

- 7 Craninckx J, Steyart M. A 1.8GHz low-phase noise CMOS VCO using optimized hollow spiral inductors IEEE Journal of Solid State Circuits, 1997, 32(5): 736~744
- 8 Gray P. Future directions in silicon ICs for RF personal communications a dvanced engineering course on RF IC design for wireless communication systems, Lausanne, Switzerland 1995, (7)
- 9 Blalack Lau T J, Clement F. Experimental results and modeling of noise coupling in a lightly doped substrate. Proc. IEEE International Electron Devices Meeting, San Franctsko, CA, U. S. A. 1996
- 10 Su D K, et al. Experimental results and modeling techniques for substrate noise in mised signal integrared circuits. IEEE Journal of Solid -State Circuits, 1993, 28(4): 420~430
- 11 Pun A, Yeung T, Lau J. Substrate noise coupling through planar spiral inductor to appear. in IEEE Journal of Solid-State Circuits, June, 1998
- 12 Zhang Zhaofeng, Lau J. Interference issues in silicon RFIC design accepted for presentation at the 1998 IEEE Radio Frequency International Conference(RFIC'98), Baltimore, U. S. A. , June 1998

# ECR 等离子体源中磁场梯度的影响

邵福球                      王 龙      姚鑫兹

(国防科学技术大学应用物理系)      (中国科学院物理研究所)

吴汉明

(中国科学院力学研究所)

**摘 要** 用混合模型在二维位形空间和三维速度空间对电子回旋共振等离子体源中的粒子运动进行数值模拟,并着重研究磁场梯度在电子回旋共振等离子体源中所起的作用。结果显示磁场梯度增加时,电子温度、等离子体密度和离化率降低,而等离子体势和离子的能量增加。模拟中观测到一个  $\theta$  方向不为零的平均速度,这是由于  $E \times B$  和  $\nabla n_1 \times B$  漂移所引起的。

**关键词** 电子回旋共振 等离子体源 数值模拟

## 1 引 言

电子回旋共振(ECR)等离子体源装置已被广泛用于科学研究和工业领域,特别是在微电子学领域的材料表面处理方面起着越来越重要的作用<sup>[1~3]</sup>。鉴于实验研究表明<sup>[4]</sup>,磁场位形不但影响磁场中带电粒子的扩散系数,而且影响等离子体势及离子的能量,要得到合适的 ECR 等离子体源,就必须选择合适的磁场位形。因此,我们用混合模型对这一问题进行数值模拟研究。

## 2 数值模拟模型

数值模拟采用的装置参数来自物理所的电子回旋共振等离子体源装置。该装置如图 1 所示<sup>[5]</sup>。

我们采用一种混合模型<sup>[6~8]</sup>,即采用流体模型处理电子,跟踪少量计算粒子的方法处理离子。计算在二维位形空间和三维速度空间进行。模型的基本结构可描述如下,外加线圈的位置和电流决定磁场分布。离子是按照离化率的分布引入的,它们的运动是由外加磁场、电场和中性粒子的碰撞来决定的。离子化率是由电子密度、电子温度和中性气体密度分布决定的。静电场是由电子和离子的密度分布决定的。在重复计算过程中,离子轨迹的计算是和电子连续性方程、电子能量守恒方程以及泊松方程的求解一起进行的,这样可以得到电子和离子密度分布、电子温度和静电势的分布。鞘是解析处理的,并认为在鞘上的碰撞可忽略不计。

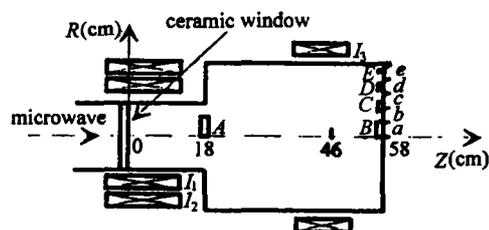


图 1 ECR 实验装置示意图

### 3 模拟结果

图 2(a) 所示是我们所研究的几种不同线圈电流组合所对应的磁场强度的轴向分布曲线。在磁化等离子体中,离子的 Larmor 半径要比电子的 Larmor 半径大,因此,与中性粒子碰撞所引起的离子扩散要比电子扩散快。这样,将会出现电荷分离,产生电场,导致双极扩散的出现。而这一扩散系数依赖于磁场梯度。可以想像,服从双极扩散的离子能量也会受到磁场梯度的影响;通过改变磁场梯度,在模拟中将会观察到等离子体势、离子能量和离子速度分布的改变。

