varphi < -68^\circ$ 。放电管总阻抗的实部小于 60Ω ,虚部在 $200 \sim 300 \Omega$ 之间,其伏安特性近似直线,表明放电管总阻抗变化较小,放电电流大部分流过分布电容 C_S 。

同放电管总阻抗有所不同,等离子体阻抗的实部和虚部在同一个数量级,其范围在 $300 \Omega < Z < 2000 \Omega$,且随着电流密度和气体压强的增加而同步减少,表明随着放电电流密度的增加,欧姆能量损耗在增加,次级电子发射和电离能力增加,放电的维持机制趋同于空心阴极放电(HCD)。

致谢 本课题得到德国研究协会低温等离子体特别研究小组(SFB191)提供在德国期间合作研究的资助,特别是在德期间得到了德国鲁尔大学电子工程系的 J. Mentel 教授和 Schulze 博士在实验室设备和技术以及其他方面的大力支持,对此向他们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Huang Jianjun, Yu Jianhua, D. Teuner. The probe measuring voltage, current and the phase angle of RF discharges [J]. *Instrument Technique and Sensor* (仪表技术与传感器), 2000, (11): 1~2 (in Chinese)
- 2 M. A. Sobolewski. Electrical characteristics of argon radio frequency glow discharges in an asymmetric cell [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1995, 23(6): 1006~1022
- 3 Huang Jianjun, Yu Jianhua, D. Teuner. Measurement of voltage current phase angle and power at RF discharges [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation* (电子测量与仪表), 2000, (9): 25~27 (in Chinese)
- 4 Mohamed Salem, J.-F. Loiseau, B. Held. Impedance matching for optimization of power transfer in a capacitively excited RF plasma reactor [J]. *The European Physical Journal: Applied Physics*, 1998, 3: 91~95

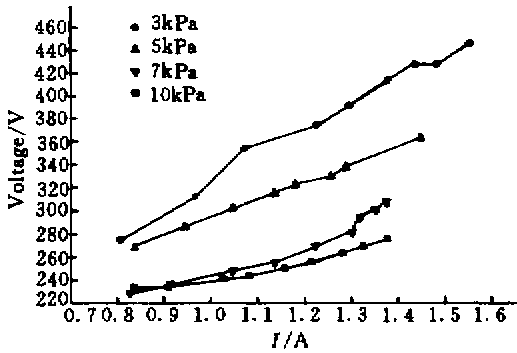


图 4 放电装置伏安特性曲线
Fig.4 Voltage as a function of current

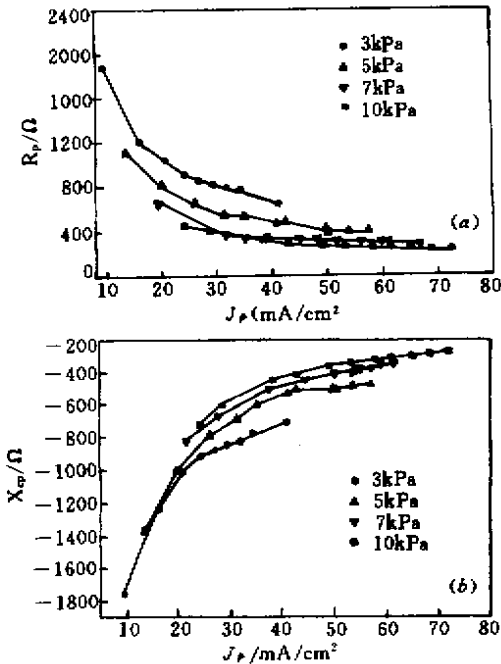


图 5 等离子体电阻 (a) 及等离子体容抗 (b) 与电流密度关系曲线

Fig.5 Real part of the plasma (a) and imaginary part of the plasma (b) as a function of the current density

(b) 为不同气压下等离子体容抗随电流变化的关系曲线。