第21卷 第3期 空 间 科 学 学 报 Vol.21, No.3
2001 年 7月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE July, 2001

地面实验室模拟空间等离子体环境的初步测试

庞永江 徐跃民
(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

空间等离子体和航天器的相互作用对航天器的安全有重要影响，利用空间实验来研究这些作用的代价很大，可以通过在地面实验室中模拟空间等离子体环境来低成本地研究这些相互作用. 本研究通过使用 ECR 等离子体源期望在地面实验室来近似模拟空间等离子体环境，通过初步测量，我们得到了一个比较均匀的等离子体环境.

关键词 空间等离子体环境— ECR —等离子体源

1 引 言

关于航天材料在等离子体环境中的性质，以及等离子体和航天器之间相互作用的研究在国外已经开展了很长时间 [1,2]. 这些研究既有实际在航天器轨道上进行的材料长期暴露实验 [3,4], 又有在地面实验室的模拟环境中所做的实验研究 [8−11] 以及一些机理探讨 [5−7]. 根据这些研究结果，国外也建立了关于这些相互作用的理论模型，由此来预测不同材料、不同结构的航天器在空间等离子体环境中的表现. 这些实验研究对空间等离子体与航天器相互作用所造成的危害，如等离子体造成航天器表面带电不均匀而引起放电、太阳电池阵在等离子体中的功率损耗、等离子体影响有效载荷正常工作和等离子体鞘层影响航天器的通信、材料在空间环境中的性质变化及特点，给出了定量和定性的实验分析研究，为航天器安全、可靠的运行提供了充分的实验结果和理论依据.

空间飞行实验的代价是很昂贵的，因此在地面实验室模拟环境中进行这样的研究就很有必要. 本文所介绍的地面实验室模拟空间等离子体环境就是为开展这样的研究所研制的.

2 装置介绍

实验装置的结构如图 1 所示. 该设计在大型无油真空室 (长 2.4 m 、直径 1 m) 的一端安置一个微波 ECR 等离子体源，将频率为 2.45 GHz 的微波经石英玻璃窗注入到等离子体谐振腔，在 875 Gs 磁场的作用下，电子在磁场中的回旋频率与微波频率相同而发生回旋共振，吸收能量，使得工作气体电离而形成等离子体. 等离子体漂移至整个真空室形成所需要的等离子体环境.

2001-01-09 收到原稿， 2001-05-10 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

真空系统是进行实验室模拟空间等离子体环境的主体设备，该装置中的真空室直径 1 m, 长 2.4 m. 由两台抽速为 30 L/min 的机械泵、一台抽速 150 L/min 的罗茨泵、两台抽速为 1 200 L/min 的分子泵和两台抽速为 1 200 L/min 的溅射离子泵来实现真空的获得. 在无烘烤时，依次启动各级真空泵后，真空室空载压强可达 8×10^{-5} Pa. 真空室内放入被检测仪器、导线和实验平台后，真空室压强仍然可以达到 2×10^{-4} Pa, 完全可以满足模拟空间环境对真空压强的要求.

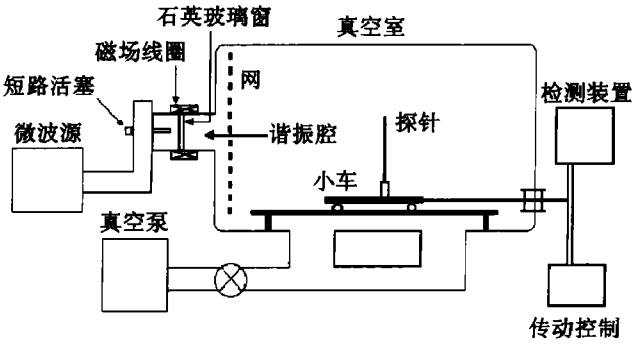


图 1 实验装置结构
Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

设计中采用微波 ECR 等离子体源是因为这种等离子体源具有稳定性好、寿命长、适用气体多 (氩、氮、氦、氢等)、可工作气压范围大 (从约 6×10^{-3} Pa 到一个大气压) 等特点, 适合空间实验长时间的要求. 装置中的微波源采用由成都电子科技大学生产的 MPG-20lOC 计算机程控微波源. 该微波源采用单片机程序控制, 通过控制箱面板参数设置后, 全部控制由单片机完成, 控制的精度较高、稳定性好、操作简单. 该微波源输出功率在 300 W 到 1 000 W 之间可调, 且配有标准的 RS232C 串行接口, 方便与计算机连接. 使用中可以通过手动或者由计算机控制该微波源和外部应用系统的工作.

