0254-6124/2007/27(4)-315-06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Xu Jie, Zhao Guowei, Liang Zhiwei, Wang Zhijiang, Xu Yuemin. Measurements and analysis of plasma column discharge impedance. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(4): 315~320

柱形等离子体电离阻抗测量与分析*

徐 杰[1,2] 赵国伟[1,2] 梁志伟[1,2] 王之江[1] 徐跃民[1]

[1](中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

[2](中国科学院研究生院)

摘 要 表面波等离子体的研究由于实验数据的大量积累而得到快速发展. 结合传输线阻抗匹配原理, 设计实验对柱形表面波等离子体电离阻抗进行测量; 参照金属辐射体中辐射阻抗与损耗阻抗的求解方法, 在简化条件下理论计算柱形等离子体的电离阻抗, 并与实验数据进行分析比对. 研究表明, 表面波激发柱形等离子体的电离阻抗对等离子体源产生效率的分析及等离子体参数的诊断有着重要作用. 这种新型等离子体源的研究具有非常重要的意义.

关键词 柱形等离子体; 表面波; 电离阻抗

中图法分类号 P 353

Measurements and Analysis of Plasma Column Discharge Impedance

XU Jie[1,2] ZHAO Guowei[1,2] LIANG Zhiwei[1,2] WANG Zhijiang[1] XU Yuemin[1]

[1](*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

[2](*The Graduate School, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract Recently a large number of surface-wave plasmas experimental data have been accumulated, so their modeling is well advanced and they have found applications in various fields of research and technology. An experiment to measure surface-wave plasma column discharge impedance has been designed, using the principle of impedance matching in transmission line. Refer to the method to work out the radiation impedance and loss impedance of metal antenna, plasma column discharge impedance is calculated in the simplest cases and compared with experimental results. It is shown that surface-wave plasma column discharge impedance plays an important part in analyzing the efficiency of plasma source and diagnosing plasma parameters such as densities, temperatures. This study will be of great importance for further scientific and engineering work in order to meet the demands of the various diverse plasma technological applications.

Key words Plasma column, Surface wave, Discharge impedance

2006-12-04 收到原稿, 2007-03-05 收到修定稿

1 引言

低温等离子体加工技术在半导体工业和环境工程的应用中已显示出独特的功能. 要利用等离子体制备各种薄膜以及进行微细加工, 首先要获得等离子体. 产生并维持工业加工中所需要的等离子体, 最普遍的方式是直流放电和射频放电. 其中射频放电有更广泛的应用范围, 如薄膜沉积及刻蚀等.

射频放电一般是通过电容耦合或电感耦合的感应方式, 产生并维持等离子体的. 其中, 表面波等离子体 [1],[2] 是一种无电极的射频激发气体获得的低温等离子体. 这种方法在实验室中应用比较多, 表现出相对于其他等离子体源更为理想的综合特性. 例如, 不需要 ECR 等离子体或螺旋波等离子体那样的磁场, 结构简单; 不存在平板型等离子体那样因电极插入而导致的杂质问题; 容易产生截止密度以上高密度等离子体. 表面波等离子体源能够产生低压高密度、平面大面积均匀、无污染的等离子体, 是实现高度放电稳定性和处理过程可重复性的新一代等离子体源.

表面波等离子体源的效率 [1] 与功率源的输出功率有多大部分是消耗于放电有极大关系. 因此, 各式各样的匹配电路是其技术中不可或缺的组成部分. 本文将参照柱形金属辐射体, 重点分析表面波柱形等离子体电离阻抗的理论等效模型, 比较各种测量方法, 选用匹配法设计实验对其进行测量, 并对测量结果进行初步讨论.

2 物理背景

2.1 表面波激发柱形等离子体

利用高频电磁波在介质表面附近激发出截止密度以上的等离子体, 然后高频电磁波将在介质与等离子体间形成表面波的传输, 具有一定电场强度的表面波在其传输的范围内可生成和维持高密度的等离子体, 因此称为表面波等离子体. 利用表面波激发柱形等离子体的方法如图 1 所示, 将高频电磁波导入到介质管上, 在介质管壁上激发出表面波传输, 即可在管内生成表面波等离子体. 近些年来, 针对大面积或大体积加工的需求, 科研人员利用表面波激发等离子体的原理, 积极研究在大的平面或柱面介质表面激发表面波从而生成大平面或大体积的等离子体 [2].

