

电子回旋共振等离子体密度均匀性的数值研究

高碧荣 刘悦[†]

(大连理工大学物理与光电工程学院, 大连 116024)

(2010年4月22日收到; 2010年6月24日收到修改稿)

基于漂移扩散近似, 在轴对称假设下, 对电子回旋共振等离子体源腔室内的等离子体建立了二维流体模型. 采用有限差分法对所建立的模型进行了自治数值模拟, 得到了等离子体密度均匀性随时间演化的数值结果. 通过对数值结果的分析, 研究了背景气体压强、微波功率和磁场线圈电流对等离子体密度均匀性的影响. 研究表明, 在电离初期, 电子密度的均匀性好于离子密度的均匀性. 在电离后期, 离子密度的均匀性好于电子密度的均匀性. 随着背景气体压强的增大, 电子密度和离子密度的均匀性都在增加, 且离子密度的均匀性增加的更快. 随着微波功率的增大, 电子密度和离子密度的均匀性几乎以相同的速率在增加. 随着磁场线圈电流的增大, 电子密度和离子密度的均匀性几乎以相同的速率在增加. 但是, 当磁场线圈电流足够大以后, 电子密度和离子密度的均匀性几乎以相同的速率在减小.

关键词: 等离子体密度均匀性, 背景气体压强, 微波功率, 磁场线圈电流

PACS: 52. 25. Jm, 52. 30. Ex

1. 引言

电子回旋共振放电产生的等离子体被称为电子回旋共振等离子体. 由于这种等离子体具有诸如高密度、高电离度、大体积、均匀、无电极污染、运行气压低、设备简单、参数易于控制等优点, 被广泛应用于材料加工和材料表面改性的许多领域中, 例如等离子体刻蚀、薄膜沉积、表面溅射、表面清洁等^[1,2], 也被应用于磁约束聚变等离子体实验中对等离子体的加热, 如在托卡马克^[3-5]和仿星器^[6]的实验中, 还被应用在新型的航天推进器中. 也正是由于这些特点, 越来越多的研究人员从不同的角度来研究电子回旋共振等离子体.

电子回旋共振等离子体的放电室中, 通常背景气体压强都在零点几帕到几帕的范围内, 采用 2.45 GHz 的微波, 当放电室的磁场达到 0.0875 T 时, 产生电子回旋共振, 使放电室的气体电离, 从而产生等离子体.

由于电子回旋共振等离子体放电的时间尺度大约是几纳秒到十几纳秒, 给实验研究带来了困难, 数值模拟成为研究电子回旋共振等离子体的一

种重要方法, 已经被很多研究者所采用. 1997 年, 宫野等人采用 Monte Carlo 方法模拟了电子回旋共振微波等离子体源中离子的传输过程, 讨论了磁场、气压以及二次电子发射对鞘势的影响^[7]. 2000 年, 刘明海等人采用自治微波功率吸收的二维混合模型, 对电子回旋共振等离子体源中的各种物理参量 (电离速率、等离子体密度、位势、电子温度) 进行数值模拟^[8]. 2002 年, Muta 等人利用流体模型模拟了电子回旋共振等离子体的产生机理^[9]. 2003 年, Muta 等人又研究了电子回旋共振等离子体中电子温度降低的机理^[10].

在应用电子回旋共振等离子体进行材料加工和材料改性中, 密度均匀的等离子体能够提高应用效果和应用效率. 因此, 研究电子回旋共振等离子体密度均匀性有非常重要的理论指导意义. 1999 年, 陈俊芳等人用实验方法诊断了电子回旋共振等离子体增强化学汽相沉积 (ECR-PECVD) 反应室内等离子体密度的均匀性对沉积速率均匀性和薄膜厚度均匀性的重要影响^[11]. 后于 2006 年, 符斯列等人又对发散场下 ECR-PECVD 系统中等离子体的均匀性分布进行了实验上的测量与诊断^[12].