等离子体参数的测量采用直径 4 mm、长 120 mm 的柱形朗探针. 探针架设在可移动的平台上, 由传动控制装置来控制探针的前后移动和转动来实现对等离子体分布的测量. 数据的采集则使用一台 Tektronix TDS684B 高性能示波器, 频带宽 1 GHz、采样速率 5 GHz. 该示波器可以直接采集数据, 也可以通过计算机接口来实现对数据的采集.

由 ECR 等离子体的特性可以知道 [14], 微波 ECR 等离子体温度一般为 10 eV 左右, 密度一般在 $10^{11}/\mathrm{cm}^3$ 左右, 而低地球轨道空间等离子体的温度一般在 1 eV 左右 (极区多在 10^2—10^3 eV), 密度为 10^3—$10^7/\mathrm{cm}^3$. 因此要实现模拟空间等离子体环境, 需要将等离子体的温度和密度降到与空间等离子体参数接近的范围内, 所以在装置上要做一些调整. 在该设计中, 在真空系统内、距谐振腔出口 30 cm 处加上一张或者两张 ϕ70 cm、可以加不同电位的栅网. 通过调整栅网的目数和所加电位来实现对等离子体参数的调整.

3 测试结果

测试的微波源功率为 300 W；产生等离子体所使用的工作气体为氩 (Ar) 气；朗缪探

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

针的扫描电压通过一台在 ±80 V 内可调的扫描电源来提供; 利用 Tektronics 公司的 TDS684B 示波器采集数据，得到扫描电压的数据以及探针的电流曲线.

利用公式

$$T_{\mathrm{e}} = \left(\frac{\mathrm{d}\ln I}{\mathrm{d}V}\right)^{-1}, \tag{1}$$

可得到等离子体的电子温度. I 为探针电流, V 为所加扫描电压.

利用公式

$$I_{\mathrm{i0}} = 8 \times 10^{-11} \times n_{\mathrm{i}} \times A \times \left(\frac{T_{\mathrm{e}}}{\mu}\right)^{1/2}. \tag{2}$$

和由公式 (1) 得到的电子温度可以得到相应的离子密度.

I_{i0} 为探针饱和离子电流，单位为 mA; n_{i} 为离子密度，单位为 cm^{-3}; A 为探针收集面积，单位为 cm^2; μ 为离子质量.

图 2, 图 3 是沿真空室轴向所测到的离子密度和电子温度的分布. 注气后真空室压强为 4.5×10^{-2} Pa, 注气量为 13 sccm(Standard Cubic Centimeter per Minute).

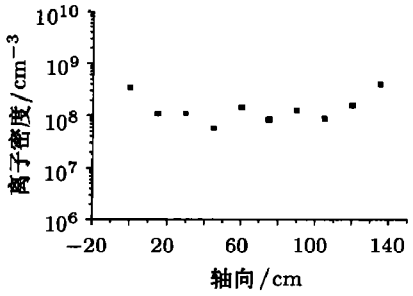


图 2　真空室内轴向 140 cm 范围内的离子密度分布

Fig.2　Distribution of ion density along the axis

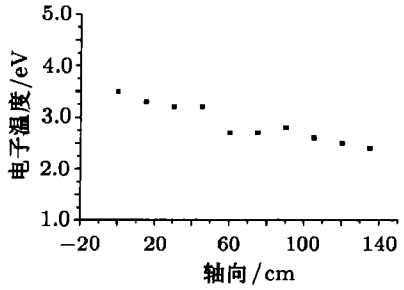


图 3　真空室内轴向 140 cm 范围内的电子温度分布

Fig.3　Distribution of electron temperature along the axis

从测试结果看，在真空系统中沿轴向形成了一个大约 80 cm 范围 (40—120 cm) 的一个较均匀的区域. 在这个较均匀区域，电子温度约为 2.5 eV, 离子密度约为 $1 \times 10^8\,\mathrm{cm}^{-3}$.

