

· 实验技术 ·

Langmuir 探针测量低温等离子体参数特性实验

符斯列, 陈俊芳

(华南师范大学 物理与电信工程学院, 广东 广州 510006)

摘要:介绍了 Langmuir 探针测量等离子体参数特性的实验原理和方法,采用 Langmuir 单探针诊断了电子回旋共振等离子体参数的分布特性。结果表明,在一定微波功率下,气压增加,等离子体密度趋于饱和。将 Langmuir 单探针测量等离子体特性实验引入高年级近代物理实验课程的综合创新实验,使得学生在动手实验的过程中接触到物理学科研究前沿领域的技术与知识,激发学生的创新意识和提高创新能力。

关键词:Langmuir 单探针; 低温等离子体; 特性诊断

中图分类号:O 434.14 文献标识码:A

文章编号:1006-7167(2010)03-0004-03



Experimental Teaching of Diagnosis of Low-Temperature Plasma by Single Langmuir Probe

FU Si-lie, CHEN Jun-fang

(School of Physics and Communication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The experimental principle and method of Langmuir probe measurement of plasma characteristic parameters were introduced. As an example, a single Langmuir probe was used to diagnose the distribution characteristics of electron cyclotron resonance plasma. The results show that plasma density tends to be saturated at a certain microwave power when gas pressure increases. In order to arouse the students' creative ideas and interests, it is proposed that providing the experiment on the measurement of characteristic parameters of plasma by Langmuir probe to the class of modern physics experiment for senior undergraduates. Students will have access to the forefront of knowledge and technology in physical field in the course of experiment.

Key words: Langmuir probe; low-temperature plasma; diagnosis

1 引言

等离子体源自希腊语 plasma,原意为“血浆”,是由离子、电子、及中性粒子组成的准电中性气体。它的主要物理参数有等离子体密度 n 、电子温度 T_e 、离子轰

击能 ε_i 、等离子体振荡频率 ω_p 和德拜长度 λ_D 等。等离子体学是一个新兴的物理分支学科,研究的是物质世界中气态、固态、液态外的第4态,即等离子态。低温等离子体技术,特别是射频感应耦合等离子体(RF-ICP)、电子回旋共振等离子体(ECR)在微电子加工工艺、薄膜沉积、半导体微电路的干法刻蚀、等离子体清洗以及材料表面改性等方面获得了广泛的应用^[1-3]。相应地,大学物理专业本科教学中也引入了等离子体物理教学内容,但尚缺少具体表征等离子体特性诊断的实验方法。

Langmuir 单静电探针是最早被用来测量等离子体特性的一种诊断工具。根据探针的伏安特性曲线就可

收稿日期:2009-04-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10575039);教育部高校博士点专项科研资助项目(20040574008);广东省自然科学基金重点项目(05100534)

作者简介:符斯列(1972-),男,海南临高人,博士,讲师,目前从事低温等离子体技术以及应用研究。

Tel.:13538764866; E-mail:fusl@senu.edu.cn

以得到等离子体参数,且探针结构简单、操作简单、测量数据可靠和教学效果良好,是低温等离子体研究中一种十分有用的诊断方法,也是理想的近代物理实验教学内容。通过该实验,不仅加强学生对等离子体技术的认识和理解,还可以让学生接触真空的获得与测量,气体放电等实验内容,使得学生在动手实验的过程中接触到物理学科研究前沿领域的技术与知识,激发学生的创新意识和提高创新能力。

2 实验装置及原理

单探针诊断系统由 $-120 \sim +120 \text{ V}$ 可调的直流稳压电源、自制钨单探针、安培表(毫安、微安档)、电压表和导线组成。实验原理如图 1 所示。其中,钨探针套在不锈钢套管中,并用绝缘陶瓷绝缘,两端用树脂密封。钨探针直径为 1 mm ,露出部分长 5 mm 。ECR 产生设备具体说明详见文献[4-5]。实验时,TE₁₀微波通过石英耦合窗馈入腔中,电子在磁场强度 875 Gs 处回旋共振吸收微波能量,高能电子通过与中性气体粒子的碰撞来电离、离解气体粒子,从而产生高密度 ECR 等离子体,并在磁场梯度作用下向下级反应室扩散至整个反应室空间。

