

磁场位形对微波 ECR 等离子体电子参数的影响

沈武林,马志斌,谭必松

(武汉工程大学材料科学与工程学院,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:测量了两种磁场位形中微波 ECR 等离子体的电子参数,研究了磁场位形对电子参数空间分布的影响,结果表明:发散场中电子温度在轴心和腔体边缘较大,在过渡的中间区域较小,而磁镜场中电子温度随径向半径 R 的增大单调减小;电子密度在两种磁场位形中随径向和轴向距离的增大均呈单调下降的趋势,磁镜场中的下降幅度大于发散场;在共振面附近,发散场中气压对电子温度的影响比在磁镜场中大,而气压对电子密度的影响在两种磁场位形中基本相似.

关键词:ECR 等离子体;发散场;磁镜场

中图分类号:O539

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.09.015

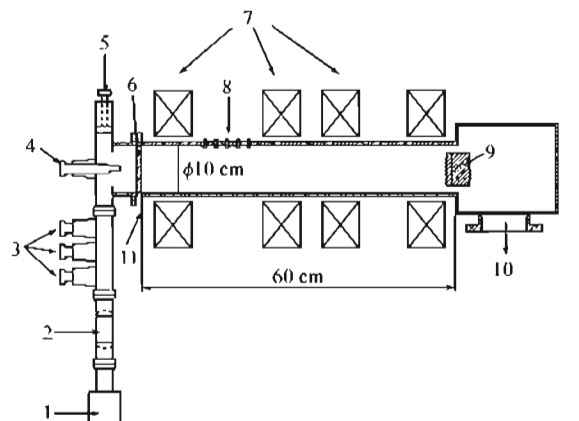
0 引 言

微波电子回旋共振(ECR)等离子体以其高密度、低温、能量转换率高、无电极等优点已成功应用于材料表面处理、刻蚀、薄膜制备等微电子工业中^[1-3]. ECR 等离子体中电子参数对上述应用有直接的影响,因此研究 ECR 等离子体中的电子参数对其应用研究具有十分重要的意义. 等离子体参数的测量方法有很多种,Langmuir 探针是一种既简单方便,准确性又较高的方法^[4]. 根据探针的测量,可以实时地反馈调节等离子体参数,以达到所要求的等离子体.

磁场是微波 ECR 等离子体产生的基本物理因素之一,不同的磁场位形将直接影响 ECR 等离子体的参数和性能,因此研究磁场位形对微波 ECR 等离子体参数的影响对其可控利用有重要作用. 目前微波 ECR 等离子体的研究中,磁场位形较多都利用发散场^[5-6],结合磁镜场来研究等离子体参数的工作还比较少. 本文分别在发散场和磁镜场条件下,测量了微波 ECR 等离子体电子参数,研究了两种磁场位形对微波 ECR 等离子体电子参数的影响,并分析了其影响机制.

1 实验装置

图 1 为自行研制的微波 ECR 等离子体装置示



1-微波源,2-环形器,3-三销钉匹配器,4-耦合天线,5-挡板,
6-石英窗口,7-磁场线圈,8-测量窗口,9-基片台,10-真空系统,11-通气孔
图 1 ECR 装置示意图

意图. 微波源产生 2.45 GHz 微波,由矩形波导传输,经天线耦合到圆波导,并通过石英窗口馈入真空室内. 磁场系统由四组沿轴向可调的线圈和三台直流电源组成,为 ECR 等离子体提供所需的磁场,磁场强度由高斯计测量,本实验所使用的两种磁场位形如图 2 所示. 实验所使用的工作气体为氧气,经过质量流量控制器和通气孔导入真空室. 真空系统由机械泵和涡轮分子泵组成,实验本底真空为 3×10^{-3} Pa.