图 4 和图 5 、图 6 和图 7 分别是在 100 cm, 120 cm 处测得的等离子体离子密度、电子温度的径向分布. 注气后真空系统压强为 4×10^{-2} Pa, 注气量为 13 sccm.

从径向的测试结果可以知道，真空室内等离子体电子温度、离子密度在径向的分布也是比较均匀的，而且均匀范围也比较大，约中心轴两侧 30 cm. 100 cm 处电子温度平均约为 2.3 eV, 离子密度约为 $3 \times 10^7\mathrm{cm}^{-3}$; 120 cm 处电子温度平均约为 2.4 eV, 离子密度约为 $3 \times 10^7\mathrm{cm}^{-3}$.

图 8 所表示的是对等离子体分布在较长时间内稳定性的测试结果. 注气后真空室压强为 4.2×10^{-2} Pa, 注气量为 13 sccm. 测试结果表明所得到的空间等离子体在时间上也是比较稳定，平均电子温度约 2.5 eV, 平均离子密度约为 2×10^8 相对偏差小于 6%.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

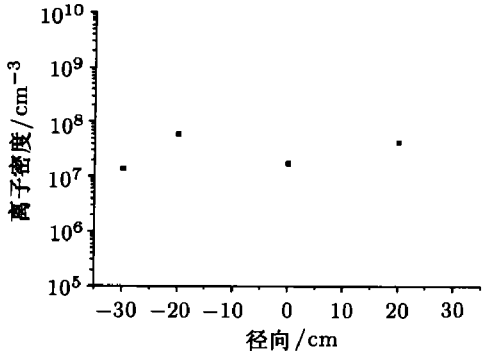


图 4 距 ECR 源 100 cm 处，径向离子密度分布

Fig.4 Distribution of ion density along the radius, 100 cm from ECR

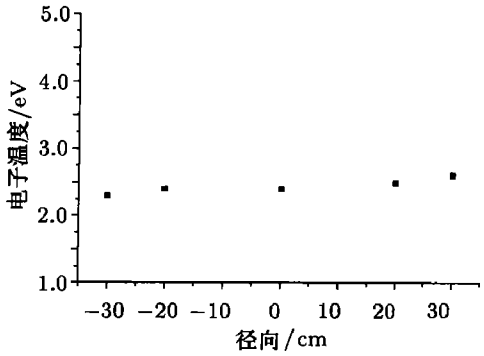


图 5 距 ECR 源 100 cm 处，径向电子温度分布

Fig.5 Distribution of electron temperature along the radius, 100 cm from ECR

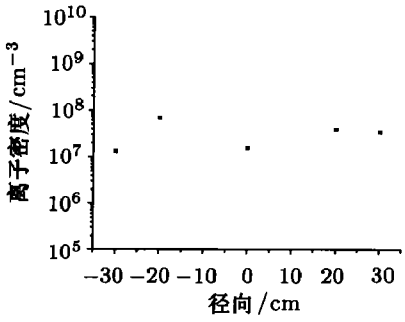


图 6 距 ECR 源 120 cm 处，径向离子密度分布