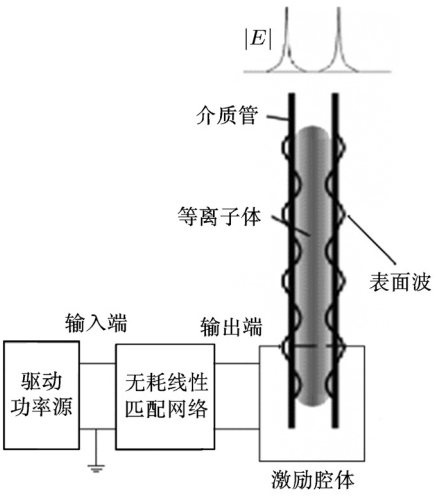


图 1 表面波激发等离子体

Fig.1 Plasma driven by surface wave

柱形非磁化等离子体有如下色散关系 [3],[4]:

$$\varepsilon_{\mathrm{r}} T_0 I_1(T_{\mathrm{p}} a) K_0(T_0 a) + T_{\mathrm{p}} K_1(T_0 a) I_0(T_{\mathrm{p}} a) = 0. \tag{1}$$

其中, I_n, K_n 为 n 阶 Bessel 函数;

$$\varepsilon_{\mathrm{r}} = 1 - \frac{\omega_{\mathrm{pe}}^2}{\omega(\omega - \mathrm{i}\nu_{\mathrm{m}})}$$

为等离子体的介电常数, 式中 ν_{m} 为碰撞频率, ω_{pe} 为等离子体频率, ω 为自由空间电磁波的频率;

$$T_{\mathrm{p}} = \boldsymbol{k}^2 - \varepsilon_{\mathrm{r}} \boldsymbol{k}_0^2, \qquad T_0 = \boldsymbol{k}^2 - \boldsymbol{k}_0^2,$$

式中 $\boldsymbol{k}$ 为等离子体中的波矢, $\boldsymbol{k}_0$ 为自由空间的波矢; a 为柱形等离子体半径.

对于沿 z 轴放置的柱形等离子体, 信号沿柱形等离子体表面传播时, 波矢不再是常实数, 而是一个复数的空间分布, 有

$$k(\omega, z) = k_{\mathrm{r}}(\omega, z) - \mathrm{i}k_{\mathrm{i}}(\omega, z). \tag{2}$$

波在表面传输的电流 [5],[6] 分布近似为

$$J(z) = J_0\left(\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\int_0^z k_r(z')\mathrm{d}z'} \cdot \mathrm{e}^{-\int_0^z k_{\mathrm{i}}(z')\mathrm{d}z'} - \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\int_z^{2l} k_r(z')\mathrm{d}z'} \cdot \mathrm{e}^{-\int_z^{2l} k_{\mathrm{i}}(z')\mathrm{d}z'}\right). \tag{3}$$

2.2 表面波等离子体电离阻抗的理论分析

表面波等离子体源功率损耗机制 [1] 如下:

(1) 在功率源到传输线端口和传输线到负载端口的功率反射;

(2) 在电子元件和金属材料中的功率损耗;

(3) 等离子体的辐射功率损耗;

(4) 产生与维持等离子体的功率损耗.

在此设计实验中，将随时调节电路尽量达到匹配，传输线各端口的功率反射损耗和电子元件中的功率损耗均可视为较小值，在分析时暂为忽略. 因此，等离子体源的功率几乎都损耗在以辐射阻抗和欧姆损耗阻抗为主的等离子体电离阻抗中，有

$$Z_{\mathrm{i}} = Z_{\mathrm{r}} + Z_{\Omega}. \tag{4}$$

参照柱形金属辐射体输入阻抗中辐射阻抗和欧姆损耗阻抗的计算方法，考虑柱形均匀分布等离子体的简化模型, 代入等离子体的参数条件, 将得到类比情况下柱形等离子体的电离阻抗理论计算值.

2.3　柱形等离子体辐射阻抗的计算

在特定条件下，特殊天线的辐射阻抗值可以解析求解 [6], 绝大部分只能通过数值求解. 由 Maxswell 方程得到

$$\boldsymbol{A} = \iiint_{V} \boldsymbol{J}\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\boldsymbol{k}R}}{4\pi R}\mathrm{d}V. \tag{5}$$

其中，$\boldsymbol{A}$ 为磁矢量，$\boldsymbol{J}$ 为电流分布，$\boldsymbol{k}$ 为介质中传播波矢，R 为源点到场点的距离，V 为包含电流源的有限体积.

