

CF₄ 气体 ICP 等离子体中的双温电子特性

黄 松 宁兆元 辛 煜 甘肇强

(苏州大学物理科学与技术学院, 苏州 215006)

(2003 年 8 月 28 日收到, 2004 年 1 月 16 日收到修改稿)

使用朗缪尔探针方法研究了低压 CF₄ 气体感应耦合等离子体(ICP)的放电特性. 结果表明, CF₄ 等离子体的电子呈现双温分布: 一类是密度低、能量高的快电子, 另一类是密度高、能量低的慢电子. 快电子温度 T_{he} 、慢电子温度 T_{ce} 以及它们的平均电子温度 T_e 随射频输入功率的增加而下降, 而它们的密度 n_{he} 、 n_{ce} 和 n_e 随功率的增加而上升. 从电子与气体粒子碰撞能量平衡的角度解释了双温电子特性与射频输入功率之间的关系.

关键词: 感应耦合等离子体, CF₄ 气体, 朗缪尔探针, 电子温度

PACC: 5200, 5270, 5275

1. 引 言

感应耦合等离子体(ICP)具有运行气压低、密度高、大面积均匀等优点. 近年来被逐步应用于微电子器件的刻蚀加工过程中^[1-3]. 我们知道, 刻蚀加工的效果强烈依赖于对刻蚀等离子体特性的认识和掌握, 所以研究各种气体的 ICP 放电特性是很重要的. 常用的刻蚀气体是碳氟气体, 如 CHF₃, CF₄, C₄F₈ 等, 其中 CF₄ 得到了广泛的关注^[4,5], 比如 Bonham 给出了 CF₄ 等离子体的电子碰撞截面数据^[6], Kimura 和 Ohe 比较了 CF₄ ICP 的模型和朗缪尔探针的测量结果^[7], Rao 借助于朗缪尔探针和质谱仪分析了等离子体中 CF₄ 的分解情况^[5]. 近年来的实验发现, 在低气压等离子体中的电子能量分布不是单一的麦克斯韦分布. Delmotte 使用朗缪尔探针对电子回旋共振的 N₂/SiH₄ 等离子体研究表明: 有两类呈现麦克斯韦分布的电子群存在等离子体中, 在朗缪尔探针电流-电压的半对数曲线上表现为两段不同的斜率, 这意味着存在两类电子, 它们具有各自的电子温度^[8]. 那么在低气压的 CF₄ 气体 ICP 放电等离子体中是否也存在着双温电子分布, 其密度与宏观参量(功率、气压等)之间的关系如何, 是需要解决的一个问题. 因为在 ICP 刻蚀机中, 会因电子温度的差异导致对器件的刻蚀效果的不同.

在等离子体中, 首先是电子从电场中吸收能量, 然后通过与各种粒子间的相互碰撞实现能量的传

递、转移, 使得吸收能量的粒子产生激发、电离、分解等过程^[9,10]. 因此, 产生电场的射频输入功率的大小直接影响着等离子体的性质. 本文通过改变射频输入功率, 使用朗缪尔探针方法对 CF₄ 气体 ICP 的特性作了观察, 证实了也存在着双温电子现象. 我们对这两类电子群的电子温度、电子密度、以及快电子向慢电子转化的机理进行了研究.

2. 实验安排

实验是在一台平板型感应耦合线圈的 ICP 刻蚀机中进行, 真空室的直径为 300mm, 13.56MHz 的射频电磁波通过介质窗口输入到真空室中, 实验中射频输入功率在 100—600W 可变. 由流量计控制的 15sccm 的 CF₄ 源气体从介质窗下方通入, 气压维持在 0.25Pa. 水冷基片架距离介质窗约 20cm, 它在实验中可以维持在室温.

朗缪尔探针位于基片架正上方 3cm 处, 它由直径 0.25mm、长 5mm 的钨丝制成, 由一个中科院物理研究所制造的探针扫描电源供电, 采集的数据送到计算机中进行分析, 获得电子温度、密度和空间电位等数据.

