

# 大面积等离子体片密度分布分析

丁亮<sup>†</sup> 霍文青 杨新杰 徐跃民

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

(2011年9月20日收到; 2011年10月11日收到修改稿)

利用空心阴极放电产生了尺寸为  $60\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 2\text{ cm}$  的大面积等离子体面. 在实验室条件下对大面积等离子体片的密度分布进行了测量. 由于高压放电脉冲脉宽较短, 实验中改变了测量方法, 同时, 在中等磁场影响下, 为了得到真实的等离子体密度, 进行了必要的数值修正. 在放电电流为  $1\text{--}6\text{ A}$  时, 测量了二维的电子密度分布. 另外, 测量并讨论了其他环境参数对等离子体密度的影响. 电子密度的分布情况对与微波波束切换相当重要. 由空心阴极增强型放电产生的大面积等离子体面具有反射 X 波段 ( $8\text{--}12\text{ GHz}$ ) 微波需要的足够稠密的电子密度和足够均匀的密度分布, 这是等离子体面在雷达系统中取代金属面板的有利条件.

**关键词:** 等离子体密度分布, 大面积等离子体面, 郎缪尔探针阵列

**PACS:** 52.70.Nc, 52.80.Vp, 52.77.Fv

## 1 引言

具有足够密度的大面积稠密等离子体面能够像金属面一样用来反射微波波束<sup>[1,2]</sup>. Manhermer<sup>[1]</sup>认为这种优点能够在等离子体镜面上得到应用, 并很可能在雷达系统中替代金属反射面. 在产生大面积稠密等离子体面方面, 国内外已经进行了大量的工作. 宽带的大面积等离子体面微波切换特性吸引了大量的关注<sup>[2]</sup>. 当微波频率低于等离子体频率时, 微波将在等离子体界面实现反射. 微波频率与等离子体临界密度的关系为<sup>[3]</sup>

$$\nu_p = 9 \times 10^3 n_e^{1/2}, \quad (1)$$

其中  $n_e$  为电子密度. 线型空心阴极能够产生密度足够大的等离子体面, 同时, 其所产生的等离子体面可适用于更宽的频带. 相对于目前考虑的金属面, 等离子体面在相控阵雷达中的应用更具优势.

微波工作频率为  $10.5\text{ GHz}$ , 垂直入射条件下, 为了反射这个频率的微波, 需要等离子体的密度达到  $1.4 \times 10^{12}\text{ cm}^{-3}$ . 同时, 等离子体面密度分布的均匀程度对于微波反射非常关键, 过大的密度梯度

会使微波反射信号减弱. 通常, 研究过程中将等离子体面中心点密度作为整体等离子体面密度, 但是对等离子体面密度分布的分析相对较少. 本文用空心阴极的增强型放电形成了大面积等离子体面, 并通过朗缪尔探针阵列测得了等离子体电子密度分布. 结果显示, 在增强型放电模式下, 等离子体密度足够反射 X 波段的微波, 另外, 由于所产生的等离子体水平方向和纵向的密度分布均匀, 反射信号并不会被衰减.

## 2 实验装置及测试方法

大面积等离子体面的产生和测试装置如图 1 所示. 国内外的基本在类似的装置中进行<sup>[2-7]</sup>. 本文实验中产生的等离子体面大小为  $60\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ . 高压脉冲信号频率为  $100\text{ Hz}$ , 脉宽  $100\text{ }\mu\text{s}$ . 当放电电压达到数  $\text{kV}$ , 增强型放电的大面积等离子体面在  $10\text{ }\mu\text{s}$  内形成.

朗缪尔探针广泛应用于等离子体参数诊断. 实验中设计的单个朗缪尔探针为半径  $1\text{ mm}$ , 长度  $5\text{ mm}$  的钨圆柱体. 由于放电脉冲宽度很小, 扫描

<sup>†</sup> E-mail: dingliangofustc@sohu.com

电压无法在一个放电脉冲内实现扫描过程. 因此, 采用信号发生器和功率放大器配合组成电压扫描装置. 一个放电脉冲给定一个扫描电压, 单个放电

脉冲内电压保持稳定. 整个电压扫描过程在信号发生器的一次三角波周期内完成.