本文在轴对称的假设下, 基于漂移扩散近似,

[†] 通讯联系人, E-mail: liuyue@dlut.edu.cn

对电子回旋共振等离子体源腔室内的等离子体建立了二维流体模型,采用有限差分法对所建立的模型进行了自洽数值模拟,得到了等离子体密度均匀性随时间演化的数值结果.通过对数值结果的分析,研究了背景气体压强、微波功率和磁场线圈电流对等离子体密度均匀性的影响.

2. 电子回旋共振等离子体的数学模型

考虑剖面如图 1 所示的电子回旋共振等离子体源,该等离子体源是一个轴对称系统,主要用于金属材料表面改性.该等离子体源的腔室部分由电离区和材料处理区组成.其中,AB 为微波入口,BC 为电离区器壁,CDEF 为材料处理区器壁.频率为 2.45 GHz 的微波从微波入口处进入等离子体源的电离区中.当磁场线圈通入电流时,可以产生空间磁场.当磁场达到 0.0875 T 的时候,电离区内产生电子回旋共振使气体电离,从而产生等离子体.产生的等离子体进入材料处理区,为金属材料表面改性做准备.其中的工作气体为氩气.

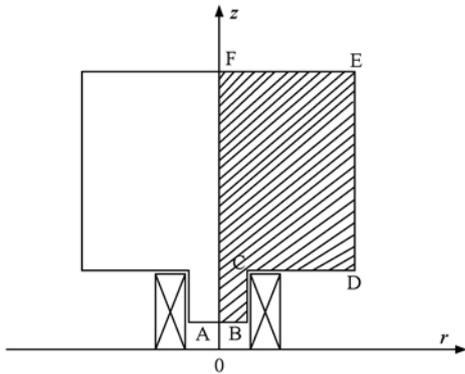


图 1 电子回旋共振等离子体源剖面

$$k_i = \begin{cases} 0, & T_e \leq 5.3, \\ 8.7 \times 10^{-9} (T_e - 5.3) \exp(-4.9 / \sqrt{T_e - 5.3}), & T_e > 5.3, \end{cases} \quad (6)$$

在(6)式中,电子温度 T_e 的单位为 eV,电离系数 k_i 的单位为 cm^{-3} . 电场 \mathbf{E} 可以用电势 V 表示为

$$\mathbf{E} = -\nabla V, \quad (7)$$

电势 V 满足泊松方程为

$$\nabla^2 V = \frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e). \quad (8)$$

电子的能量方程为

图 2 为磁场线圈通入 100 A 电流时等离子体源腔室内磁场的空间分布图.

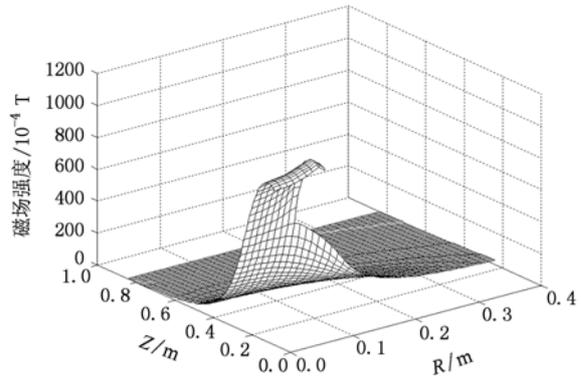


图 2 磁场线圈电流为 $I=100$ A 时的磁场

等离子体源腔室内的等离子体可以用漂移扩散模型表示^[13],电子的质量守恒方程为

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}_e = S, \quad (1)$$

离子的质量守恒方程为

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}_i = S, \quad (2)$$

其中, n_e 和 n_i 分别为电子和离子的数密度, S 为源项, \mathbf{J}_e 和 \mathbf{J}_i 分别为电子和离子的通量,可表示为

$$\mathbf{J}_e = -D_e \nabla n_e - \mu_e n_e \mathbf{E}, \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_i = -D_i \nabla n_i + \mu_i n_i \mathbf{E}, \quad (4)$$