3. 结果与讨论

图 1 是射频输入功率 300W、气压 0.25Pa 时朗缪尔探针的电流-电压(I_e-V_p)曲线, 它可以划分为三个部分: a 是电子饱和区域, b 是电子的拒斥区

域, c 是离子饱和区域, 其中区域 b 又可细分为靠近 c 的强减速电场电子拒斥区域和靠近 a 的弱减速电场电子拒斥区域. 图 1 还同时表示出它们的半对数曲线, 它与 Delmotte 报道的探针电流-电压半对数曲线类似^[8]. 从半对数曲线可以看到, 在减速电场的电子拒斥区域的曲线由两段不同斜率的直线组成, 它表示存在着两个电子温度, 即等离子体中存在着两群温度不同的电子, 分别叫做快电子和慢电子. 我们可以从曲线在强减速电场区域的直线斜率的倒数得到快电子温度 T_{he} , 从曲线在弱减速电场区域的直线斜率的倒数得到慢电子温度 T_{ce} , 而两类电子的密度分别从各自的饱和电流得到^[11, 12].

$$\text{慢电子密度: } n_{ce} = 3.7 \times 10^8 I_{ce} (A_p \sqrt{kT_{ce}}),$$

$$\text{快电子密度: } n_{he} = 3.7 \times 10^8 I_{he} (A_p \sqrt{kT_{he}}),$$

$$\text{平均电子密度: } n_e = n_{ce} + n_{he},$$

$$\text{平均电子温度: } T_e = \frac{n_{ce} T_{ce} + n_{he} T_{he}}{n_{ce} + n_{he}},$$

其中 I_{ce} , I_{he} 分别表示慢、快电子的饱和电流, 单位是 mA. A_p 是探针收集电子流的面积, 单位是 cm^2 , k 是玻尔兹曼常数. 等离子体的空间电位 V_s 由图中两条切线相交点得到.

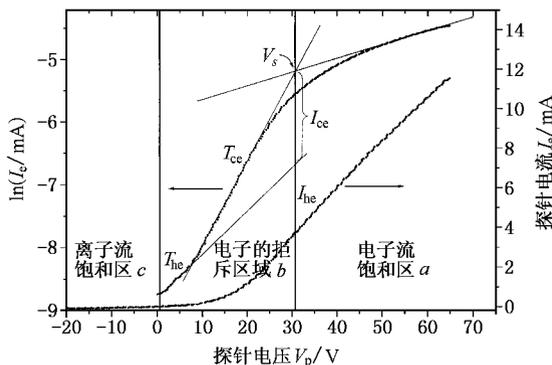


图 1 感应耦合 CF_4 等离子体中探针的电流-电压曲线以及半对数曲线

通过改变射频输入功率获得了两类电子的密度随射频输入功率的变化关系, 如图 2 所示. 可以看出, 慢电子的密度较高, 快电子的密度较低, 两者均随输入功率的增强而上升, 但是在 100—400W 范围内上升得较缓慢, 而在 400—600W 范围内变成迅速上升, 而且慢电子密度上升得更快, 也就是说慢、快电子密度之比 (n_{ce}/n_{he}) 随功率的增强而变大 (从 2.7 到 27), 如图 3 所示.

以前的研究报告指出, 电子温度随输入功率的

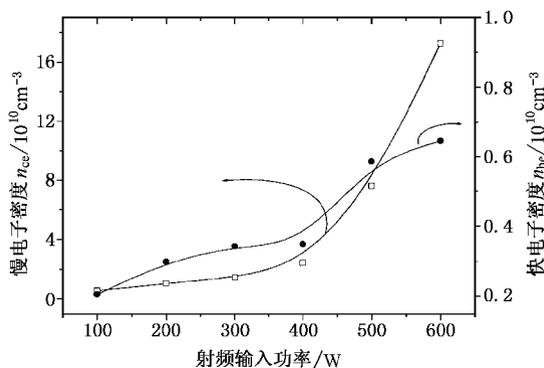


图 2 慢电子密度、快电子密度随射频输入功率的变化关系

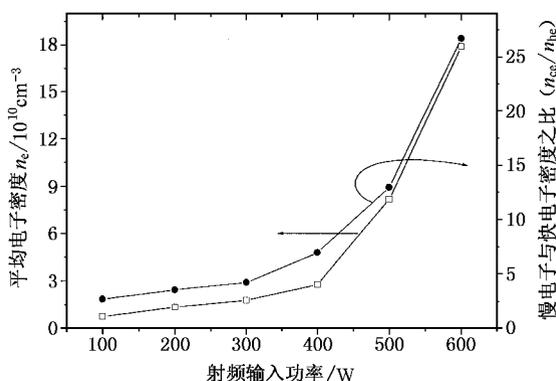


图 3 平均电子密度、慢电子密度与快电子密度之比 (n_{ce}/n_{he}) 随射频输入功率的变化关系图

变化关系并不一致. Schwabedissen 观察到的 Ne 等离子体的电子温度几乎不随射频输入功率的变化而变化^[13]. Samukawa 使用 $Cl_2/5\% Ar$ 混合气体, 发现 ICP 放电等离子体中的电子温度随功率的增加而上升^[14]. 图 4 是对 CF_4 气体的 ICP 放电等离子体的测量结果, 从图中可以看到快电子比慢电子具有更高的能量, 快电子、慢电子和它们的平均电子温度都随射频输入功率的上升而下降.