实验采用 Langmuir 双探针测量等离子体电子参数,双探针所用的钨丝直径为 0.5 mm,裸露的

收稿日期:2010-04-29

基金项目:国家自然科学基金(10875093)

作者简介:沈武林(1985-),男,四川乐山人,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.研究方向:低温等离子体技术及其应用.*通信联系人

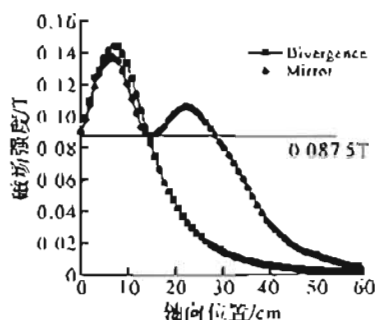


图2 发散场和磁镜场的中心轴向位形图

Fig. 2 The axial profiles of divergence and mirror magnetic field at the center

探头长度为 5.3 mm, 探针沿腔体径向的深度可以调节, 最大调节范围为 4 cm. 测量时将双探针悬浮于等离子体中, 工作电压加在两探针之间, 测量工作电流 I_p 随两探针之间电压 V_p 的变化, 就得到双探针的伏安特性曲线, 其测量原理如图 3 所示. 通过伏安特性曲线得到 dU/dI 和 I_0 的值, 当两探针完全相同时, $I_{01} = I_{02} = I_0$, 代入 (1) 式可求得电子温度 T_e , 然后将电子温度值与饱和电流值代入 (2) 式可求得电子密度 n_e [1].

$$\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0} = \frac{e}{kT_e} \frac{I_{01}I_{02}}{I_{01} + I_{02}} \quad (1)$$

$$I_{01} = 0.61en_e S_i \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}} \quad (2)$$

式中: I_0 为离子饱和电流, m_i 为离子质量, S_i 为探针表面积.

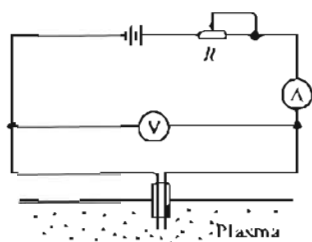


图3 双探针测量原理图

Fig. 3 Schematic of double Langmuir probe diagnostics system

本实验采用型号为 PAM-M2/100C 的静电探针自动测量系统与双探针相结合来测量 ECR 等离子体的电子参数, 它能在 10 s 内完成一次扫描, 并且提高了测量的准确性.

2 结果分析与讨论

2.1 电子参数的空间分布

实验利用双探针分别在径向 $R = 0, 1, 2, 3, 4$ cm 和轴向 $Z = 15.3, 17, 18, 19.8, 21$ cm (轴向将石英窗口处设为 $Z = 0$, 微波沿 Z 轴正向传播) 处测量了两种磁场位形中 ECR 微波等离子体的电子

温度和密度, 测量时微波功率为 800 W, 工作气压 0.05 Pa, 氧气流量标准状态下 $5.0 \text{ cm}^3/\text{min}$, 将测量的结果拟合为三维曲线, 如图 4、5 所示.

图 4(a)、(b) 分别为发散场和磁镜场位形下等离子体的电子温度空间分布图, 两者共振面均位于 $Z = 15.3$ cm 处. 从电子温度的空间变化趋势看, 发散场和磁镜场中的电子温度在共振面过后沿微波传输方向均缓慢降低, 如轴线上 ($R = 0$ cm), 沿轴向 15.3 cm 到 21 cm 发散场中电子温度从 9.23 eV 降到 7.94 eV, 磁镜场中电子温度从 7.56 eV 降到 5.19 eV. 在两种磁场位形中, 电子温度沿微波传输方向不断减小有两方面的原因: 一方面是 ECR 等离子体中, 微波能量主要在共振面处被等离子体吸收, 在共振面处带电粒子有最高的能量; 另一方面是由于等离子体沿着轴向扩散时, 电子与中性粒子的碰撞使电子能量逐渐损失所导致. 两种磁场位形中, 电子温度沿径向的变化规律明显不同, 磁镜场中电子温度随径向半径 R 的增大单调减小, 而发散场中电子温度在轴心和腔体边缘较大, 在过渡的中间区域较小, 电子温度

