

射频放电阻抗测量用于等离子体诊断研究*

黄建军¹⁾ 余建华²⁾ D. Teuner³⁾

¹⁾ 深圳大学理学院实验中心, 深圳 518060)

²⁾ 深圳大学光电子系, 深圳 518060)

³⁾ 德国鲁尔大学电子工程与信息技术系, 波鸿 D-44780, 德国)

(2001 年 2 月 25 日收到, 2001 年 6 月 9 日收到修改稿)

利用自行研制的传感器和测量装置, 通过对射频放电电压、电流以及其相位角的精确测定, 算出放电管的总阻抗, 结合放电管的等效电路模型与 Godyak 等建立的射频放电模型, 对射频激励铜离子激光管在氦气中的放电特性进行了研究, 得出射频激励铜离子激光器不同气压及电流密度下的等离子体电阻、容抗、鞘层厚度及电子密度.

关键词: 射频放电, 阻抗测量, 等离子体诊断

PACC: 5270, 5280P

1 引 言

近 20 年来, 射频气体放电广泛应用于半导体微电子和薄膜、离子刻蚀和薄膜沉积以及气体激光器等领域^[1-15]. 诊断等离子体参量主要有朗缪尔 (Langmuir) 探针法^[16]和光谱法^[17]等, 阻抗测量也是一种常见的诊断技术, 它具有测量测试仪器简单并能对放电装置的阻抗进行现场和实时监测. 但是, 将它用于因分布电容的存在而造成对测量仪器的干扰, 使得使用简单的电压电流探头, 无干扰地精确地测量出电压、电流和相位角, 从而计算出阻抗几乎是不可能的. 通过自行研制的传感器, 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、电流及相位角进行精确的测量^[18, 19], 结合等效电路模型得到等离子体阻抗的实部和虚部, 再结合 Godyak 等建立的射频放电模型得到等离子体的电子密度.

2 射频放电阻抗测量法用于等离子体诊断的原理

一个线圈就可以组成一个简便的电流探头, 用来测量与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, 为射频电压 U 和电流 I 共同叠加作用的结果,

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

电压探头用来测量与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, 使得仪表得到的电压示值, 我们用 S_U 表示, 为射频电压 U 和电流 I 共同叠加作用的结果,

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

由(1)和(2)式得到

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

通过对传感器的校正, 得到系数 a_{xx} , 即可精确的测量射频电压 U 和电流 I , 进而得到放电管的阻抗 $Z = U/I$. 在此基础上, 测出无射频放电时放电管阻抗 $Z_0 = (j\omega C_0)^{-1}$ 算出 C_0 , 电极间的电容 C_{p0} 则可以公式 $C_{p0} = \epsilon_0 \epsilon_r A/d$ 计算得出, 式中 ϵ_0 为真空介电常量, ϵ_r 为相对介电常量, 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 $C_0 = 33\text{PF}$, 计算 C_{p0} 约 1.8PF . 图 1 为激光管剖面与放电示意图, 只要适当控制电极间的距离, 放电区域只有鞘层和负辉区.

考虑到分布电容的存在, 其等效电路如图 2 所示^[20, 21], 图 2 中 U 为电压测量值, I 为电流测量值, I_p 为通过等离子体的电流, I_s 为通过分布电容的电

* 广东省自然科学基金(批准号 980922)资助的课题.

