

微波 ECR 氧等离子体参数测量

谭必松, 马志斌*, 吴振辉

(武汉工程大学湖北省等离子体化学与新材料重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:利用双探针对微波 ECR 氧等离子体参数进行了诊断研究, 测量了等离子体的双探针伏安曲线并计算出电子温度和离子密度, 分析了气压、微波功率、氧气流速等参数对等离子体参数的影响。结果表明: a. 随着气压的升高, 等离子体密度先增大后减小, 电子温度逐渐减小; b. 等离子体密度随微波功率的增加先增加后达到饱和, 电子温度受微波功率影响很小; c. 随着氧气流量的增加, 等离子体密度和电子温度都减小。

关键词: ECR 等离子体; 朗缪尔双探针; 电子温度; 等离子体密度

中图分类号: O539

文献标识码: A

0 引言

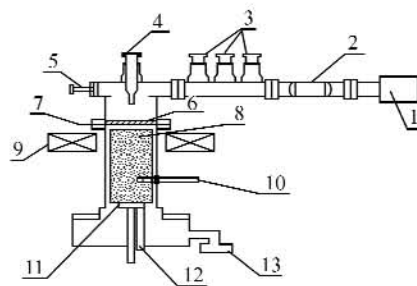
微波 ECR(电子回旋共振)等离子体与传统等离子体相比, 具有高密度、高能量转换率、低工作气压、无电极放电、高各向异性以及低离子能量等优点, 近年来, ECR 等离子体被广泛运用于微电子技

术, 材料加工, 低温表面处理工艺中^[1-3]。了解并优化 ECR 等离子体特性参数是 ECR 等离子体应用的关键。在等离子体诊断中, Langmuir 探针(或称静电探针)是最早的等离子体诊断手段之一; 是低气压冷等离子体应用最广泛的等离子体诊断工具, 其突出优点是: 结构简单, 操作方便且根据探测得到的伏安曲线可导出等离子体密度、电子温度和空间电位等参数^[4-6]。本文在发散型磁场下, 应用 Langmuir 静电双探针各自诊断了不同气压、微波功率和氧气流速状态下的 ECR 等离子体的密度和电子温度, 并分析了气压、微波功率、氧气流速等参数对等离子体参数的影响。

1 实验

图1是本研究使用的 ECR 等离子体源的结构示意图。发射频率为 2.45 GHz 的磁控管发射的微波在矩形波导中以 TE_{10} 模式传输, 经环行器、三螺钉阻抗调配器后到达模式转换器, 再耦合到圆波导以 TM_{01} 模式传播, 馈入石英窗后进入放电室。磁场线圈通电后产生一个轴向磁场, 在此磁场

作用下, 腔体内氧分子的外层电子作圆周运动, 当电子作圆周运动的频率与微波频率相等时, 即磁场强度为 0.0875 T 时, 电子大量吸收微波能量并被加速, 使气体大量电离产生等离子体。进气口附近有均流设计, 起到均匀工作气体的作用。



(1)微波源;(2)环行器;(3)阻抗调配器;(4)模式转化天线;
(6)石英窗;(7)进气口;(8)等离子体;(9)磁场线圈;(10)
Langmuir 双探针;(11)样品台;(12)基片加热;(13)真空获得与
测量

图1 ECR 等离子体源结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an ECR plasma reactor

图2(a)为朗缪尔双探针结构图, 它由两个直径相同的钨丝组成, 端点的工作部分裸露, 前端由陶瓷将两钨丝绝缘, 中间用石英管将钨丝与不锈钢腔体绝缘。图2(b)是使用的朗缪尔双探针测量原理示意图, 探针悬浮于等离子体中, 工作电压 U_D 加在两探针之间, 通过测量两探针之间工作电流 I_D 随 U_D 的变化就得到双探针的伏安特征曲线。然后根据公式(1)、(2)计算出电子温度 kT_e 和等离子体密度 n_0 ^[6-7]。

收稿日期:2008-10-13

基金项目:国家自然科学基金(10875093)