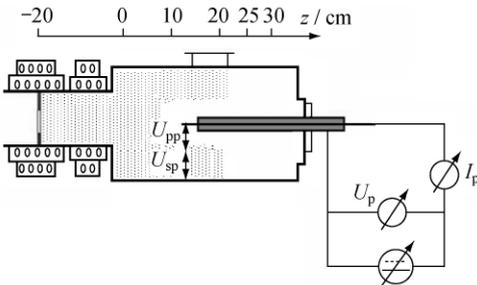


图 1 实验示意图

探针的伏安特性曲线如图 2 所示。设探针鞘电压为 U_{pp} ,探针所处的等离子体电位为 U_{sp} ,探针偏压 U_p 、探针电流 I_p 为探针收集的电子电流和离子电流之差,因此有:

$$U_p = U_{pp} + U_{sp}, \quad I_p = I_e - I_i \quad (1)$$

根据 $I_p - U_p$ 曲线的特征把曲线分为:电子饱和区、过渡区和离子饱和区。在电子饱和区($U_{pp} = U_p - U_{sp} \gg 0$),探针周围形成电子鞘,探针收集的是电子电流,离子被排斥。随着外电压的正增加,探针电流趋向饱和电子电流 I_{e0} ;在离子饱和区($U_{pp} = U_p - U_{sp} \ll 0$),探针周围形成离子鞘,探针收集的是离子电流,电子被排斥。随着外电压的负增加,探针电流趋向饱和离子电流 I_{i0} ;在过渡区($U_{pp} = U_p - U_{sp} < 0$),探针周围将形成离子鞘,离子鞘将阻挡电子向探针运动,只有能量大于鞘层排斥能的电子才能到达探针形成电子电流,因此,该区反映了电子的能量分布情况。这时探针电流满足:

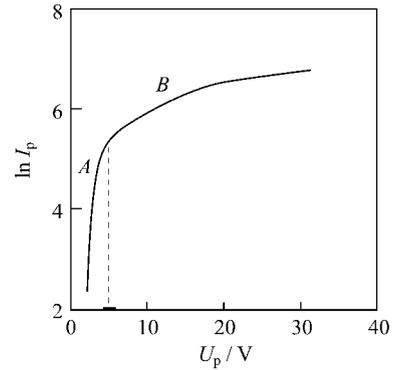
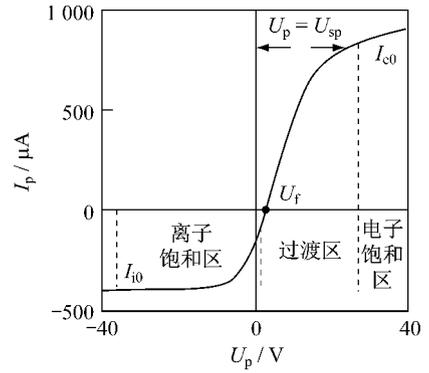


图 2 典型单探针伏安曲线和对应的半对数曲线

$$\ln I_p = \frac{e}{kT_e} (U_p - U_{sp}) + \ln I_{e0} \quad (2)$$

整理得:

$$kT_e = |d(eU_p)/d(\ln I_p)| \quad (3)$$

由式(2)可知,在过渡区 $\ln I_p$ 与 U_p 成直线关系,即如图 2 半对数曲线中 A 区所示。在实际参数测量中,由伏安特性曲线可知,饱和电子电流是比较难以确定,并且由于电子质量很“轻”,饱和电子电流易受外部电磁场的影响,因此一般采用饱和离子电流来计算等离子体密度。根据离子鞘 Bohm 判据,从过渡区加速进入离子鞘的离子速度满足 $v_i \geq (kT_e/m_i)^{1/2}$,从而得到等离子体密度 n [6-7],

$$n = \frac{I_{i0}}{0.61eS(kT_e/m_i)^{1/2}} \quad (4)$$

以及离子轰击能 ε_i ,

$$\varepsilon_i = e(U_p - U_f) = \frac{kT_e}{2} \ln \left[\frac{m_i}{2.26m_e} \right] \quad (5)$$