这里, μ_e 和 D_e 分别为电场对电子的迁移率和电子的扩散系数, μ_i 和 D_i 分别为电场对离子的迁移率和离子的扩散系数, \mathbf{E} 为带电粒子产生的电场. S 为源项,在这里,源项中只考虑了电离

$$S = k_i n_n n_e, \quad (5)$$

其中, n_n 为中性气体的数密度, k_i 为电离系数,对于氩气,我们取的电离系数 k_i 为

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_e k T_e \right) + \nabla \cdot \mathbf{q}_e + e \mathbf{J}_e \cdot \nabla V + P_{\text{coll}} = P_{\text{ecr}}, \quad (9)$$

其中, k 为波尔兹曼常数, $-e$ 为电子的电量,电子能量的通量 \mathbf{q}_e 为

$$\mathbf{q}_e = -K_e \nabla T_e + \frac{5}{2} k T_e \mathbf{J}_e, \quad (10)$$

电子的热传导 K_e 为

$$K_e = \frac{3}{2}kD_e n_e. \quad (11)$$

P_{coll} 为电离所导致的电子能量损失, P_{ecr} 为外部微波源对等离子体提供的能量, 采用如下形式^[14]:

$$P_{\text{ecr}} = c \left[1 - \left(\frac{r}{R_0} \right)^2 \right]^2 \left[1 + \left(\frac{B - B_0}{\Delta B} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (12)$$

其中, B 为空间的磁感应强度, $B_0 = 875 \text{ Gs}$, $\Delta B = 25 \text{ Gs}$ ($1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$), 系数 c 由下面的方程确定:

$$P_w = \iiint_v P_{\text{ecr}} dv, \quad (13)$$

其中, P_w 为微波源输入功率.

由于所模拟的区域具有轴对称性, 所以只需考虑如图 1 所示的阴影区域 ABCDEF 即可. 模型的边界条件为

在 AB 边界

$$\frac{\partial n_j}{\partial z} = 0 \quad (j = e, i), \quad \frac{\partial T_e}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial z} = 0.$$

在 BCDEF 边界

$$n_j = n_{jb} \quad (j = e, i), \quad T_e = T_{eb}, \quad V = 0.$$

在 AF 边界

$$\frac{\partial n_j}{\partial r} = 0 \quad (j = e, i), \quad \frac{\partial T_e}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial r} = 0.$$

另外, 在数值模拟的初始时刻 $t = 0$ 时, 我们选取以下初始值: 电势 $V = 0$, 电子温度 $T_e = 1.0 \text{ eV}$, 电子密度、离子密度假设为 $n_e = n_i = n_0 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^2$, 其中, r 在电离区为电离区半径、 R 在材料处理区为材料处理区半径.

3. 数值结果与讨论

我们模拟的电子回旋共振等离子体源腔室, 电离区半径 (AB) 为 0.08 m , 径向长度 (BC) 为 0.16 m , 材料处理区半径 (EF) 为 0.4 m , 径向长度 (DE) 为 0.6 m .

在初始时刻, 我们给定很小的电子密度和离子密度作为“种子”, 对所建立的模型用有限差分法进行了自洽数值模拟, 得到了电子密度、离子密度、电子温度、电势和电场等物理量随时间演化的数值结果. 由于电子回旋共振等离子体的放电时间尺度只有十几纳秒, 所以我们的数值结果都在 50 到 300 ns 范围内.

为了分析等离子体密度均匀性, 给出如下的均匀性定义:

设 $f(x, y)$ 是定义在区域 Ω 上的一个连续正函数, 即在区域 Ω 上 $f(x, y) > 0$, 如果 $f_{\text{max}} =$

$$\max_{(x,y) \in \Omega} f(x,y), \quad f_{\text{min}} = \min_{(x,y) \in \Omega} f(x,y), \quad \text{则 } U = \frac{f_{\text{min}}}{f_{\text{max}}}$$

为函数 $f(x, y)$ 在区域 Ω 上的均匀性.

很容易看出, $0 < U \leq 1$, 当 $U = 1$ 时 $f(x, y)$ 为均匀函数, U 越接近 1 , 函数的均匀性越好.

在背景气体压强为 0.7 Pa , 微波功率为 800 W , 磁场线圈电流为 100 A 的情况下, 计算了电子回旋共振等离子体源腔室中材料处理区中心处等离子体密度均匀性随时间演化的数值结果, 图 3 给出了从 50 到 300 ns 的数值结果.