作者简介:谭必松(1986-),男,重庆万州人,硕士研究生,研究方向:等离子体技术与薄膜材料。

指导老师:马志斌,男,博士,教授,硕士生导师,研究方向:低温等离子体技术及其应用。*通信联系人

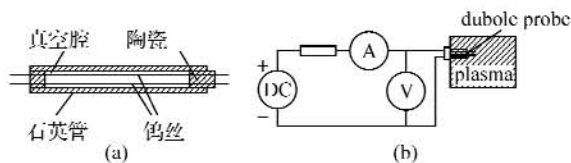


图 2 朗缪尔双探针

Fig. 2 Schematics of dubole Langmuir probe diagnostics system

$$\text{则电子温度: } \frac{kT_c}{e} = \frac{I_{i0}}{2 \frac{dI_D}{dU_D} |_{U_D=0}} \quad (1)$$

$$\text{等离子体密度: } n_c \approx n_i \approx n_0 = \frac{I_{i0}}{0.61 e A_s \left(\frac{kT_c}{m_i} \right)^{1/2}} \quad (2)$$

式中, I_{i0} ——离子饱和流;

n_c ——电子密度;

n_i ——离子密度;

m_i ——离子质量;

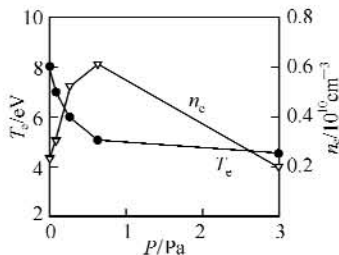
A_s ——探针表面积。

两个测量探针直径为 0.5 mm, 裸露长度为 15 mm, 为了测量基片附近的等离子体参数, 将探针安装在基片上方约 110 mm 处。

2 结果与讨论

2.1 工作气压对 ECR 等离子体参数的影响

图 3 是 ECR 等离子体参数随工作气压变化的测量结果。可以看出, 工作气压从 1.8×10^{-2} Pa 增加到 3 Pa, 基片附近的等离子体密度先增大后减小, 从 $0.29 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 增加到 $0.65 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 再减小到 $0.20 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; 而电子温度逐渐减小。在气压较低时, 中性粒子密度小, 电子密度较低, 随着气压的增加中性粒子密度增加, 中性粒子的电离数增加, 从而电子密度上升, 当气压继续上升, 由于电子碰撞及热交换使温度下降, 从而电离率下降, 导致电子密度下降。随着气压的升高, 电子的平均自由程减小, 电子多次碰撞而导致电子温度减小。

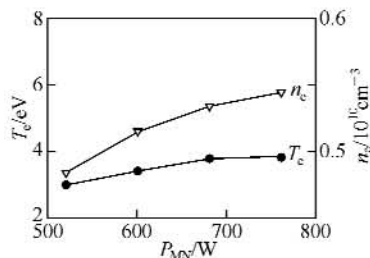


工作参数: 微波功率 800 W, 励磁电流 202 A, 氧气流速 2.2 ml/min.

图 3 ECR 等离子体参数随工作气压的变化
Fig. 3 Dependence of ECR plasma parameters on work pressure

2.2 微波功率对 ECR 等离子体参数的影响

图 4 是 ECR 等离子体参数随微波功率变化的测量结果。可以看出, 电子密度随微波功率增加, 先增加后趋于饱和; 而电子温度增加很少。电子密度出现饱和现象的原因是: 由于稳态气体放电是一个动态平衡的过程, 既有电离又有复合, 当微波功率较低时, 电离占主导作用, 随着微波功率的增加, 电子密度增加, 同时复合越来越强, 当两者达到平衡时, 气体的电离率达到饱和, 即电子密度趋于饱和; 此外电子能量与电子碰撞电离截面的关系是非线性的, 即电子能量超过某一阈值后, 随着电子能量的继续增加, 电离截面反而下降, 这也导致饱和现象的发生。电子温度受微波功率影响很小, 类似正柱辉光放电^[7]。

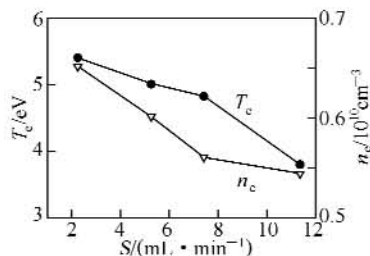


工作参数: 励磁电流 202 A, 氧气流速 11.2 ml/min, 工作气压 0.7 Pa.