我们认为上述三种不同结果是由于工作气体的不同所致, Ne 是惰性气体, $Cl_2/5\% Ar$ 是混合气体, 而 CF_4 则是强电负性气体.

等离子体的电子温度是电子与其他粒子之间碰撞能量平衡的结果. 根据文献^[15, 16]报道, 电子与粒子碰撞实现能量传递决定于下列的因素:

- 1) 电子平均自由程随等离子体中粒子密度的增加而缩短.
- 2) 电子温度由电子从电场中吸收的能量及电子通过与其他粒子碰撞损失的能量共同决定.

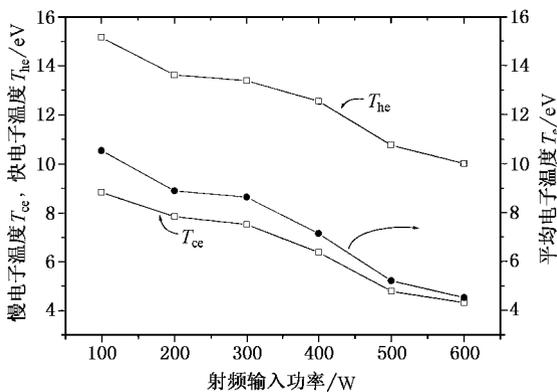


图4 慢、快电子和平均电子温度随射频输入功率的变化关系图

3) 电子吸收能量决定于电场强度, 即放电输入功率. 电子损失的能量在很大程度上决定于电子碰撞工作气体分子及其产物(荷电粒子和中性基团)的反应率.

对于上述的实验结果, 我们有下面的解释:

1) 在 100W 低射频输入功率时, 电子密度较低, 电子具有较大的平均自由程, 可以从电场中吸收更多的能量. 同时由于低的电子密度因而电子与工作气体分子、荷电粒子和中性基团之间的反应率也低, 使得电子损失的能量较少. 这是 CF_4 等离子体在低输入功率时有高的快、慢电子温度和平均电子温度的原因(图4).

2) 当射频输入功率增加时, 电子密度迅速增加, 与工作气体分子、荷电粒子和中性基团之间的反应率也迅速增加, 使得电子能量损失变大. 同时分解形成的中性基团和荷电粒子的密度上升, 电子的平均自由程缩短, 电子从电场中吸收的能量减少, 因而快、慢电子温度和平均电子温度不断的下降(图4).

3) 电子与工作气体分子、荷电粒子和中性基团之间的碰撞也使得更多的高能电子向低能电子转化, 慢、快电子密度之比(n_{cc}/n_{he})不断上升(图3), 在 600W 时, 平均电子温度接近慢电子温度(图4).

Rao 对 CF_4 等离子体的研究表明^[5], CF_4 对能量在 6—10eV 范围内的电子有较强的俘获作用, 继而产生 CF_3^- , F^- , CF_4^- 等基团. 这段电子能量范围正好对应于本实验中射频输入功率(100—400W)对应的电子能量, 因此在射频输入功率(100—400W)范围时, CF_4 对电子较强的俘获作用使得电子损失较多, 因而在这段输入功率范围内平均电子密度的上升缓

慢. 当射频输入功率大于 400W 时, 平均电子能量开始低于 6eV, CF_4 对电子的吸附能力减弱, 电子的损失减少, 引起平均电子密度迅速上升(图3).

我们还测量了等离子体空间电位(V_s)随输入功率之间的关系, 如图5所示. 等离子体空间电位是由于电子比离子更易逃逸到器壁, 引起更多的负电荷损失而产生. 很明显, 高能量的电子更易于逃逸到器壁, 引起更多负电荷的损失^[11], 所以平均电子温度高的等离子体应有更高的等离子体空间电位, 两者有着一致的变化趋势. 与预料的一样, 图5中等离子体空间电位(V_s)随射频输入功率增强呈下降趋势, 这同图4中平均电子温度随输入功率之间的变化趋势有比较好的一致性.