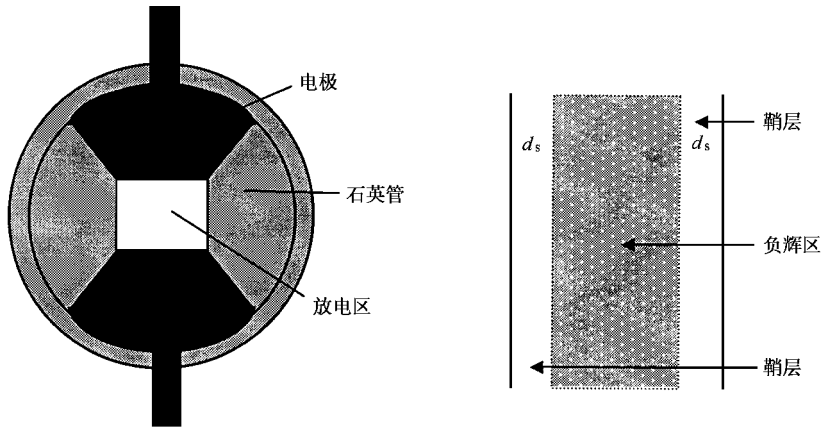


图1 放电管结构剖面和放电示意图 电极面积为 $4\text{mm} \times 200\text{mm}$; 电极间距为 4mm ; 放电管内径为 15mm

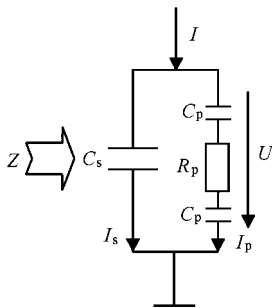


图2 射频放电管等效电路

流, C_s 为分布电容, R_p 为负辉区电阻, C_p 为鞘层电容, Z_p 为等离子体阻抗, Z 为放电管总阻抗. 由图2得到

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

则等离子体阻抗为

$$Z_p = \left(\frac{1}{Z} - j\omega C_s \right)^{-1} = R_p - jX_c = R_p + \frac{2}{j\omega C_p}. \quad (5)$$

根据欧姆定律 $I_p = U/Z_p$, 求得放电电流 I_p , 而 Z_p , X_c , R_p . 由(4)和(5)两式求出.

3 鞘层与电子密度

以 Godyak^[22, 23] 等提出的一维射频放电模型为依据, 该模型假定电子密度在辉光区是均匀的, 鞘层中的电子密度为零, 辉光区电子的密度同离子的密度相同, 放电电压、电流为正弦波. 鞘层阻抗为一电容,

辉光区等效为一纯电阻. 鞘层电容 C 表示为

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{\bar{d}} = \frac{1}{\omega X_c}, \quad (6)$$

式中 A 为电极的面积, $\bar{d} = 2d_s$ 为鞘层时间平均厚度. 等离子体放电电压 U 表示为

$$|U|^2 = \left(2 \frac{n_e \bar{e} d^2}{\epsilon_0} \right)^2 + \left(\frac{\omega \bar{d} L}{\mu_e} \right)^2, \quad (7)$$

式中 U 为等离子体放电电压, ω 为射频电源的角频率, L 为放电间隙, μ_e 为电子迁移率, ϵ_0 真空介电常量, n_e 为电子密度. (7) 式中等号右边第一项代表加在 2 个鞘层上的电压, 第二项表示加在辉光区间的电压即 R_p 两端电压, 其值为 $U_p = I_p R_p$, 将(7)式改写如下:

$$n_e = \frac{\epsilon_0}{2\bar{e}d^2} \sqrt{|U|^2 - (I_p R_p)^2}, \quad (8)$$

式中 U 值为测量值, $I_p = U/Z_p$, Z_p , X_c , R_p 已求出.

4 实验装置与结果

图3为实验装置图. 匹配网络采用 L 型, 射频功率计采用日本 DAIWA 公司的产品, 最大量程为 1.5kW . 射频功率发生器采用德国 Huettinger 公司生产的, 频率为 13.56MHz , 最大功率输出为 1kW . 50Ω 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 40dB , $0-1\text{GHz}$ 的带宽, 功率为 1kW ; 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 1GHz .