Fig.6 Distribution of ion density along the radius, 120 cm from ECR

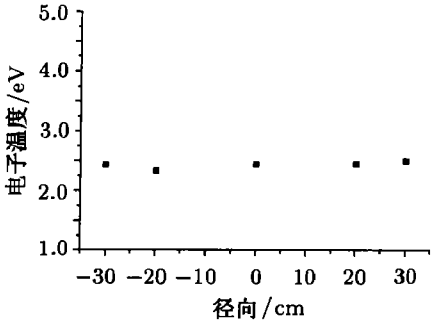


图 7 距 ECR 源 120 cm 处，径向电子温度分布

Fig.7 Distribution of electron temperature along the radius, 120 cm from ECR

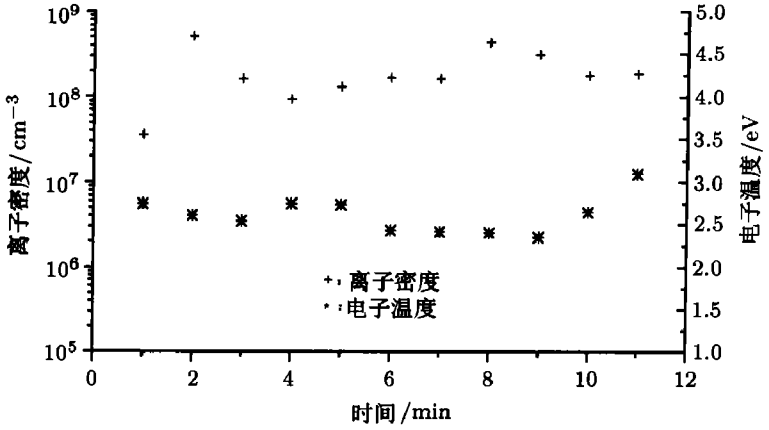


图 8 连续 11 min 测量的等离子体离子密度和电子温度的时间分布

Fig.8 The variation of parameters during 11 minutes

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

4　测试结果的分析和讨论

从测试结果来看，等离子体在真空室中的分布是比较均匀和稳定的. 沿轴向在约 ϕ60 cm ×80 cm 的范围内形成一个电子温度为 2.5 eV，离子密度为 $1\times10^{8}\,\mathrm{cm}^{-3}$ 的较均匀的等离子体区域. 但是，我们也看到，这个区域的等离子体电子温度和密度要比模拟的空间等离子体电子温度和密度略高，接近实际空间等离子参数的上限.

栅网目数的大小对等离子体温度和密度的影响是很明显的，如图 9 所示 [13]，图中的曲线从上到下依次对应的栅网目数递增. 在测试中所使用栅网的目数比较小，为 14 目 (注：网格数 / 英寸). 这个目数的栅网对等离子体温度、密度的影响比较小. 如果采用更密的栅网，并在栅网上加合适的电位，真空室中等离子体参数进一步降低是完全可行的. 同时，在实际使用中，可以根据实验需要来改变栅网上的电位来适当调节通过栅网后等离子体的参数. 这个性质对于模拟不同参数的等离子体环境是很方便的. 另外我们使用的朗缪探针尺寸比较大，空间分辨率不够高，这些都是要进一步改善的地方.