在柱坐标中，有

$$\begin{aligned}\boldsymbol{H} =&\nabla\times\boldsymbol{A} = \\ &\hat{r}\Big(\frac{1}{r}\frac{\partial A_z}{\partial\varphi} - \frac{\partial A_\varphi}{\partial z}\Big) + \hat{\varphi}\Big(\frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r}\Big) + \\ &\hat{z}\Big[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rA_\varphi) - \Big(\frac{1}{r}\frac{\partial A_r}{\partial\varphi}\Big)\Big].\end{aligned} \tag{6}$$

当所加的射频信号远低于对应的等离子体频率时，等离子体就相当于一个良导体，因此可以认为柱形等离子体的电流分布与金属表面电流分布相似. 将柱形等离子体沿 z 轴放置,

$$\boldsymbol{J} = J(z)\hat{z},$$
$$\boldsymbol{A} = A(r,z)\hat{z}.$$

代入式 (6), 得到

$$\begin{aligned}\boldsymbol{H} =& -\hat{\varphi}\frac{\partial A_z}{\partial r} = -\hat{\varphi}\frac{\partial}{\partial r}\Big(\int_0^l \boldsymbol{J}\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{i}kR}}{4\pi R}\mathrm{d}z'\Big) = \\ &-\hat{\varphi}\int_0^l \boldsymbol{J}\frac{\partial}{\partial r}\Big(\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{i}kR}}{4\pi R}\Big)\mathrm{d}z'.\end{aligned} \tag{7}$$

在源外,

$$\boldsymbol{E} = \frac{1}{\mathrm{i}\omega\varepsilon}\nabla\times\boldsymbol{H},$$

在柱坐标中将式 (7) 代入，得到

$$\begin{aligned}\boldsymbol{E}(z) =& \frac{-1}{\mathrm{i}4\pi\omega\varepsilon}\Big\{\hat{r}\frac{\partial}{\partial z}\Big(\int_0^l \boldsymbol{J}\frac{\partial G}{\partial r}\mathrm{d}z'\Big) + \\ &\hat{z}\Big[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\Big(r\int_0^l J\frac{\partial G}{\partial r}\mathrm{d}z'\Big)\Big]\Big\}.\end{aligned} \tag{8}$$

其中，$G = \dfrac{\mathrm{e}^{-\mathrm{i}kR}}{R}$. 天线辐射阻抗公式为

$$Z_{\mathrm{r}} = -\frac{1}{J_0^2}\int \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{J}\mathrm{d}l. \tag{9}$$

其中，J_0 为电流幅度. 将式 (8) 代入式 (9), 得到所求辐射阻抗公式为

$$\begin{aligned}Z_{\mathrm{r}} =& \frac{-\mathrm{i}}{4\pi\omega\varepsilon J_0^2}\int_0^l J(z)E_z(r=a,z)\mathrm{d}z = \\ &\frac{-\mathrm{i}}{4\pi\omega\varepsilon J_0^2}\int_0^l J(z)\Big\{\Big[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\cdot \\ &\Big(r\int_0^l J(z')\frac{\partial G}{\partial r}\mathrm{d}z'\Big)\Big]\Big|_{r=a}\Big\}\mathrm{d}z = \\ &\frac{-\mathrm{i}}{4\pi\omega\varepsilon J_0^2}\int_0^l J(z)\int_0^l J(z')\ \mathrm{e}^{-\mathrm{i}kR}\cdot \\ &\Big(\frac{3\mathrm{i}kr^2}{R^4} - \frac{2\mathrm{i}k}{R^2} + \frac{3r^2}{R^5} - \frac{k^2r^2}{R^3} - \frac{2}{R^3}\Big)\mathrm{d}z'\mathrm{d}z.\end{aligned} \tag{10}$$

代入式 (3) 的电流分布 $J(z)$ 就可以得到柱形等离子体辐射阻抗 [6] 计算公式.