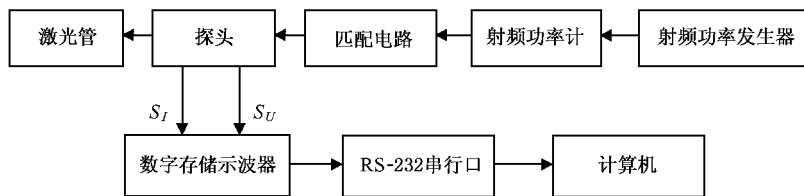
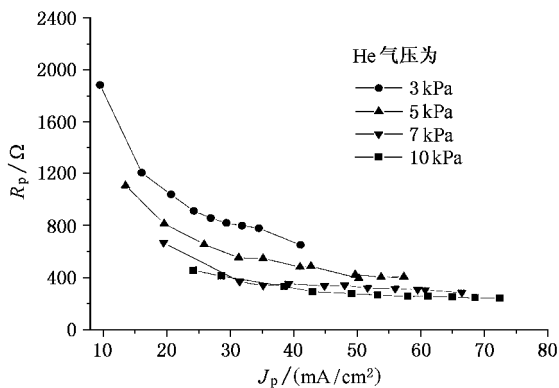
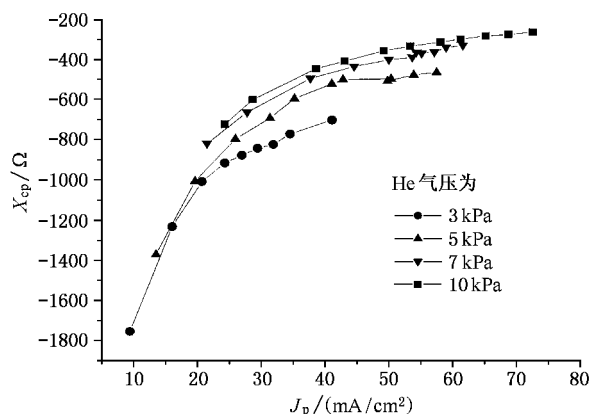
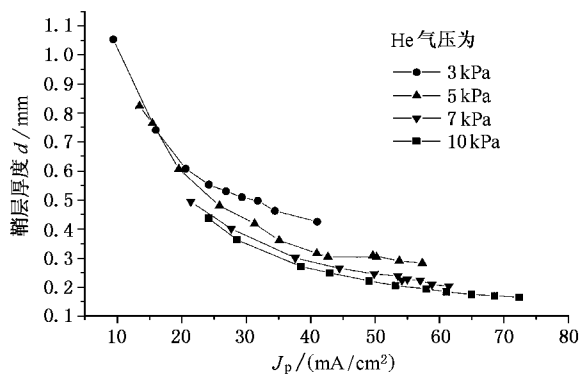
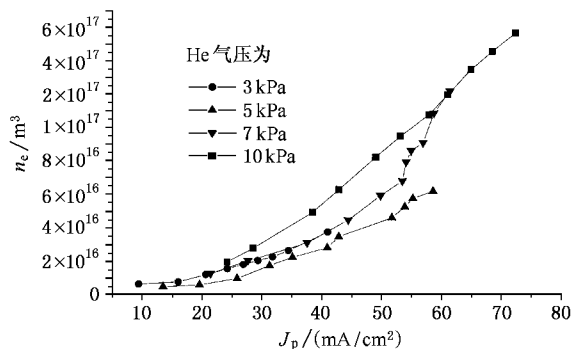


图3 实验装置图

对上述激光管充 He 气,压强从 3 到 10kPa 输入射频功率从 10—80W,频率为 13.56MHz,在实现匹配的情况下(VSWR 约为 1.1),分别测量出放电装置通过的电流、端电压及其相位,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—图 7 分别为不同气压下,等离子体电阻、容抗、鞘层厚度及电子密度随电流变化的关系曲线。

5 结果与分析

使用 U, I 探头对射频放电电压、电流,及其它

图4 等离子体电阻 R_p 与电流密度 J_p 的关系曲线图5 等离子体容抗 X_{cp} 与电流密度 J_p 的关系曲线图6 鞘层厚度 d 与电流密度 J_p 的关系曲线图7 电子密度 n_e 与电流密度 J_p 的关系曲线

们之间相位角的精确测定,使得放电等离子体的相关参量的诊断成为可能.得出下列结论:

1) 等离子体电阻随着放电电流密度的增加而减小,欧姆能量损耗在增加,次级电子发射和电离能力增加,放电的维持机理趋同于 HCD; 2) 鞘层厚度随着放电电流密度的增加而减小; 3) 电子密度随着放电电流密度的增加而增加。

该诊断方法简单方便且实时性强,对新激光器的出光及优化有很强的指导意义.同时注意到, Godyak 等建立的模型是针对平行平板射频放电,假定电子密度是均匀的,本文中的放电电极,严格讲不

是平行平板,电子密度也不是均匀的,鞘层的边沿也不是绝对的陡,这些都会给电子密度的计算带来偏差.

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, Teuner 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.