离子轰击能反映了等离子体中的离子对悬浮在等离子体中的极板的轰击能量,该物理量在等离子体干法刻蚀当中是很重要的。式中: e 是电子电量; m_e 是电子质量; k 是玻耳兹曼常数; S 是探针表面积; U_f 是探针悬浮电位; U_p 是等离子体探针电位。另外,由电子温度和等离子体密度,还可以计算出 2 个重要的等离子体参数——等离子体振荡频率 ω_p 和德拜长度 λ_D :

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k T_e}{n e^2}} = 6.9 \sqrt{\frac{T_e}{n}} (\text{cm}) \quad (6)$$

根据单探针测得的伏安特性曲线,由该曲线做出对应的半对数曲线 $\ln I_p$ 与 U_p ,再根据半对数曲线直线部分的斜率,就可以根据式(3)求出电子温度 T_e 、由式(4)求出等离子体密度、式(5)求出离子轰击能 $e(U_p - U_f)$ 等。这些参数有效地反映了等离子体的状态。

3 实验内容与结果讨论

在 Langmuir 单探针测量电子回旋共振等离子体参数分布特性实验中,影响等离子体参数分布的条件主要包括微波功率 P_w 、放电气压 p 、励磁电流 I_m 以及探针所在位置等。因此,实验的主要内容是诊断改变这些放电条件(或其中之一)对等离子体参数的影响。

实验采用的放电气体是氮气,氮气是惰性气体,但在等离子体中被轻易电离。研究表明,在氮 ECR 等离子体中,除了存在大量的氮分子和电子的激发碰撞外,还存在和电子的碰撞电离 $N_2 + e \rightarrow N_2^+ + 2e$,其中碰撞电离能为 15.5 eV。由于离解电离能为 26.7 eV,而本实验测得的电子温度大多约在 15 eV 以下,因此,可认为 ECR 氮等离子体中主要是碰撞电离,离子的主要成分是 N_2^+ ,离子质量数为 28。

为了获得高的等离子体密度,把探针头伸入到共振区域中,在中心轴向 $z = -16$ 、 -12 、 -10 cm 位置(径向半径 $r = 0$)上分别给探针施加偏压,并记录相应的探针电流,以及探针电流为零时的探针悬浮电位 U_f ,偏压步长可以根据探针电流变化的快慢改变。不同探针位置测量到的探针 $I-U$ 曲线如图 3 所示,其中,放电条件为 $P_w = 400$ W、 $p = 0.1$ Pa、 $I_m = 160$ A。从图中可以看出,这些曲线与理论曲线符合很好,具有明显的离子饱和区、电子饱和区、过渡区。根据饱和离子电流和过渡区的数据,得到的电子温度、等离子体密度、离子轰击能、等离子体振荡频率和德拜长度如表 1 所示。从表中可知,电子回旋共振等离子体具有高达 10^{11} cm^{-3} 量级的密度,如此高的密度使得等离子体具有很好的德拜屏蔽,表现为德拜长度低达 10^{-5} cm ;另

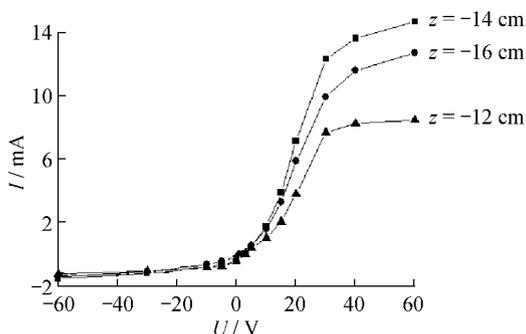


图 3 不同位置的探针 $I-U$ 曲线

外,振荡频率在 GHz 量级;在 ~ 6 eV 的电子能量下, N_2^+ 离子对悬浮极板的轰击能达到 ~ 30 eV。这一结果和文献[8]提供的 Ar 离子轰击能相近。

表 1 不同探针位置的等离子体参数分布

z/cm	T_e/eV	$n \times 10^{-11}/\text{cm}^{-3}$	ε_i/eV	ω_p/GHz	$\lambda_D \times 10^5/\text{cm}$
-16	6.8	2.4	34	4.4	3.7
-14	5.9	2.7	31	4.6	3.2
-12	6.9	2.0	35	4.0	4.1