2.4　柱形等离子体欧姆损耗阻抗的计算

在欧姆定律中，电场 $\boldsymbol{E}$ 与放电电流密度 $\boldsymbol{J}$ 可由电导率 σ 联系起来，有

$$\boldsymbol{J} = \sigma\boldsymbol{E}. \tag{11}$$

其中，等离子体电导率为

$$\sigma = \frac{e^2 n_0}{m_{\mathrm{e}}(\nu_{\mathrm{m}} + \mathrm{i}\omega)}. \tag{12}$$

式中 $\nu_{\rm m}$ 为碰撞频率, ω 为自由空间电磁波频率, $m_{\rm e}$ 为电子质量. 故可以得到欧姆损耗阻抗 [7] 为

$$Z_\Omega = \frac{l}{\sigma S}. \tag{13}$$

3 基本测量方法

射频产生的等离子体电离阻抗, 对于功率的耦合及等离子体状态和参数的研究至关重要. 一般测试的方法 [8] 有三种.

第一种, 利用电流和电压探针测量电流、电压幅值和两者之间的相位差得到电阻. 这种方法的难点在于电流和电压探针的测量点并不是实际电路的接入点, 中间等效电路的转换及相位差的计算十分复杂, 所以这种方法采用比较少.

第二种, 利用电离阻抗与射频功率源的网络匹配, 纯数学计算得到输入阻抗. 在这种测量方法中, 所有电路的组成, 包括杂散电阻都必须清楚. 这种方法的关键是一旦网络匹配好, 所有的反应器和匹配盒的总的电阻应该等于外面功率源的电阻.

上述两种方法测量的优点是可以在气体电离过程中测量到阻抗, 是实时的; 不利的方面是匹配网络中的杂散电阻都必须清楚, 要进行较复杂的四端口网络杂散电阻的等效电路计算.

为此, 设计选用第三种测量方法, 根据传输线理论, 一旦在某一截面达到共轭匹配, 那么在均匀传输线上任一截面处都是共轭匹配的. 在这种方法测量中, 不需要事先了解任何电路参数, 也不需要复杂的计算.

可以假设等离子体放电装置的阻抗为 $Z_{\rm L}$, 它与匹配电路的输出端相连, 调整好匹配网络, 使阻抗匹配, 也就是说, 功率计测得驻波比尽可能为 1, 如图 2 所示.

当气体电离熄灭后, 将输出端的等离子体负载 $Z_{\rm L}$ 移开, 而且输入端改变为 50 Ω 的标准负载. 根据电路理论, 当匹配网络中的功率损失可以忽略, 此时从输出端测量的阻抗为 $Z_{\rm L}^*$, 即用网络分析仪测量得到的阻抗值等于所求电离阻抗的复数共轭 [9], 如图 3 所示.

4 实验测量系统

图 4 所示为实验系统结构. 由于工作频段较

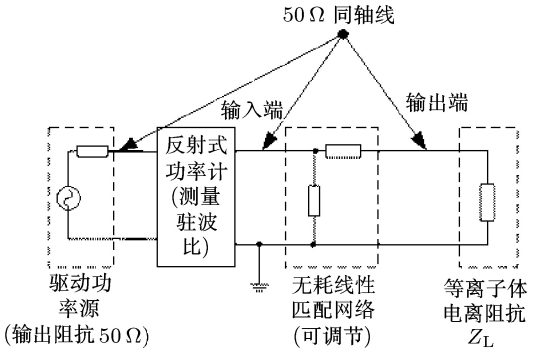


图 2 匹配调节

Fig.2 Adjustment of impedance matching

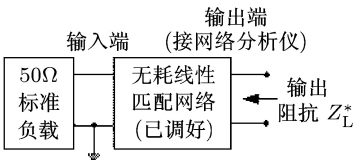


图 3 阻抗测量

Fig.3 Impedance measurement

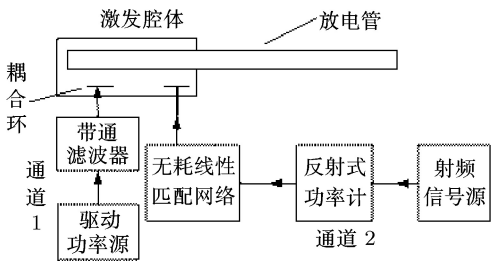


图 4 实验系统

Fig.4 Experiment system

低, 激发功率也较小, 我们没有采用 surfatron 或 surfaguide 激发结构 [1] 而是直接进行环耦合, 耦合环位于铜制激发腔体内部 [3],[4]. 为了避免源端的射频干扰, 各狭缝均用铝箔进行包裹. 系统工作气体为 Ar-Hg 混合气体, 气压在 1 Pa 量级.