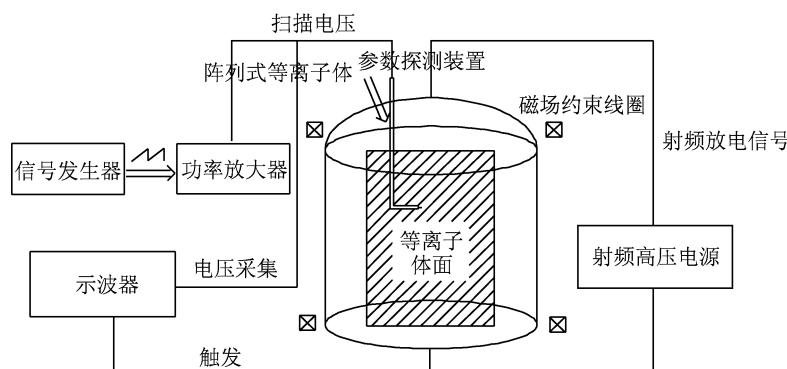


图1 大面积等离子体面产生和参数测试装置图

基于电流电压 ( $I$ - $V$ ) 曲线、磁场强度、放电气压, 通过参数修正, 得到了等离子体面密度的实际值. 磁场强度为 220 Gs ( $1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$ ), 电子回旋半径, 离子回旋半径和探针尺寸需满足

$$r_{ce} \ll a \ll r_{ci}, \quad (2)$$

其中  $r_{ce}$ ,  $r_{ci}$  和  $a$  分别为电子回旋半径, 离子回旋半径和探针尺寸. 这样的参数状态, 满足中等磁场修正条件, 电子饱和流缩小. 因此, 只有通过参数修正才能获得电子密度的真实值<sup>[8,9]</sup>. 修正的电子饱和流关系式为

$$I = \frac{Ne\bar{v}S}{4}R, \quad (3)$$

其中  $I$  为电子饱和电流,  $N$  为电子密度,  $e$  为电子电荷,  $\bar{v}$  为电子平均速度,  $S$  为探针鞘层面积,  $R = \frac{4\lambda}{3a}\sqrt{\alpha}$  为修正因子,  $\lambda$  为平均自由程,  $\sqrt{\alpha} = \sqrt{D_{\perp}/D}$  为磁场修正项,  $D_{\perp} = \frac{D}{1 + \omega^2\tau^2}$  为垂直磁场扩散系数,  $D$  为平行磁场扩散系数,  $\omega$  为等离子体频率,  $\tau$  为碰撞频率. 电子平均自由程与气压的关系为  $\lambda = 4.40/p$ . 当  $p = 160 \text{ Pa}$  时,  $\lambda = 2.75 \times 10^{-4} \text{ m}$ . 电子与中性粒子的碰撞频率为

$$\nu = 1/\tau = 1.52 \times 10^7 p \sqrt{T_e}, \quad (4)$$

其中  $T_e$  为电子温度, 以 eV 为单位. 因此, 对电子饱和流的修正能够通过这样的推导关系得出, 通过 (3) 式可以算出修正后的电子密度.

为了得到等离子体面密度的二维密度分布, 本文设计制作了可移动的朗缪尔探针阵列. 相邻探针

水平相距为 10 cm, 步进电机能够精确控制探针阵列的纵向位置, 纵向测量步长为 4 cm. 总计 84 个测量点为分析二维密度分布提供了依据, 并说明了等离子体面的整体均匀性. 通过固定探针点位置的 5 次重复放电测量, 分析得到了数据采集过程中的测量误差, 以等离子体面中心点位置为例, 5 次测量结果显示数据误差为 5.4%, 满足等离子体测量参数的分析要求.