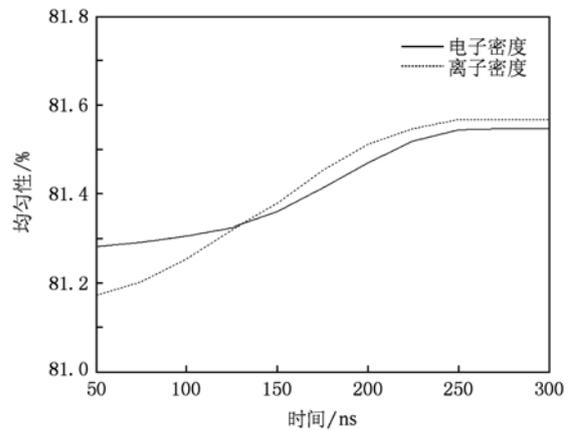


图 3 等离子体密度均匀性随时间的演化

从图 3 中可以看出, 在 50 ns , 电子密度的均匀性比离子密度的均匀性好, 这是因为电子质量比离子质量小很多, 电场引起的电子迁移以及电子扩散更快, 而离子质量比电子质量大很多, 电场所引起的离子迁移以及离子扩散慢很多. 随着时间的增加, 离子密度的均匀性变大, 而电子密度的均匀性变化较小. 这是因为在这个时间尺度下, 电场对离子的迁移开始起作用, 离子也开始扩散. 当离子密度的均匀性接近电子密度的均匀性时, 离子密度的均匀性和电子密度的均匀性同时增加. 当时间超过 130 ns 时, 离子密度的均匀性比电子密度的均匀性好, 同时, 电子密度的均匀性也得到提高, 这是因为此时已经进入离子的时间尺度, 电场对离子的迁移以及离子的扩散已经产生明显效果. 在这个时间尺度, 离子运动的同时, 电子会做出迅速响应. 从 50 到 220 ns , 离子密度的均匀性几乎线性增长. 在这个时间段内, 电离、电场对离子的作用以及离子的扩散等各种效应使离子密度均匀性呈线性增长. 当时间超过 220 ns 时, 电离、电场对离子的作用以及离子

的扩散等各种效应趋向饱和,电子密度均匀性和离子密度均匀性也趋于饱和,从而达到稳态.

图 4 给出了 250 ns 时微波功率为 800 W, 磁场线圈电流为 100 A 电子回旋共振等离子体源腔室中材料处理区中心处等离子体密度均匀性在背景气体压强从 0.1 到 1.0 Pa 变化的数值结果.

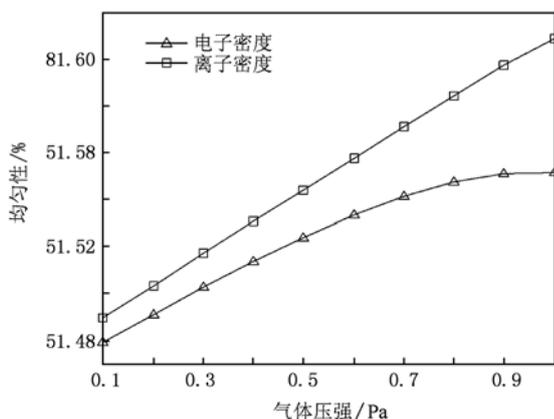


图 4 等离子体密度均匀性随背景气体压强变化

从图 4 中可以看出,在 250 ns,背景气体压强从 0.1 到 1.0 Pa,离子密度的均匀性都比电子密度的均匀性好.随着背景气体压强的增大,电子密度和离子密度的均匀性都在增加,且离子密度的均匀性增加的更快.这是因为随着背景气体压强的增加,电子的平均自由程变小,电子响应离子运动变慢.

图 5 给出了 250 ns 时背景气体压强为 0.7 Pa, 磁场线圈电流为 100 A 电子回旋共振等离子体源腔室中材料处理区中心处等离子体密度均匀性在微波功率从 500 到 1200 W 变化的数值结果.