实验中, 同时向气体柱输入两种不同频率的电磁波, 即有两路互不干扰的通道. 其中通道 1 为激发通道, 是频率为 150 MHz 的电磁波, 用于气体放电, 在放电管内壁的石英介质和等离子体之间激发表面波, 激发产生和维持等离子体; 通道 2 为测量通道, 是频率为 18~27 MHz 的电磁波. 本实验重点测量 18~27 MHz 信号与等离子体耦合时, 等离子体

所显现出的电离阻抗变化. 因此在测量通道中加入反射式功率计, 用于匹配调节的测定 (见图 4).

通过调节 T 形或 L 形线性匹配网络中的调谐电容和调谐电感, 可减小等离子体负载端的功率反射, 使信号通道实现阻抗匹配, 即反射式功率计测得驻波比接近于 1. 然后, 如前测量原理所述, 用网络分析仪测量得到电离阻抗的复数共轭 Z_{L}^{*}. 经过简单的数学变换即可得到所求等离子体电离阻抗 $Z_{\mathrm{i}} = R + \mathrm{i}X$.

5　实验结果与数值分析

取柱形等离子体半径 $a = 0.015\,\mathrm{m}$, 长度 $l = 1\,\mathrm{m}$, 等离子体密度和碰撞频率分别为

$n_{\mathrm{e}} = 8 \times 10^{10}/\mathrm{cm}^3$, $\nu_{\mathrm{m}} = 2 \times 10^8$ Hz;

$n_{\mathrm{e}} = 1.5 \times 10^{11}/\mathrm{cm}^3$, $\nu_{\mathrm{m}} = 4 \times 10^8$ Hz;

$n_{\mathrm{e}} = 2 \times 10^{11}/\mathrm{cm}^3$, $\nu_{\mathrm{m}} = 5 \times 10^8$ Hz.

在这三种情况下, 由上述理论计算得到柱形等离子体电离电阻 R 和电抗 X 随频率 f 变化的关系曲线, 并与实验测量值比对, 如图 5 所示.

根据图 5 所得的关系曲线, 并考虑一定的测量误差后, 可得到所测的 18~27 MHz 频率范围内的下列结论.

(1) 等离子体电阻 R 随着输入射频信号频率 f 的增加而有逐渐减小的趋势.

(2) 等离子体电抗 X 呈现容抗特性, 即 $X < 0$, 而且其绝对值随输入射频信号频率 f 的增加而有逐渐增加的趋势.

根据射频功率电容耦合产生电离气体理论, 以及等离子体鞘层理论, 等离子体电抗应该为电容性的 [10],[11], 这与实验结果吻合. 但是等离子体电抗 X 在实际测量中由于容易受到环境影响, 故测量值与计算值有一定差距. 而当假设柱形等离子体均匀密度 $n_{\mathrm{e}} = 8 \times 10^{10} \sim 2 \times 10^{11}/\mathrm{cm}^3$, 碰撞频率 $\nu_{\mathrm{m}} = 2 \times 10^8 \sim 5 \times 10^8$Hz 时, 等离子体电离阻抗理论计算值与实验测量值的数量级和变化趋势还是一致的. 此处, 假设的密度值与用微波透射法或光谱分析法测量本实验系统得到的等离子体密度值接近. 但注意到实际表面波激发柱型等离子体密度包含轴向不均匀分布和径向不均匀分布, 而本文计算模型中假定了等离子体密度是均匀分布的, 且把等离子体视为一种介质材料类比于金属进行计算, 这些都会给等离子体参数的诊断带来偏差.