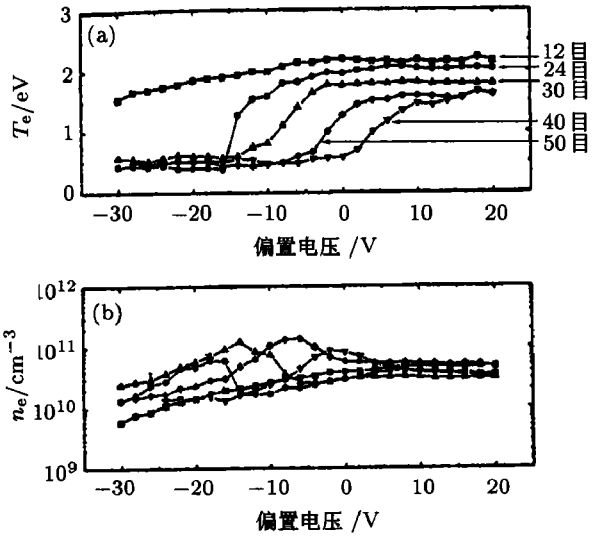


图 9　不同目数的栅网在加不同电压的情况下对等离子体离子密度和电子温度的影响

Fig.9　The influence of different biased grid on plasma parameter

根据以往关于航天器和空间等离子体相互作用的一些研究结论 [1]，空间等离子体和航天器的相互作用按照等离子体德拜半径与航天器特征尺寸的相对大小可以分为薄壳层和厚壳层两种模式. 在 LEO 环境中，主要是薄壳层模式在起作用 [1,2].根据德拜半径公式 $\lambda_{\mathrm{D}}=\left(\frac{\varepsilon_0 kT_{\mathrm{e}}}{n_{\mathrm{e}}e^2}\right)^{1/2}$，可以估计出在我们的真空系统中等离子体的德拜半径约为 1×10^{-3} m,已经满足薄壳层模式中等离子体德拜半径小于航天器特征尺寸的要求，所得到的等离子体环境与实验材料相互作用的机理与实际空间环境中相互作用的机理是相同的. 因此在所得到的等离子体环境中研究航天器或者航天材料与等离子体相互作用的性质是可以反映这些相互作用的真实性质的.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

在地面实验室中完全模拟空间等离子体环境是不可能的，我们只能近似地模拟. 只要在我们的模拟环境中产生的等离子体与航天器以及航天材料相互作用的机理与真实环境中它们之间相互作用的机理相同、结果相似，能反应材料以及相互作用过程的真实性质，这个等离子体环境对于我们研究这些过程就是有很大帮助的.

参 考 文 献

[1] Barrett H B. The charging of spacecraft surfaces. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1981, **19**(4):577—616

[2] Hastings D E. A review of plasma interactions with spacecraft in low earth orbit. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(A8):14 457—14 483

[3] James B F *et al.* The Natural Space Environment: Effects on Spacecraft. NASA RP 1350, 1994

[4] Herr J L, McCollum M B. Spacecraft Environments Interactions: Protecting Against the Effects of Spacecraft Charging. NASA RP 1354, 1994

[5] Hitoshi Kuninaka, Kyoichi Kuriki. Numerical analysis of interaction of a high-Voltage solar array with ionospheric plasma. *J. Spacecraft*, 1987, **24**(6):512—518

[6] Mengu Cho, Daniel Hastings. Dielectric Charging Processes and Arcing Rates of high Voltage Solar Array, AIAA-91-0605

[7] Heinz Thiemann. Computer experiments on arcing processes as observed in ground tests. *J. Spacecraft*, 1994, **31**(6):929—936

[8] Heinz Thiemann, Klaus-Peter Bogus. High-Voltage solar cell modules in simulated low-earth-orbit plasma. *J. Spacecraft*, 1988, **25**(4):278—285

[9] Upschule B L *et al.* Arcing of Negatively Biased Solar Cells in Low Earth Orbit. AIAA 92-0578

[10] Carruth M R *et al.* Experimental Studies on Spacecraft Arcing. AIAA 92-0820

[11] Daniel Hastings, Mengu Cho, Hitoshi Kuninaka. Arcing rates for high voltage solar arrays: theory, experiment, and predictions. *J. Spacecraft*, 1992, **29**(4):538—554

[12] David N *et al.* A tunable microwave plasma source for space plasma simulation experiments. *Rev. Sci. Inst.*, 1994, **65**(3):661—668

[13] Hong J I *et al.* Electron temperature control with grid bias in inductively coupled argon plasma. *Phys. Plasma*, 1999, **6**(3):1 017—1 028

[14] Popov O A. Characteristics of electron cyclotron resonance plasma sources. *J. Vac. Tech.*, 1989, A**7**(3):894—898

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

THE MEASUREMENT OF A SIMULATED OUTER SPACE PLASMA ENVIRONMENT IN GROUND LAB

PANG Yongjiang XU Yuemin

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

Abstract

The interaction between spacecraft and space plasma is important to the spacecraft's and its facilities' safety. But it is expensive and time-consuming to do experiments in outer space. In order to do such research in ground laboratory, a simulated space plasma environment is required to be set up. By using an ECR plasma resource and other facilities, an uniform plasma environment is obtained in a vacuum chamber.

Key words Space plasma environment, ECR, Plasma source

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com