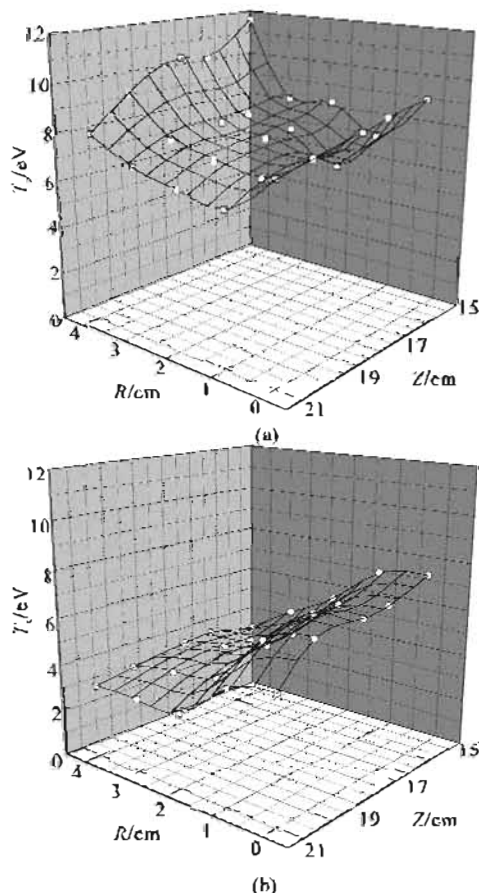


图4 ECR 微波等离子体的电子温度空间分布图:
(a) 发散场; (b) 磁镜场

Fig. 4 The spatial distribution diagram of microwave ECR plasma electron temperature

在靠近腔壁处反常升高. 发散场中电子温度在腔壁附近增加, 主要是由于发散磁场位形下, 磁场对等离子体的约束较弱, 边缘处等离子体中的电子撞击腔壁而损失, 使得腔壁附近形成较强的等离子体鞘层, 该鞘层作用于等离子体内部的电子, 导致腔壁附近电子温度较高. 在磁镜场中, 电子受到磁场的约束作用较强, 磁镜效应使大部分电子被束缚在 R 较小区域内^[8], 这样就使碰撞腔壁而损失的电子少, 等离子体鞘层作用影响较小, 因此腔壁附近电子温度较低.

从电子温度值的分布上看, 在共振面的轴心处, 两种磁场位形下的电子温度相近, 是由于该处的电子温度主要决定于微波功率和工作气压. 而在 R 较大的区域, 发散场中的电子温度明显大于磁镜场, 这是因为磁镜场中电子受磁镜的束缚, 集中在 R 较小的区域, 大部分高能电子由于非弹性碰撞损失能量而变成低能电子, 因此电子温度相对较低.

图 5(a)、(b) 分别为发散场和磁镜场位形下等离子体的电子密度空间分布图. 从图中可以看到, 电子密度在两种磁场位形中随径向和轴向距

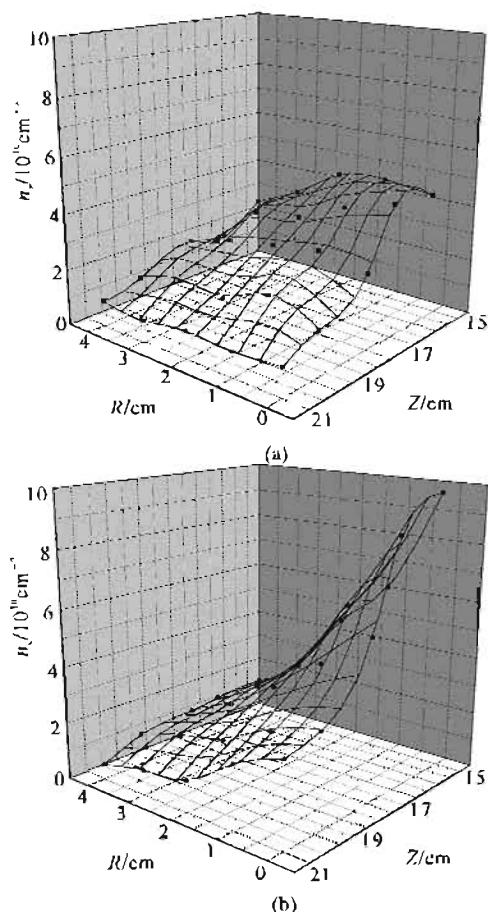


图 5 微波 ECR 等离子体的电子密度空间分布图:
(a) 发散场; (b) 磁镜场

Fig. 5 The spatial distribution diagram of microwave ECR plasma electron density

离的增大均呈单调下降的趋势, 如在共振面 ($Z = 15.3$ cm), 发散场中电子密度从 $R = 0$ cm 的 $4.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 下降到 $R = 4$ cm 的 $1.02 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 磁镜场中电子密度由 $R = 0$ cm 处的 $9.77 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 下降到 $R = 4$ cm 处的 $2.96 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. 不同的是, 发散场中电子密度随径向半径 R 的变化较小, 特别是当 $Z = 21$ cm 时, 电子密度几乎不随 R 的变化而改变, 其值都在 $0.9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 左右, 而磁镜场中电子密度在共振面中心明显较大, 沿径向和轴向距离的增加均有快速下降.