### 3 数据分析

图 2 给出了放电电流为 1 A, 放电气压为 160 Pa 时的等离子体电子密度分布. 其中, 阳极位于纵轴较暗位置, 阴极位于较亮的位置. 水平方向密度分布均匀, 纵向电子密度从阳极向阴极增大. 本文实验过程中, 由于电子能量的损耗, 能够被电离的中性粒子数量下降<sup>[7,10]</sup>, 电子密度从  $1.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  (距阳极 8 cm) 下降至  $4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  (10 cm 至阴极). 图 3 为图 2 的二维视图, 等离子体面的均匀性更加清晰.

另外, 本文测量了在其他放电电流下的电子密度分布并在图 4 中进行了说明. 由图 4 可知, 电子密度分布在不同放电电流条件下具有与放电电流为 1 A 时一样的分布特性. 尽管纵向电子密度分布具有一定的梯度, 由于梯度很小, 对于微波反射要求是可以接受的<sup>[11]</sup>. 为了更直观说明纵向电子密度分布随着放电电流的变化, 本文提取了中心位置纵向电子密度并在图 5 中进行了说明.

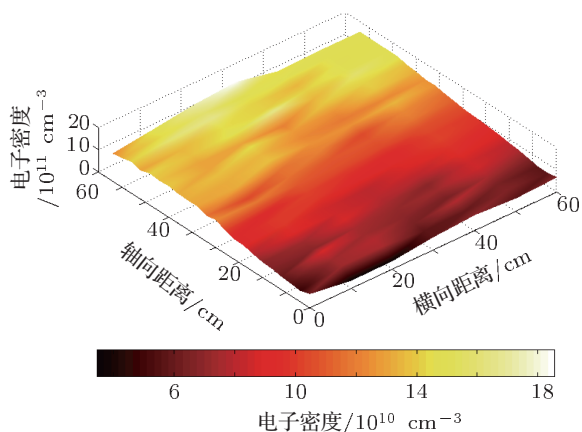


图2 放电电流为 1 A, 放电气压为 160 Pa 时等离子体二维密度分布图

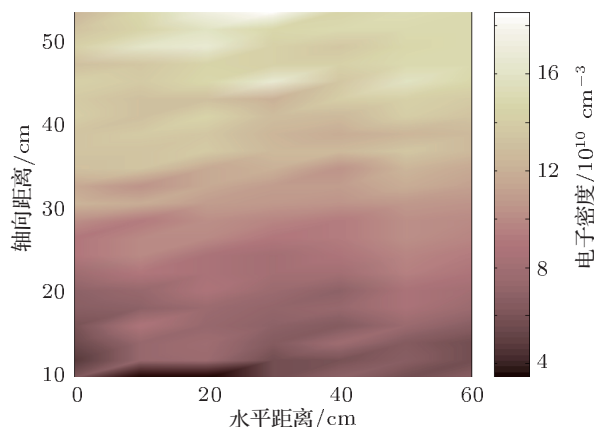


图3 放电电流为 1 A, 放电气压为 160 Pa 时电子密度分布二维图

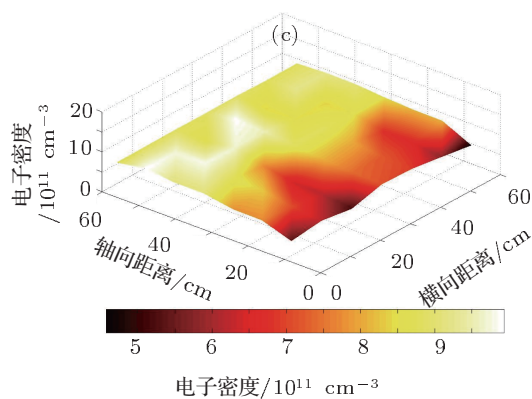
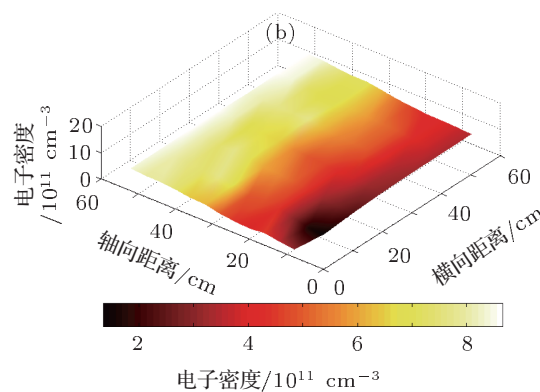
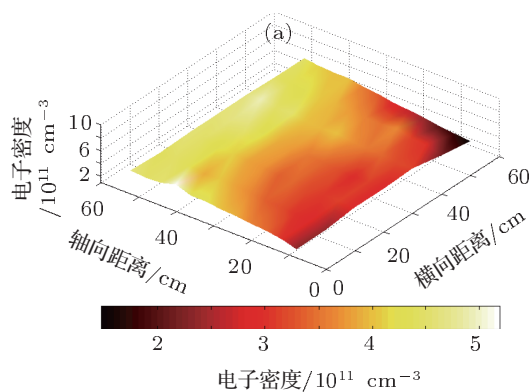