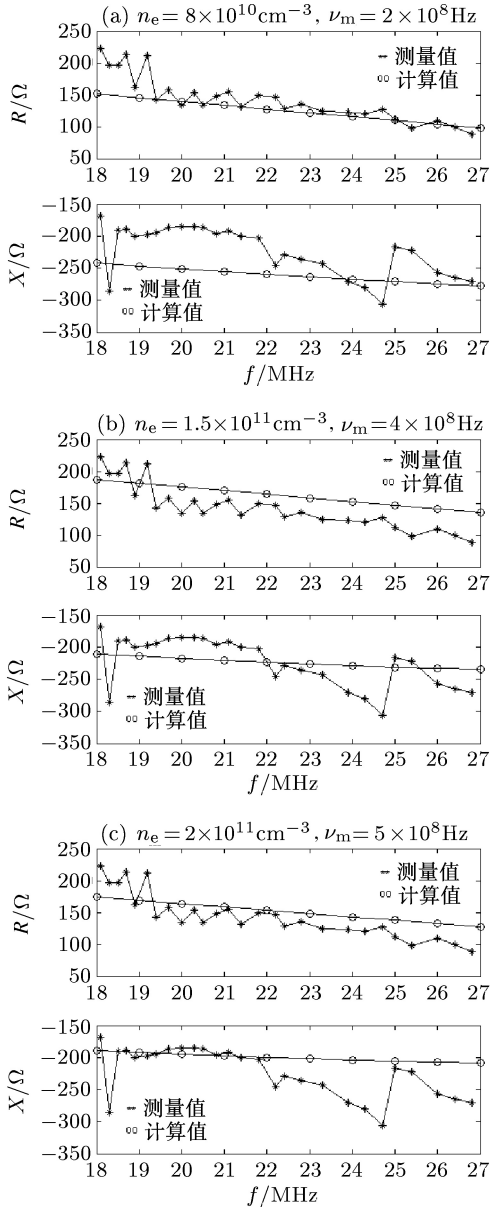


图 5　不同等离子体密度、碰撞频率条件下柱形等离子体电离电阻 (R) 和电抗 (X) 随频率 (f) 变化的测量值与计算值

Fig.5　Calculated dates and experimental result of plasma column discharge resistance R and reactance X response with frequency f in various plasma density and collision frequency

6 结论

表面波激发柱形等离子体电离阻抗的测量与分析，对于等离子体源的设计优化及等离子体参数的初步诊断有重要意义. 本文给出了一定频段下，等离子体电离阻抗的一种研究方法，将为进一步深入分析打下基础.

参考文献

[1] Moisan M, Shivarova A, Trivelpiece A W. Experimental investigations of the propagation of the surface wave along a plasma column. *Plasma Phys.*, 1982, **24**(11):1331~1400

[2] Ou Qiongrong, Liang Rongqing. Researches on large area planar plasma excited by surface microwave. *Vacuum Cryog.*, 2002, **8**(1):28~33. in Chinese (欧琼荣, 梁荣庆. 大面积平面表面波等离子体的研究. 真空与低温, 2002, **8**(1):28~33)

[3] Borg G G *et al.* Plasmas as antennas: theory, experiment and applications. *Phys. Plasmas*, 2000, **7**(5):2198~2202

[4] Rayner J P, Whichello A P, Cheetham A D. Physical Characteristics of Plasma Antennas. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2004, **32**(1):269~281

[5] Zhao Guowei, Chen Cheng, Xu Yuemin. Numerical computation analysis on radiation field of the plasma column. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(2):93~98. in Chinese (赵国伟, 陈诚, 徐跃民. 空间科学学报. 2005, **25**(2):93~98)

[6] Zhao Guowei, Xu Yuemin, Chen Cheng. Numerical calculation of radiation pattern and impedance of column plasma. *Acta Phys. Sin.*, 2006, **55**(7):3458~3463. in Chinese (赵国伟, 徐跃民, 陈诚. 物理学报, 2006, **55**(7):3458~3463)

[7] Lister G G, Li Y M, Godyak V A. Electrical conductivity in high-frequency plasmas. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(12):8993~8997

[8] Leon P B *et al.* RF discharge impedance measurements using a new method to determine the stray impedances. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1999, **27**(3):759~765

[9] Logan J S *et al.* Electrical characterization of radio-frequency sputtering gas discharge. *J. Vacuum Sci. Tech.*, 1968, **6**(1):120~123

[10] Demokan O. Critical analysis of matching schemes in capacitively coupled discharges. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2003, **31**(5):1100~1102

[11] Huang Jianjun *et al.* Plasma diagnosis of RF discharge by using impedance measurement. *Acta Phys. Sin.*, 2001, **50**(12):2403~2405. in Chinese (黄建军等. 射频放电阻抗测量用于等离子体诊断研究. 物理学报, 2001, **50**(12):2403~2405)