发散场中电子密度的分布, 在共振面附近是由粒子碰撞和梯度磁场共同作用所导致的, 随着轴向的延伸, 梯度磁场的作用逐渐减弱, 主要由粒子碰撞影响其分布, 电子与中性气体分子或离子的碰撞在传递能量的同时, 使电子密度随径向变化很小^[9]. 在磁镜场中磁镜作用使大量的电子被约束在共振区, 导致电子密度随径向和轴向距离的变化较大. 另外, 从图中各轴向位置还可以看到, 在 R 较小的区域电子密度在磁镜场大于其在发散场, 而在腔体边缘则小于其在发散场, 这也是磁镜效应所导致的结果.

2.2 气压对电子参数的影响

实验在同一位置 ($Z = 15.3$ cm, $R = 0$ cm) 相同磁场强度 ($B = 0.0875$ T) 下, 利用双探针测量了两种磁场位形中不同气压下 (分别为 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 0.8 Pa) 的电子参数, 结果如图 6 所示.

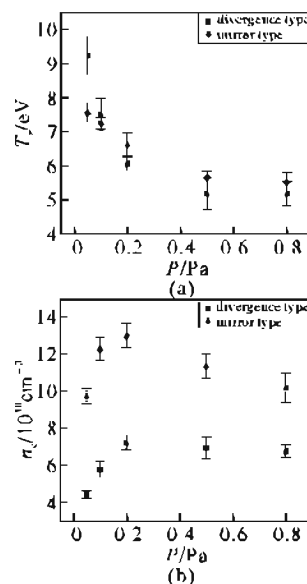


图 6 在两种磁场位形中气压对电子参数的影响:
(a) 电子温度; (b) 电子密度

Fig. 6 Dependence of ECR plasma parameters on work pressure in the two magnetic fields

测量时微波功率为 800 W, 氧气流量标准状态下 $5.0 \text{ cm}^3/\text{min}$. 图中电子参数随气压的变化规律在两种磁场位形中基本相同, 电子温度均随气压的增加而减小 (发散场中电子温度从 0.05 Pa 的 9.23 eV 降低到 0.8 Pa 的 5.13 eV, 磁镜场中电子温度从 0.05 Pa 的 7.56 eV 降低到 0.8 Pa 的 5.53 eV), 电子密度随气压的增加先增大后减小 (两种磁场位形中, 电子密度均在 0.2 Pa 左右达到最大), 这是因为气压增加, 中性气体密度增大, 电子与中性粒子的电离碰撞频率增加, 电子密度增大, 同时由于碰撞频率增加导致电子温度下降; 而随着气压的继续增加, 电子平均自由程逐渐变短, 电子在两次碰撞之间吸收的微波能量减少, 电子温度降低, 导致气体电离率下降, 造成等离子体密度随之下降^[10]. 另外, 发散场中气压对电子温度的影响比磁镜场大. 这是因为发散场中电子的扩散与碰撞主要受气压影响, 而磁镜场中电子的扩散与碰撞不仅受气压影响, 而且受磁镜场的影响, 因此当气压变化时, 磁镜场中的电子温度受气压的影响也相对较小.

3 结 语

实验测量分析了两种磁场位形中微波 ECR 等离子体的电子参数, 结果表明:

a. 发散场中电子温度在轴心和腔体边缘较大, 在过渡的中间区域较小, 而磁镜场中电子温度随径向半径 R 的增大单调减小; 在共振面的轴心处, 两种磁场位形下的电子温度相近, 而在 R 较大的区域, 发散场中的电子温度明显大于其在磁镜场.

b. 电子密度在两种磁场位形中随径向和轴向距离的增大均呈单调下降的趋势, 磁镜场中的下降幅度大于发散场; 在 R 较小的区域电子密度在磁镜场大于其在发散场, 而在腔体边缘则小于其在发散场.

c. 在共振面附近, 发散场中气压对电子温度的影响比在磁镜场中大, 而气压对电子密度的影响在两种磁场位形中基本相似.