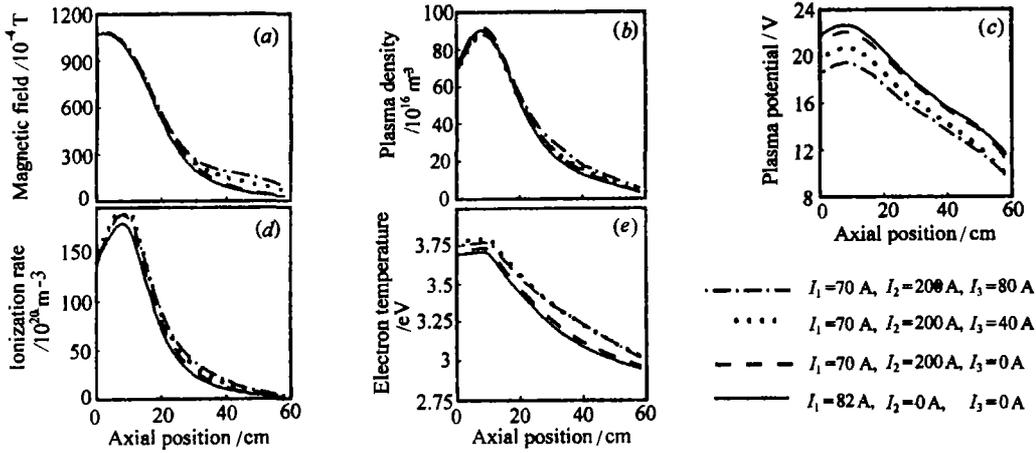


图 2 磁场的轴向分布及不同磁场分布下的等离子体密度、等离子体势、离化率和电子温度的轴向分布。

$$P_{in} = 500 \text{ W}, p = 0.3 \text{ Pa}$$

图 2(b) 至 2(e) 所示分别是几种线圈电流组合所产生的不同磁场梯度下的等离子体密度、等离子体势、离化率和电子温度随  $Z$  坐标 ( $r=0$ ) 的变化曲线。结果表明,磁场梯度增加时,电子温度、等离子体密度和离化率降低,而等离子体势增加。从图 2(a) 可看出在改变线圈电流以影响磁场梯度的同时,在边缘处磁场强度也同时改变。然而从所得计算结果,特别是电子密度以及电子温度分布的变化(图 2(b), 2(e)) 可看出,不同磁场位形的影响主要发生在磁场梯度最大区。这一变化证实了双极扩散系数对磁场梯度的依赖关系,也证实了边缘处磁场大小对等离子体流行为影响不大。

图 3 是有关撞击到基片上的离子的统计信息。一般说来,当粒子撞击基片时,其速度并不总是垂直于基片的。模拟结果显示,磁场梯度对于离子速度径向分量和轴向分量之比  $V_r/V_z$  的分布影响较小,所以我们只给出离子速度角向分量和轴向分量之比  $V_\theta/V_z$  的结果,这一结果用  $\text{Arctg}(V_\theta/V_z)$  表示。图 3 给出了装置底部不同位置处,离子入射到基片的速度角分布和能量分布;在腔中相应的位置由图 1 中字母 a, b, c, d, e 表示。其中图 3(a) 和图 3(b) 相应于两种线圈电流组合,情形 (a) 的磁场梯度较情形 (b) 的磁场梯度大。总的来说,离子撞击角向分布中心值近似为零,半高宽在 6 度以内;当磁场梯度减小时,随着径向位置增大,分布的平均值偏离零点也越大。撞击到基片上的离子能量分布都近似为 Gauss 分布,平均能量为在相应径向位置处的鞘势,其半高

