

# ECR 等离子体源中基本参数的数值模拟

刘明海 胡希伟

(中国科技大学近代物理系, 合肥 230026)

吴汉明

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

采用混合模型求解了 ECR 等离子体源中的各种物理参量, 着重研究了中性气压、微波功率对等离子体参数(如等离子体密度、电子温度、等离子体电势)以及离子能量和方向角分布的影响, 并讨论了与之相关的均匀性、方向性等物理问题。

关键词 ECR 等离子体 粒子模拟 离子能量分布 离子方向角分布

## 1 引言

近年来, 低温等离子体技术的运用在微电子工业中占有相当突出的地位<sup>[1]</sup>。作为新一代高效等离子体反应器之一的 ECR 等离子体源, 正日新月异地发展起来。由于它是一种无极放电, 能够在低气压下产生高密度、高电离度的等离子体, 所以在等离子体物理研究、表面处理、刻蚀和薄膜制备等应用中成为十分引人注目的新领域<sup>[2]</sup>。当前它的发展趋势是微细化、低温化、低损伤化和大面积均匀化。为此, 数值研究和粒子模拟也已成为优化反应器设计以及有效控制等离子体参数的一种手段。经过众多学者的不断努力, 一维或两维的动力学模型、流体模型、混合模型相继提了出来。在这里, 我们沿着 Porteous 等人<sup>[3-5]</sup>建立的混合模型来求解 ECR 等离子体源中的各种物理参量, 重点研究中性气压、微波功率对等离子体参数以及离子能量和方向角分布的影响, 并讨论与之相关的均匀性、方向性等物理问题。

## 2 物理模型

我们对中国科技大学的 ECR 等离子体装置进行了数值模拟, 它的结构示意图如图1所示。该装置属于延长型反应器, 它的源区半径与长度分别为5cm 和18cm, 下游区的半径与长度分别为8cm 和15cm。主副线圈(电流分别为  $I_1$  和  $I_2$ ) 产生所需的磁场。整个装置除微波介质窗口(图中阴影线部分)是绝缘体外, 其余表面都是导体并且接地, 工作气体为氩气。

我们采用混合模型来进行数值模拟, 即采用流体模型描述电子行为, 粒子模拟跟踪离子行为。

### 2.1 电子流体模型

在该模型中, 电子当作流体处理, 它的行为由经典的流体方程(质量守恒、动量守恒、能量

守恒)描述。假定电子速度为麦克斯韦分布,考虑沿磁力线方向的运动,则稳态时的连续性方程为:

$$\nabla \cdot j_{e\parallel} = R_{ion}(T_e, n_0, n_e) \quad (1)$$

能量方程为:

$$\nabla \cdot Q_{e\parallel} = e j_{e\parallel} \cdot E + P_{ECR} - P_{coll} \quad (2)$$

式中  $j_{e\parallel}$  为平行于磁场方向的电子流密度;  $R_{ion}$  是电离率,它是电子温度  $T_e$ 、中性气体密度  $n_0$  和电子密度  $n_e$  的函数;  $Q_{e\parallel}$  是平行于磁场方向的能量流;  $P_{coll}$  是对应各种碰撞过程所引起的能量损失。我们假定主要的碰撞过程是电离、共振激发、亚稳态和弹性碰撞,则有:

$$P_{coll} = \sum_{i=1}^{NP} R_i E_i = k_{ion} n_n n_e E_{ion} + k_{en} n_n n_e E_{ex} + k_m n_n n_e E_m + k_{elas} n_n n_e E_{elas} \quad (3)$$

其中  $E_i$  是各种碰撞过程中对应每个电子的能量损失,  $R_i$  为第  $i$  种过程的速率 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )。微波在 ECR 等离子体中的传播、吸收过程是非常复杂的<sup>[6]</sup>,它的自洽求解将在另一篇文章中介绍。在这里,我们象文献[3]那样,根据实验测量而假定它的吸收剖面为:

$$P_{ECR} = A [1 - (r/R)^4] \{1 + [(B - B_0)/\Delta B]^2\}^{-1} \quad (4)$$

其中  $A$  是归一化常数;  $r, B$  分别为所在位置的半径和磁场;  $B_0$  是共振磁场;  $\Delta B = 25G$ 。

以上两个方程通过泊松方程:

$$\epsilon_0 \nabla^2 \varphi = e(n_e - n_i) \quad (5)$$

耦合构成方程组,其中  $\epsilon_0$  为自由空间的介电常数。

### 2.2 离子粒子模型

模型中的离子当作单粒子处理,采用蒙特卡洛方法在二维位形空间  $(r, z)$  和三维速度空间  $(v_r, v_\theta, v_z)$  中进行粒子模拟。 $v_\theta$  之所以保留下来,是由于径向力  $v_\theta \times B$  的存在及它对总能量有贡献。在该模型中,离子来源于电子与中性气体的碰撞电离以及离子与中性原子之间的电荷交换过程。我们假定,电荷交换产生的离子具有与之相碰撞的中性原子的温度和热运动速度,通过电离产生的离子具有背景气体温度和麦克斯韦速度分布。

### 2.3 边界条件

对电子连续方程和能量方程,采用通量边界条件是较为恰当的。假定在等离子体鞘层边界上,电子速度具有麦克斯韦分布,则电子到器壁处的通量为:

$$j_{ew} = \frac{1}{4} n_{es} v_{es} \exp\left(-\frac{e\Delta\varphi}{kT_{es}}\right) \quad (6)$$

同理,电子的能量通量为:

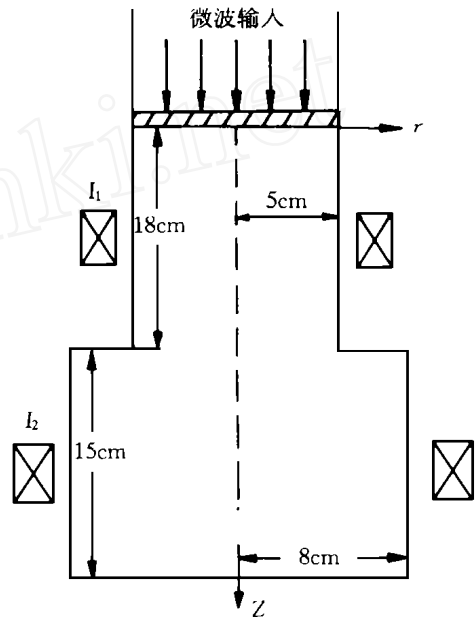


图1 ECR 等离子体反应器示意图

$$Q_{ew} = kT_{es}j_{ew} \left( 2 + \frac{e\Delta\varphi}{kT_{es}} \right) \quad (7)$$

式中  $v_{es}$ 、 $T_{es}$ 、 $n_{es}$  分别是电子在等离子体鞘层边缘处的热运动速度、电子温度、电子密度;  $\Delta\varphi$  为鞘层与器壁之间的电位差。我们忽略鞘层中的微细结构, 认为鞘层非常之薄。这样, 对无碰撞鞘层, 位势差  $\Delta\varphi$  的幅度大小就决定了电子流密度、电子能量流大小以及离子到达器壁的能量。

只要从粒子模拟中求得包括边界的空间各点离子密度分布, 在鞘层边缘处的电子密度便可从电中性度求出, 从而利用流体方程进行反复迭代求解。

### 3 数值结果与讨论

#### 3.1 中性气压和微波功率对等离子体参数的影响

等离子体径向密度分布随微波功率的变化关系如图2所示。微波功率增加, 等离子体密度也相应增加, 同时径向分布的不均匀性也有所增加。微波功率增加, 使得更多的微波能量耦合给电子, 导致更高的电离率, 从而使得等离子体密度升高。

图3给出了等离子体电子温度和电势随气压的变化。从图中可知, 两者都随压强的升高而降低。气压越高, 电子与中性原子的碰撞频率越大, 因而有更多的能量转移给中性气体, 导致电子能量降低。