本文主要讨论了两中磁场位形对微波 ECR 等离子体电子参数的影响, 对于其他磁场位形以及在这些位形中离子参数的分布情况还需要进一步研究.

参考文献:

- [1] 孙剑, 吴嘉达, 钟晓霞, 等. ECR 等离子体对单晶硅的低温大面积表面处理[J]. 半导体学报, 2000(10): 1019-1023.
- [2] 宁兆元, 程珊华. 微波 ECR 等离子体技术及其在材料加工中的应用[J]. 微细加工技术, 1995, 1: 38-44.
- [3] 张继成, 唐永建, 吴卫东. 电子回旋共振微波等离子体技术及应用[J]. 强激光与粒子束, 2002(4): 566-570.
- [4] 陶孟仙. 等离子体特性的静电探针测量技术[J]. 佛山科学技术学院学报, 2000, 18(3): 11-15.
- [5] Si-Lie Fu, Jun-Fang Chen, She-Jun Hu, et al. Study on the characteristics of ECR plasma spatial distribution[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2006(15): 187-192.
- [6] 张洪宾, 陈俊芳, 符斯列, 等. 微波电子回旋共振等离子体放电特性研究[J]. 华南师范大学学报, 2009(2): 48-52.
- [7] 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(1): 63-66.
- [8] Hiroshi Muta, Nao Itagaki, Mayuko Koga, et al. Generation of a low-electron-temperature ECR plasma using mirror magnetic field[J]. Surface and Coatings Technology, 2003(174/175): 152-156.
- [9] Jun-Fang Chen, Si-Lie Fu, Xiu-qiong Lai, et al. Characterization of spatial plasma distribution in a divergence-type ECR-PECVD system[J]. Vacuum, 2006, 81: 49-53.
- [10] 谭必松, 马志斌, 吴振辉. 微波 ECR 氧等离子体参数的测量[J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(5): 51-53.

The effects of magnetic field configuration on the electron parameters of microwave ECR plasma

SHEN Wu-lin, MA Zhi-bin, TAN Bi-song

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

Abstract: The electron parameters of a microwave electron cyclotron resonance (ECR) plasma operated in two kinds of magnetic field were measured with Langmuir probe. The effects of magnetic field configuration on the spatial distribution of the electron parameters were investigated. The results indicated that: in divergence magnetic field configuration, the electron temperatures at the axial and edge of cylindrical vacuum are higher than that of intermediate area while it decreases monotonically with increasing radius R in a mirror magnetic field. The electron density all decline with increasing the radial and axial distance in the divergence and mirror magnetic field configuration, but the decline extent of mirror field is larger than that of divergence field. The gas pressure has more influence on the electron temperature in divergence magnetic field than in mirror magnetic field at the vicinity of resonance surface, while it has same effect on the electron density in both of the magnetic field.

Key words: ECR plasma; divergence magnetic field; mirror magnetic field

本文编辑:龚晓宁

☆

(上接第 52 页)

Application of limit equilibrium method in the research of slope stability of open pit mine

JIA Pei, CHANG Yu-feng, WANG Xin, HU De-hua, HU We-jun

(1. School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Engineering Research Center for Exploitation and Utilization of Phosphorus Resources, Wuhan 30074, China)

Abstract: According to the basic principles of the safety evaluation, and based on the analysis of slope design and its related parameters of a small open-air non-coal mine, slope accident risk of the mine is discussed. With the introduction of quantitative safety evaluation method of limit equilibrium, the slope of bench mining and the stability of final slope angle is calculated quantitatively, which proves that the stability of the mine slope is safe under the condition of the existing design exploitation. At the same time, the result and the future mining design are in the same construction, which accords with control requirements of the non-coal mine safety rules and proves the applicability of limit equilibrium in the safety evaluation of small-scale open-pit mine. According to the result of the analysis and calculation, safety countermeasures aiming at preventing slope accident of small-scale open-pit mine are put forward.

Key words: slope accident; non-coal mine; limit equilibrium method; safety evaluation; safety countermeasures

本文编辑:龚晓宁