图 4 ECR 等离子体参数随微波功率的变化
Fig. 4 Dependence of ECR plasma parameters on microwave power

2.3 氧气流速对 ECR 等离子体参数的影响

图 5 是 ECR 等离子体参数随氧气流速变化的测量结果。可以看出电子温度和电子密度都随着氧气流速的增加而减小。在其它状态不变的情况下(特别是在压强不变的情况下), 氧气流速的增加在微波场作用下会导致氧原子浓度的增大, 而氧原子的亲和能较高(约 1.5 eV), 易捕获电子形成负离子, 不仅削弱了电子的电离作用, 而且由于电子变成负离子而使复合增强, 导致电子温度和电子密度都下降。



工作参数: 励磁电流 202 A, 微波功率 760 W, 工作气压 0.7 Pa.

图 5 ECR 等离子体参数随氧流量的变化
Fig. 5 Dependence of ECR plasma parameters on the flow of oxygen

3 结 语

采用朗缪尔双探针对发散场 ECR 等离子体装置中基片上方的等离子体参数进行了测量. 实验结果表明:

a. 等离子体密度随着气压升高先增大后减小, 而电子温度随气压升高而降低.

b. 随微波功率的增加, 等离子体密度先增加后达到饱和, 电子温度受微波功率影响很小.

c. 随着氧气流量的增加, 氧原子浓度增加, 由于氧原子捕获电子形成负离子既削弱了电子的电离作用又使复合作用增强, 导致等离子体密度和电子温度都减小.

参考文献:

- [1] 徐新艳, 汪家友, 杨银堂, 等. 微波 ECR 等离子体刻蚀系统[J]. 真空科学与技术, 2002, 22(5): 385-388.
[2] 恩云飞, 杨银堂, 孙青. 电子回旋共振等离子体技术

新进展[J]. 西安电子科技大学学报, 1995, 22(4): 425-432.

- [3] 丁振峰, 任兆杏, 史义才, 等. 微波电子回旋共振等离子体刻蚀研究[J]. 真空科学与技术, 1996, 16(6): 439-444.
[4] Malyshev M V, Donnelly V M. Diagnostics of chlorine coupled plasmas. Measurement of electron temperatures and electron energy distribution functions[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(4): 1642-1649.
[5] 张治国, 陈小钰, 刘天伟, 等. Langmuir 探针诊断微波 ECR 非平衡磁控溅射等离子体[J]. 真空科学与技术, 2005, 25(2): 110-114.
[6] 许沫华, 任兆杏, 沈克明. 射频偏置 ECR-PECVD 等离子体参数测量[J]. 核聚变与等离子体物理, 2004, 24(1): 63-66.
[7] Cherrington B E. The use of electrostatic probes for plasma diagnostics-A review[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1982, 2(2): 113-140.

Measurement of microwave ECR oxygen plasma parameter

TAN Bi-song, MA Zhi-bin, WU Zhen-hui

(Key Laboratory of Plasma Chemical and Advanced Materials of Hubei Province,
Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The microwave ECR plasma parameter has been diagnosed using double Langmuir probes. The I-V characteristics of double probes were measured and its electronic temperature, plasma density were calculated. The effects of gas pressure, microwave power and oxygen current on the plasma parameters were analysed. The results indicated that: (1) With the increasing of gas pressure, plasma density increased and then decreased and electronic temperature gradually decreased. (2) Plasma density increased and then saturated as the microwave power was increased, electronic temperature had a very small impact on microwave power. (3) With the increasing of the flow of oxygen, plasma density and electronic temperature reduced.

Key words: microwave ECR plasma; double Langmuir probes; electronic temperature; plasma density

本文编辑: 萧 宁