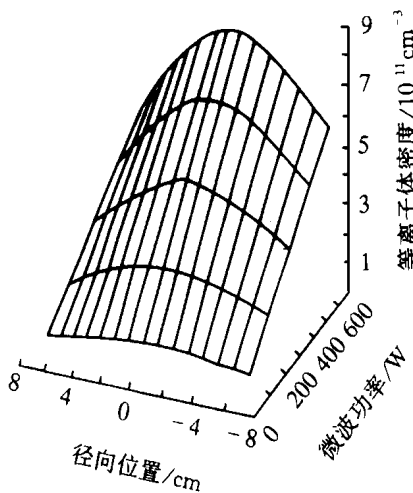


图2 等离子体密度的径向分布随微波功率的变化

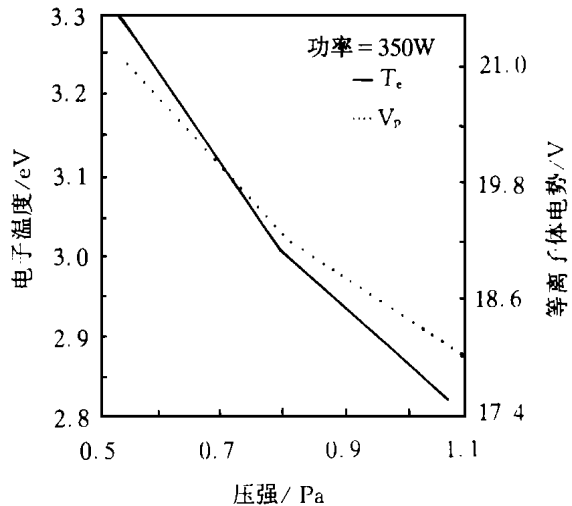


图3 等离子体电子温度与电势随气压的变化

#### 3.2 气压和微波功率对离子能量与方向角分布的影响

近几年来, 离子的行为(离子的能量、速度以及温度分布)越来越受到人们的关注, 主要原因是等离子体工艺的许多特征(如各向异性、选择性等)都跟它直接相关。图4是在基板表面上的离子能量分布。该图表明, 离子能量分布存在高能和低能两种成分, 其中高能成分主要来自基板附近的鞘电势加速, 这对等离子体工艺的选择性有一定的影响。当压强减小时, 能量分布

向高能方向移动, 离子的平均能量和峰值能量增加。这种双能量分布的存在, 目前虽然尚未见到理论或数值计算方面的预言或报道, 但已经被实验的诊断所证实<sup>[7]</sup>。

我们知道, 当离子轰击基板时, 往往不是垂直的, 而是以一定的方向角入射, 而等离子体工艺的许多特征(如各向异性)都跟方向角  $\theta = \arctg(v_{per}/v_{par}) = \arctg(\bar{E}_{per}/\bar{E}_{par})$ , 即离子的垂直速度与平行速度之比密切相关<sup>[8]</sup>。图5是径向方向角分布随微波功率的变化关系。当功率增加时, 径向方向角的平均值升高, 其分布的半宽度也相应增加。

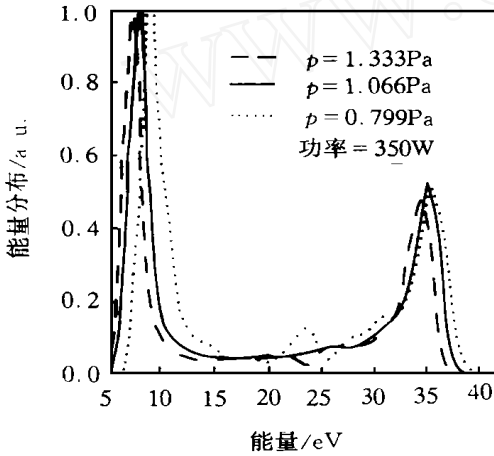


图4 离子能量分布 ( $z = 33\text{cm}$ ,  $4\text{cm} < R < 5\text{cm}$ )

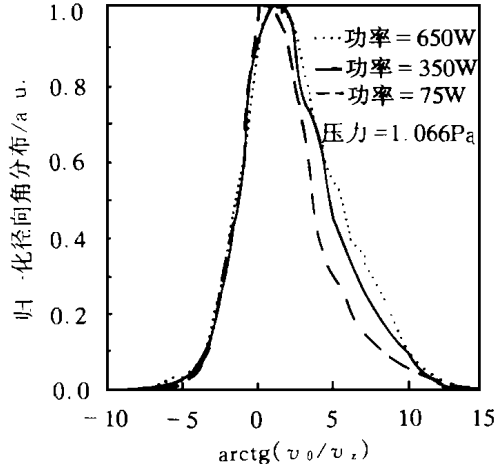


图5 离子的径向方向角分布(位置同图4)