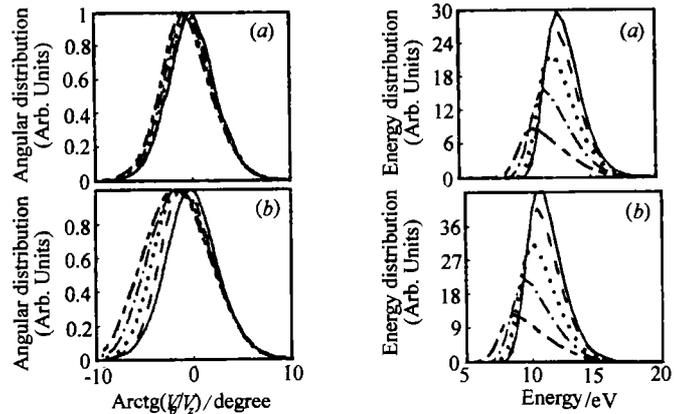


图 3 不同磁场分布下,撞击到基片上的粒子速度角分布和能量分布

$$P_{in} = 500 \text{ W}, p = 0.3 \text{ Pa}. \quad \text{---} 0 < r < 3.5 \text{ cm}; \quad \text{---} 3.5 \text{ cm} < r < 7 \text{ cm}; \quad \cdots 7 \text{ cm} < r < 10.5 \text{ cm};$$

$$\cdot \cdot \cdot 10.5 \text{ cm} < r < 14 \text{ cm}; \quad \text{---} 14 \text{ cm} < r < 17.5 \text{ cm}.$$

$$(a) I_1 = 82 \text{ A}, I_2 = 0 \text{ A}, I_3 = 0 \text{ A}; \quad (b) I_1 = 70 \text{ A}, I_2 = 200 \text{ A}, I_3 = 80 \text{ A}.$$

宽 — 232 —

宽约为 3~5 eV。比较两种不同磁场梯度的情况,我们可以看出,磁场梯度增大时,撞击到基片上的离子能量增大。实验结果也显示<sup>(4)</sup>,通过减小第三个线圈中的电流,可以使撞击到基片的离子能量增大。在该文献中,

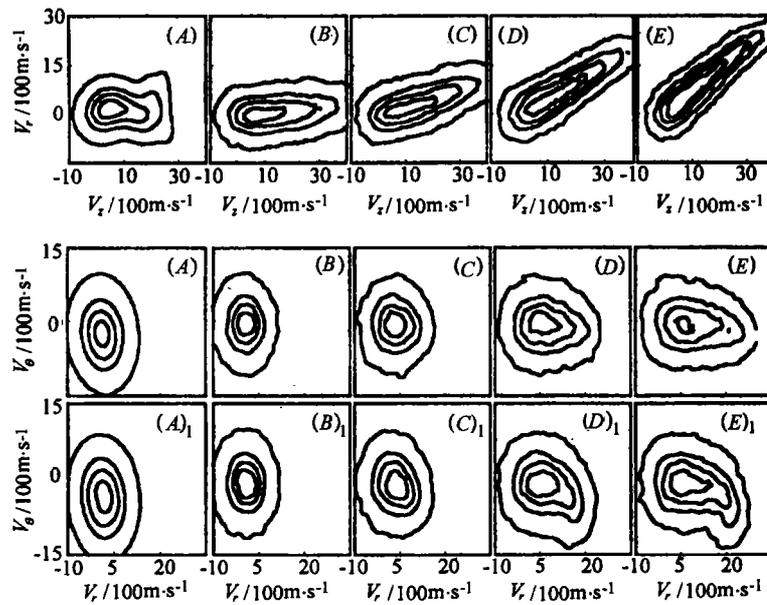


图 4 不同体积元中粒子在速度空间  $(V_z, V_r)$  和  $(V_r, V_\theta)$  中分布的等值线图。

$P_{in} = 500 \text{ W}$ ,  $p = 0.3 \text{ Pa}$ . (A) ~ (E):  $I_1 = 82 \text{ A}$ ,  $I_2 = 0 \text{ A}$ ,  $I_3 = 0 \text{ A}$ ,