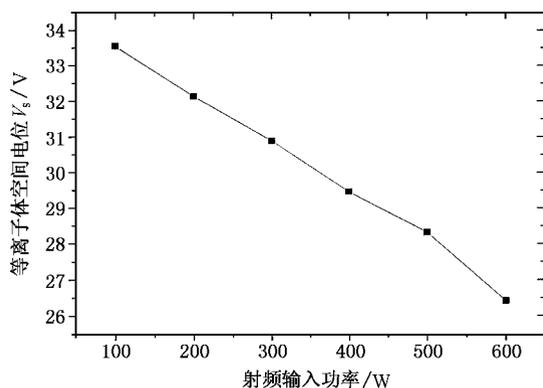


图5 等离子体空间电位随射频输入功率的变化关系

4. 结 论

使用朗缪尔探针研究了射频输入功率对 CF_4 感应耦合等离子体特性的影响. 结果表明, CF_4 等离子体的电子呈现双温分布: 一类是密度低、能量高的快电子, 另一类是密度高、能量低的慢电子. 射频输入功率的增强促进了 CF_4 的分解, 提高了等离子体中荷电粒子和中性基团的密度, 缩短了电子运动的平均自由程, 提高了电子与其他粒子的碰撞概率, 因而使得更多的高能电子向低能电子转化, 慢、快电子密度之比(n_{cc}/n_{he})不断上升, 降低了平均电子能量, 等离子体空间电位也逐渐下降. CF_4 在(6—10eV)内对电子的强俘获作用使得平均电子密度在低射频输入功率范围内缓慢上升, 在高功率范围内迅速增加.

- [1] Rauf S and Kushner M J 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 5966
- [2] Tadokoro M *et al* 1998 *Phys. Rev. E* **58** 7823
- [3] Schwabedissen A , Benck E C and Roberts J R 1997 *Phys. Rev. E* **56** 5866
- [4] Bordage M C and Seger P 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 3558
- [5] Rao M V V S , Sharma S P , Cruden B A and Meyyappan M 2002 *Plasma Sources Sci. Technol.* **11** 69
- [6] Bonham R A 1994 *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** 4157
- [7] Kimura T and Ohe K 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 1780
- [8] Delmotte F , Hugon M C and Agius B 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 1448
- [9] Malyshev M V and Donnelly V M 1999 *Phys. Rev. E* **60** 6016
- [10] Tadokoro M *et al* 1998 *Phys. Rev. E* **57** R43
- [11] Ikushima T , Tochitani G and Fujita H 1995 *J. Phys. D : Appl. Phys.* **28** 1851
- [12] Yamazumi T and Ikezawa S 1990 *Jpn. J. Appl. Phys.* **29** 1807
- [13] Schwabedissen A , Benck E C and Roberts J R 1996 *Phys. Rev. E* **55** 3450
- [14] Samukawa S 2002 *Appl. Sur. Sci.* **192** 216
- [15] Outten C A , Barbour J C and Wampler W R 1991 *J. Vac. Sci. Technol. A* **9** 717
- [16] Yoon S F , Tan K H , Zhang Q , Rusli M , Ahn J and Valeri L 2001 *Vacuum* **61** 29

Characteristics of two-electron-temperature in inductively coupled CF_4 plasmas

Huang Song Ning Zhao-Yuan Xin Yu Gan Zhao-Qiang

(*School of Science and Technology of Physics , Suzhou University , Suzhou 215006 , China*)

(Received 28 August 2003 ; revised manuscript received 16 January 2004)

Abstract

The characteristics in low-pressure inductively coupled CF_4 plasma have been investigated using a Langmuir probe method. Results for the CF_4 gas have shown that there are two electron populations : one with low temperature and high density and the second with higher temperature and lower density , in this region. Fast electron temperature T_{he} , slow electron temperature T_{ce} and mean electron temperature T_e decrease , while their densities n_{he} , n_{ce} , n_e increase with increasing r. f. input power. Our findings suggest that the dependence of two-electron-temperature on r. f. input power can be explained by the thermodynamic equilibrium of the collision between electrons and particles.

Keywords : inductively coupled plasmas , CF_4 gas , Langmuir probe , electron temperature

PACC : 5200 , 5270 , 5275