由于自洽电场、外部磁场及密度梯度的存在, 离子轰击基板时应有一定的旋转速度<sup>[7]</sup>。我们计算的环向方向角分布随气压的变化关系如图6所示。由此图可见, 当气压减小时, 环向方向角的平均值减小, 其分布的半宽度也减小。有趣的是, 分布的峰值都在零度, 且半宽度维持在 $3^\circ-4^\circ$ 之间, 这说明离子轰击基板的净环向运动很小。

以上的计算结果表明, 气压和微波功率不但与等离子体参数的变化密切相关, 而且对离子能量和方向角分布也有较大的影响。相信这些结果对 ECR 等离子体的诊断工作及等离子体工艺都有一定的帮助和借鉴作用。

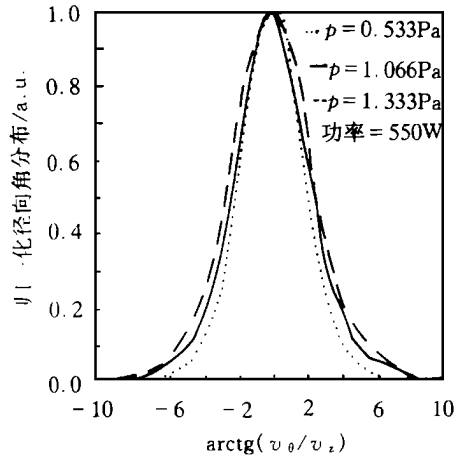


图6 离子的环向方向角分布(位置同图4)

感谢邵福球博士、胡海天博士、丁振峰研究员、邬钦崇研究员在讨论中给予的帮助, 感谢詹

如娟教授的支持和鼓励。

### 参考文献

- 1 Asmussen J. Electron Cyclotron Resonance Microwave Discharges for Etching and Thin-Film Deposition. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1989, A7(3): 883
- 2 宁兆元, 任兆杏. 电子回旋共振(ECR)等离子体的研究和应用. *物理进展*, 1992, 12(1): 38.
- 3 Porteous R K, Wu H M, Graves D B. A Two-Dimensional, Axisymmetric Model of a Magnetized Glow Discharge Plasma Source. *Sci. Technol.*, 1994, 3: 25
- 4 Graves D B, Wu H M, Porteous R K. Modeling and Simulation of High Density Plasma. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, 32(6B): 2999
- 5 Wu H M, Graves D B, Li M, et al. The Effects of Coil Current Distribution in a Cylindrical Electron Cyclotron Resonance Reactor. *Chin. Phys. Lett.*, 1994, 11(12): 747.
- 6 钱尚介. ECR 等离子体和哨声波的模拟实验. *核聚变与等离子体物理*, 1984, 4(3): 143.
- 7 Sadeghi N, Nakano T, Trevor D J, et al. Ion Transport in an Electron Cyclotron Resonance Plasma. *J. Appl. Phys.*, 1991, 70(5): 2552
- 8 Hartog E A Den, Persing H, Woods R C. Laser-Induced Fluorescence Measurements of Transverse Ion Temperature in an Electron Cyclotron Resonance Plasma. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 57(7): 661.

编辑部1997年7月9日收稿  
1998年2月23日收到修改稿

## NUMERICAL SIMULATION OF THE ELEMENTARY PARAMETERS OF AN ELECTRON-CYCLOTRON-RESONANCE PLASMA SOURCE

LU Minghai HU Xiw ei

(Modern Physics Department, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

WU Hanmin

(Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

### ABSTRACT

Many kinds of parameters of a typical electron-cyclotron-resonance (ECR) plasma source have been calculated using a two-dimensional hybrid-model. The effects of pressure and microwave power on various plasma quantities (plasma density, electron temperature, plasma potential, ion energy and angle distribution) are investigated. Some issues related to dependence of uniformity and anisotropy are discussed correspondingly.

**Key words** ECR plasma Particle simulation Ion energy distribution

Ion angular distribution