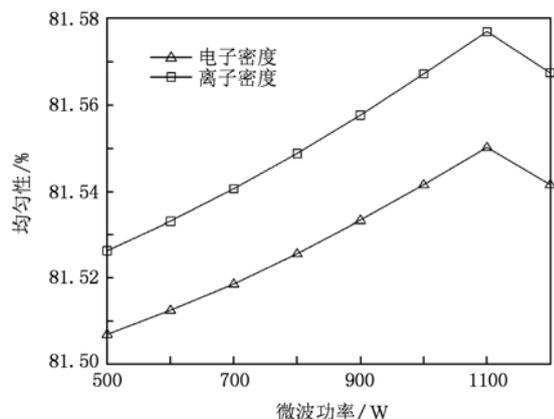


图 5 等离子体密度均匀性随微波功率变化

从图 5 中可以看出,在 250 ns,微波功率从 500 到 1200 W,离子密度的均匀性都比电子密度的均匀

性好.随着微波功率的增大,电子密度和离子密度的均匀性都在增加,电子密度和离子密度均匀性增加的速率几乎相同.

图 6 给出了 250 ns 时背景气体压强为 0.7 Pa, 微波功率为 800 W 电子回旋共振等离子体源腔室中材料处理区中心处等离子体密度均匀性在磁场线圈电流从 80 到 120 A 变化的数值结果.

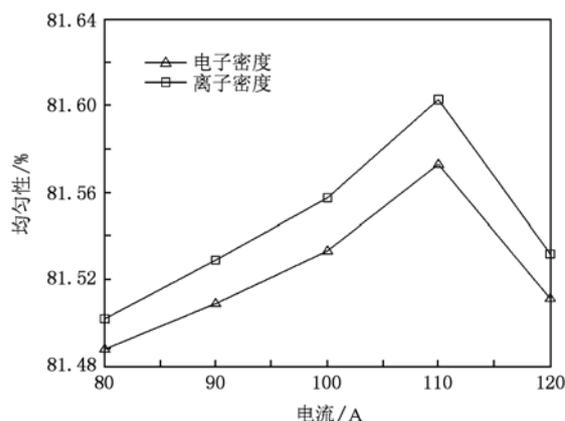


图 6 等离子体密度均匀性随磁场线圈电流变化

从图 6 中可以看出,在 250 ns,磁场线圈电流从 80 到 120 A,离子密度的均匀性都比电子密度的均匀性好.随着磁场线圈电流的增大,电子密度和离子密度的均匀性都在增加,电子密度和离子密度均匀性增加的速率几乎相同.但是,当磁场线圈电流足够大以后,电子密度和离子密度的均匀性都在减小,电子密度和离子密度均匀性减小的速率几乎相同.这是因为当磁场线圈电流足够大以后,电离区域扩大到材料处理区中,影响了等离子体密度的均匀性.

4. 结 论

根据前面对数值结果的讨论,我们得到了如下结论:

1. 在电离初期,电子密度的均匀性好于离子密度的均匀性.随着时间的增加,离子密度的均匀性增加,而电子密度的均匀性增加较小.当离子密度的均匀性接近电子密度的均匀性以后,电子密度的均匀性与离子密度的均匀性同时增加.在电离后期,离子密度的均匀性好于电子密度的均匀性.

2. 在电离后期,在微波功率和磁场线圈电流不变的情况下,随着背景气体压强的增大,电子密度

和离子密度的均匀性都在增加,且离子密度的均匀性增加的更快.

3. 在电离后期,在背景气体压强和磁场线圈电流不变的情况下,随着微波功率的增大,电子密度和离子密度的均匀性都在增加,且电子密度和离子密度均匀性增加的速率几乎相同.

4. 在电离后期,在微波功率和背景气体压强不变的情况下,随着磁场线圈电流的增大,电子密度

和离子密度的均匀性都在增加,且电子密度和离子密度均匀性增加的速率几乎相同.但是,当磁场线圈电流足够大以后,电子密度和离子密度的均匀性都在减小,且电子密度和离子密度均匀性减小的速率几乎相同.