- [1] J. W. Butterbaugh, L. D. Baston, H. H. Sawin, *J. Vac. Sci. Techn.*, **A8** (1990), 916.
- [2] M. A. Sobolewski, *J. Vac. Sci. Techn.*, **A10** (1992), 3550.
- [3] C. Bohm, J. Perrin, *J. Phys.*, **D24** (1991), 865.
- [4] C. Beneking, *J. Appl. Phys.*, **68** (1990), A461.
- [5] P. Bletzinger, M. J. Flemming, *J. Appl. Phys.*, **62** (1987), 4688.
- [6] W. G. M. Avan den Hoek, C. A. M. de Veris, M. G. J. Heijm, *J. Vac. Sci. Techn.*, **B5** (1987), 647.
- [7] A. J. Miranda, C. J. Spanos, *J. Vac. Sci. Techn.*, **A14** (1996), 1888.
- [8] L. J. Overzet, F. Y. Leong-Rousey, *Plasma Sour. Sci. Techn.*, **4** (1995), 432.
- [9] N. Spiliopoulos, D. Mataras, D. E. Rapakoulias, *J. Vac. Sci. Techn.*, **A14** (1996), 2757.
- [10] D. B. Ilic, *Rev. Sci. Instrum.*, **52** (1981), 1542.
- [11] A. J. Van Roosmalen, *Appl. Phys. Lett.*, **42** (1983), 416.
- [12] K. Wust, K. H. Groh, H. W. Lob, *Rev. Sci. Instrum.*, **63** (1992), 2584.
- [13] J. S. Logan, N. M. Mazza, P. D. Davidse, *J. Vac. Sci. Techn.*, **6** (1969), 120.
- [14] B. A. Ndries, G. Ravel, L. Peccoud, *J. Vac. Sci. Techn.*, **A7** (1989), 2774.
- [15] A. J. van Roosmalen, W. G. M. van hoek, H. Kalter, *J. Appl. Phys.*, **58** (1985), 653.
- [16] R. H. Yao, L. F. Chi, X. Y. Lin, K. X. Lin, *Acta Phys. Sin.*, **49** (2000), 922, (in Chinese) [姚若河、池凌飞、林璇英、林撰训, *物理学报*, **49** (2000), 922].
- [17] B. Chen, Z. J. Zheng, Y. K. Ding, *Acta Phys. Sin.*, **50** (2001), 711 (in Chinese) [陈波、郑志坚、丁永坤, *物理学报*, **50** (2001), 711].
- [18] J. J. Huang, J. H. Yu, D. Tuener, *Instr. Techn. Sensor.*, **11** (2000), 1 (in Chinese) [黄建军、余建华, D. Tuener, *仪表技术与传感器*, **11** (2000), 1].
- [19] J. J. Huang, J. H. Yu, D. Tuener, *Electri. Measur. Instr.*, **9** (2000), 25 (in Chinese) [黄建军、余建华, D. Tuener, *电测与仪表*, **9** (2000), 25].
- [20] M. Sobolewski, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **23** (1995), 1006.
- [21] A. V. Kalmykov, A. S. Smornov, A. Yu. Ustavshchikov, *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **36** (1991), 278.
- [22] V. A. Godyak, Soviet Radio Frequency Discharge Research. Falls Church, VA: Delphic (1986).
- [23] M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharge and Material Processing* (Wiley, New York, 1994).

PLASMA DIAGNOSIS OF RF DISCHARGE BY USING IMPEDANCE MEASUREMENT*

HUANG JIAN-JUN¹⁾ YU JIAN-HUA²⁾ D. TEUNER³⁾

¹⁾ *Experimental Center of School of Science, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*

²⁾ *Department of Optical Electrics of Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*

³⁾ *Department of Electrical Engineering and Information Technology, Ruhr-University, D-44780 Bochum, Germany*

(Received 25 February 2001 ; revised manuscript received 9 June 2001)

ABSTRACT

It is presented in this paper that the method known from network analysis with home-made probe and experimental setup to measure current, voltage and phase angle of RF discharge in He gas more accurately. The sheath thickness and the real and imaginary parts of the plasma impedance were obtained by using the equivalent circuit model and taking account stray capacitances of the set-up. In addition, making use of Godyak's RF discharge simple model, the electron density in the discharge was calculated at different pressure and current density.

Keywords : RF discharge, impedance measurement, plasma diagnosis

PACC : 5270, 5280P

* Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 980922).