图4 不同放电电流时的电子密度分布图 (a) 2 A; (b) 4 A; (c) 5 A

由图 5 可知, 等离子体面中心位置电子密度从阳极向阴极缓慢增加. 当放电电流为 1—6 A 时, 中心位置电子密度分别为  $1.4 \times 10^{11}$ ,  $3.2 \times 10^{11}$ ,  $3.7 \times 10^{11}$ ,  $5 \times 10^{11}$ ,  $8.5 \times 10^{11}$  和  $9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ . 这

样的电子密度对于  $45^\circ$  角入射的 X 波段微波反射是充分的.

由于空心阴极是均匀放电, 空心阴极内电场相同, 因此, 电子密度在水平方向均匀, 如图 6 所示.

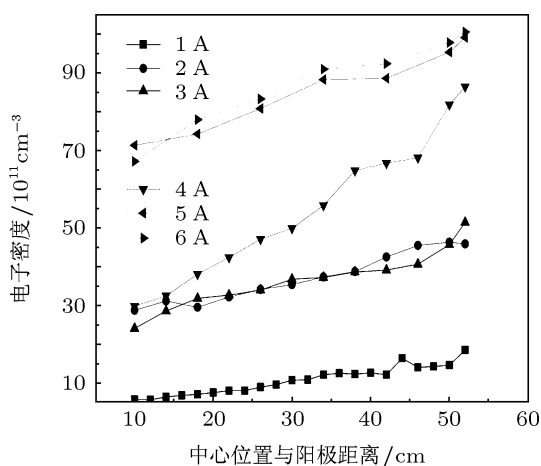


图5 中心位置轴向电子密度分布随着放电电流变化图

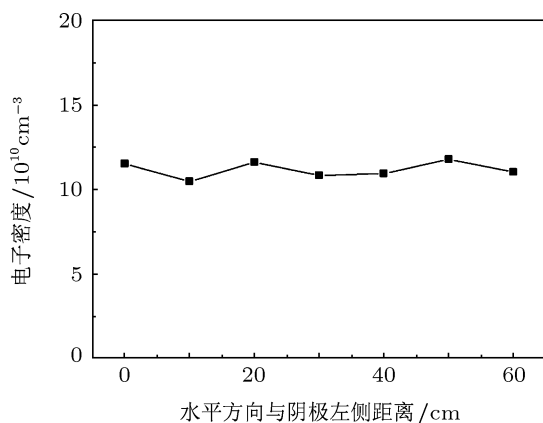


图6 水平方向电子密度分布图

为了找出电子密度与约束磁场强度之间的关系, 实验中改变了亥姆霍兹线圈中电流的大小, 并对电子密度进行了测量. 磁场线圈电流从 8 A 上升至 18 A 过程中, 电子密度没有明显变化, 如图 7 所示. 尽管磁场强度对电子密度没有明显影响, 8 A 的

磁场线圈电流在维持电子运动方向时非常必要, 否则等离子体面无法形成. 实验中发现, 只需磁场达到 100 Gs 或以上, 等离子体面均匀性就能够得到保持.