感谢大连理工大学等离子体理论与模拟科技创新团队的各位老师和同学给予的宝贵意见.

-
- [1] Asmussen J 1989 *J. Vac. Sci. Technol. A* **7** 883
- [2] Ning Z Y, Ren Z X 1992 *Prog. Phys.* **12** 38 (in Chinese) [宁兆元、任兆杏 1992 物理学进展 **12** 38]
- [3] Erckmann V, Gasparino U 1994 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **36** 1869
- [4] England A C 1984 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **12** 124
- [5] Eldridge O C, England A C 1989 *Nucl. Fusion* **29** 1583
- [6] Abrakov V V, Akulina D K, Andryukhina E D, Batanov G M, Berezhetskij M S, Danilkin I S, Donskaya N P, Fedyanin O I, Gladkov G A, Grebenshchikov S E, Harris J H, Kharchev N K, Kholnov Y V, Kolik L V, Kovrizhnykh L M, Larionova N F, Letunov A A, Likin K M, Lyon J F, Meshcheryakov A I, Nechaev Y I, Petrov A E, Sarksyian K A, Sbitnikova I S 1997 *Nucl. Fusion* **37** 233
- [7] Gong Y, Wen X J, Zhang P Y, Deng X L 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 2376 (in Chinese) [宫野、温晓军、张鹏云、邓新绿 1997 物理学报 **46** 2376]
- [8] Liu M H, Hu X W, Wu Q C, Yu G Y 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 497 (in Chinese) [刘明海、胡希伟、邬钦崇、俞国扬 2000 物理学报 **49** 497]
- [9] Muta H, Itagaki N, Kawai Y 2002 *Vacuum* **66** 209
- [10] Muta H, Koga M, Itagaki N, Kawai Y 2003 *Surf. Coat. Technol.* **171** 157
- [11] Chen J F, Wu X Q, Wang D Q, Ding Z F, Ren Z X 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1309 (in Chinese) [陈俊芳、吴先球、王德秋、丁振峰、任兆杏 1999 物理学报 **48** 1309]
- [12] Fu S L, Chen J F, Wu X Q, Wang N X, Zhang M P, Hu S J 2006 *Plasma Sci. Tech.* **8** 300 (in Chinese) [符斯列、陈俊芳、吴先球、王宁星、张茂平、胡社军 2006 等离子体科学与技术 **8** 300]
- [13] Liu Y, Wang Y X, Cui S Y, Wang X D, Zheng S, Wang X G 2006 *Vacuum* **80** 1367
- [14] Porteous R K, Wu H M, Graves D B 1994 *Plasma Sources Sci. Technol.* **3** 25

Numerical study on uniformity of electron cyclotron resonance plasma density

Gao Bi-Rong Liu Yue[†]

(School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(Received 22 April 2010; revised manuscript received 24 June 2010)

Abstract

Based on drift-diffusion approximation and under axis-symmetric assumption, a two-dimensional(2D) fluid model is established for the plasma in the chamber of electron cyclotron resonance plasma source. A finite difference method is used for self-consistent numerically simulating the model. Numerical results of uniformity evolution of plasma density are obtained. From the analysis of the numerical results, the effects of background gas pressure, microwave power and current in magnetic field coil on uniformity of the plasma density are studied. The results shows that during the initial ionization, the uniformity of electron density is better than that of ion density. During the later ionization, the uniformity of ion density is better than that of electron density. As background gas pressure increases, the uniformities of both electron and ion densities increase, and the uniformity of ion density increases faster. As microwave power increases, the uniformities of both electron and ion densities increase with almost the same rates. As current in magnetic field coil increases, the uniformities of both electron and ion densities increase at almost the same rates. However, when the current in magnetic field coil becomes big enough, the uniformities of both electron and ion densities decrease at almost of same rates.

Keywords: plasma density uniformity, background gas pressure, microwave power, current in magnetic field coil

PACS: 52. 25. Jm, 52. 30. Ex

[†] Corresponding author. E-mail: liuyue@dlut.edu.cn