(A)<sub>1</sub> ~ (E)<sub>1</sub>:  $I_1 = 70 \text{ A}$ ,  $I_2 = 200 \text{ A}$ ,  $I_3 = 80 \text{ A}$

作者把它归于磁境场的影响,而这实际上包括不同磁场梯度和不同磁场位形两种情况。模拟结果显示,撞击到基片上的离子能量强烈依赖于磁场梯度,这说明实验结果中影响撞击到基片上的离子能量的主要因素也很可能是磁场梯度。

图 4 是上述两种不同磁场梯度时不同体积元中的粒子在速度空间  $(V_z, V_r)$  和  $(V_r, V_\theta)$  中分布的等值线图。我们分别取如下五个体积元:(A)  $17 \text{ cm} < z < 18 \text{ cm}$ ,  $0 < r < 3.5 \text{ cm}$ ; (B)  $57 \text{ cm} < z < 58 \text{ cm}$ ,  $0 < r < 3.5 \text{ cm}$ ; (C)  $57 \text{ cm} < z < 58 \text{ cm}$ ,  $6.6 \text{ cm} < r < 7.5 \text{ cm}$ ; (D)  $57 \text{ cm} < z < 58 \text{ cm}$ ,  $12 \text{ cm} < r < 12.5 \text{ cm}$ ; (E)  $57 \text{ cm} < z < 58 \text{ cm}$ ,  $14.58 \text{ cm} < r < 15 \text{ cm}$ 。在反应室中体积元相应的位置如图 1 中字母 A, B, C, D, E 所示。由图中可以看出,当离子由体积元(A)运动到体积元(B)时,由于轴向电场加速,  $V_z$  增大;随着径向位置增大,离子的径向速度也增大;另外,我们还可从图中看出,在源区存在较大的  $\theta$  方向平均速度;这是因为在源区存在较大的径向电场、较大的径向离子密度梯度和大的轴向磁场(见图 2)所致,也就是说  $E \times B$  和  $\nabla n_i \times B$  漂移较大。相对而言,在相互作用区,同样可以观察到虽小但也很明显的一个  $\theta$  方向平均速度,而且该平均值随着  $r$  的增大而增大。这一结论与从图 3 得到的结论是一致的。

#### 参 考 文 献

- 1 Stevens J E, et al. J. Vac. Sci. Technol., 1992, A10: 1270
- 2 Joubert O, Pelletier J, Arnal Y. The etching of polymers in oxygen-based plasma: A parameter study, J. Appl. Phys., 1989, 65: 5096
- 3 Lieberman M A, Gottscho R A. Physics of Thin Films. Edited by Francombe M and Vossen J. Academic, New York, 1993
- 4 Morito Matsuoka, Ken'ichi Ono. Magnetic field gradient effects on ion energy for electron cyclotron resonance microwave plasma stream. J. Vac. Sci. Technol, 1988, A6(1): 25
- 5 Yao X Z, Jiang D Y, Ren Y F. The ion current behavior in ECR argon plasma. ACTA Physica Sinica, 1994, 3(10): 758
- 6 Graves D B, Wu H M, Porteous R K. Modeling and simulation of high density plasma. Jpn. J. Appl. Phys., 1993, 32(Part 1, 6B): 2999
- 7 Wu H M, Graves D B, et al. Behavior of Ar plasma formed in a high density plasma source-An ECR reactor. Acta Physica Sinica (Overseas Edition), 1994, 3(10): 746
- 8 Shao F Q, Wang L, et al. Numerical Simulation of ECR Plasma Sources. Acta Physica Sinica (Overseas Edition), 1996, 5(9): 677