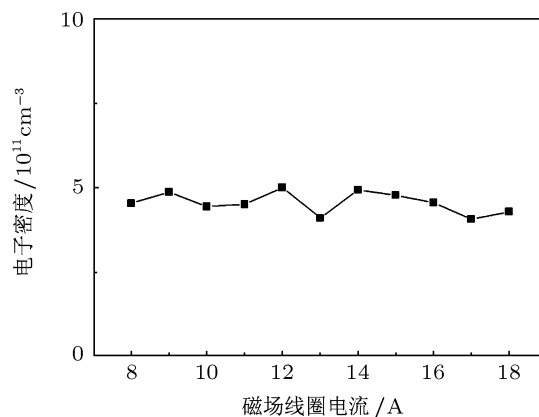


图7 电子密度随磁场变化图

## 4 结论

在实验中设计产生了  $60\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 2\text{ cm}$  大小的等离子体面, 并绘制了电子密度分布的二维图. 分析讨论了在中等磁场条件下电子密度的修正项, 计算得到了电子密度的真实值. 等离子体面电子密度随着放电电流的变化而不同, 同时, 在调整磁场大小后得到了电子密度受磁场影响不大的结论. 等离子体面二维密度分析中, 发现电子密度在水平方向保持均匀, 纵向密度从阳极向阴极以较小梯度逐渐增加. 在空心阴极增强型放电模式下, 电子密度足够反射 X 波段微波. 因此, 大面积等离子体面具有与金属面相同的反射微波特性, 并以出色的宽带特性能够在相控阵雷达系统中取代金属面作为波束切换部分.

[1] Manheimer W M 1991 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **19** 1228  
 [2] Mathew J, Meger R A, Gregor J A, Pechacek R E, Fernsler R F, Manheimer W M 1999 *International Radar Conference* New Jersey, USA, May 8-11, 1995 p742  
 [3] Mathew J, Fernsler R F, Meger R A, Gregor J A, Murphy D P, Pechacek R E, Manheimer W M 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 1982  
 [4] Meger R A, Mathew J, Gregor J A, Pechacek R E, Fernsler R F, Manheimer W M, Robson A E 1995 *Phys. Plasmas* **2** 2532  
 [5] Robson A E, Morgan R L, Meger R A 1992 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **20** 1036  
 [6] Gregor J A, Fernsler R F, Meger R A 2003 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **31** 1305  
 [7] Murphy D P, Fernsler R F, Pechacek R E, Meger R A 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 436  
 [8] Huddleston R H, Leonard S L 1965 *Plasma Diagnostic Techniques* (New York: Academic Press) p168  
 [9] Hutchinson I H 2002 *Principles of Plasma Diagnostic* (2nd Ed.) (Cambridge: Cambridge University Press) p81  
 [10] Wu Z Y, Yang Y T, Wang J Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1890 (in Chinese) [吴振宇, 杨银堂, 汪家友 2010 物理学报 **59** 1890]  
 [11] Wan J, Jia X H, Yang J H, Wang S G 2010 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 2006

# Density distribution of large planar plasma sheet

Ding Liang<sup>†</sup> Huo Wen-Qing Yang Xin-Jie Xu Yue-Min

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 20 September 2011; revised manuscript received 11 October 2011)

## Abstract

A large plasma sheet with a size of  $60\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 2\text{ cm}$  is generated in an apparatus with a hollow cathode. The electron density distribution of the large area plasma sheet is measured. Since the duration of high voltage pulse is short, we change measurement methods. Besides, modification is used for electron saturation current to get the real density. The two-dimensional electron density and electrical field distribution are calculated at discharge currents ranging from 1 to 6 A. Meanwhile we discuss other parameters related to density distribution. The electron density distribution is important for plasma sheet to steer microwave. It is encouraging that the large area plasma sheet generated by the hollow cathode is uniform and has sufficient electron density to reflect X-band (8–12 GHz) microwaves.

**Keywords:** plasma density distribution, plasma sheet, Langmuir probe array

**PACS:** 52.70.Nc, 52.80.Vp, 52.77.Fv

---

<sup>†</sup> E-mail: dingliangofustc@sohu.com