图 4 是 $I_m = 150$ A、 $P_w = 300 \sim 800$ W 条件下,在 $z = 25$ cm 放电腔下游区域,通过测量每个给定微波功率点在不同工作气压条件下的等离子体密度,得到了在不同微波功率下等离子体密度分布。从图 4 可看出,对某一微波功率,存在一个最佳的工作气压,使等离子体密度存在一个最大值,如 $P_w = 300 \sim 500$ W 时,等离子体密度均约在工作气压 $p = 0.1$ Pa 有一个最大值,而 $P_w = 600, 800$ W 时,最佳气压值分别向约 0.14、0.18 Pa 方向移动。可以看出,随着微波功率的增加,等离子体密度极值对应的最佳气压值也随着增高。这是因为对于一定的微波功率,必然存在一个对应的最佳气压值,该气压对应一个电子平均自由程,使得电子在 2 次碰撞之间回旋共振吸收的微波能量等于气体的电离能。气体粒子直接碰撞电离的效率最大,从而获得等离子体密度极大值,随着气压增加到大于该最佳气压值,电子平均自由程也将随着变短,使电子在 2 次碰撞之间不能有效吸收微波能量以直接碰撞电离气体分子,从而造成等离子体密度随着气压增加而下降的趋势。而对于一定电离能的气体粒子来说,随着微波功率的增加,电子就可以在较短的平均自由程内,即较高的气压内使气体粒子电离,微波功率越大,这个平均碰撞电离自由程就越短,这意味着随着微波功率的增加,获得最大等离子体密度的最佳气压值将增高。图 4 很好地说明了这一现象。

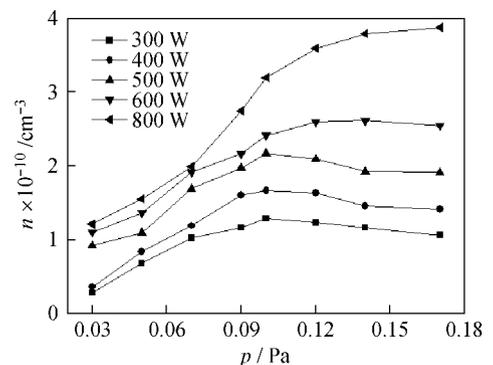


图 4 等离子体密度与气压关系

4 结 语

低温等离子体技术在微电子加工工艺、薄膜沉积、

```

u = (kp* (e0 - e1) + ki* e0 + kd* (e0 - 2* e1 + e2)); //
PID
if(u < 100) u = 0; if(u > 255) u = 255; //输出限制
}
rTCMPB1 = u; //修改 PWM 定时器 1 的占空比
}

```

(4) 串口发送。采用 RS-232 通信方式,通过实验台上的 UART0 向计算机发送处理后的实时液位值,利用串口调试助手收集数据,以便导入到 Excel 中绘制液位变化曲线并进行分析。

5 结 语

研制基于 ARM 实验平台的水箱液位自动控制实验装置,和过程控制装置实验产品相比,不仅制作简单、成本较低,而且又可为学生提供一个完整控制系统的较全面的实验资料。学生在理解控制理论的基础上,不仅可以根据机理法或系统辨识法建立液位控制系统的数学模型^[9],在开源的程序代码中直接修改控制参数或重新设计新的控制算法;学生还可以根据对 ARM 和硬件设计的掌握程度,重新设计硬件控制电路,并在万用板和实验平台上完成,来验证自己设计成果。

(上接第 6 页)

半导体微电路的干法刻蚀、等离子体清洗以及材料表面改性等方面获得了广泛的应用。虽然大学物理专业本科教学中也相应引入了等离子体物理教学内容,但尚缺少具体表征等离子体特性诊断的实验方法。Langmuir 单静电探针是用来测量等离子体特性的一种最有效诊断工具。根据探针的伏安特性曲线就可以得到等离子体参数,且探针结构简单,操作容易,测量数据可靠,实验内容丰富,教学效果好。本文以 Langmuir 单静电探针测量电子回旋共振等离子体参数特性为例,说明了实验的实验原理及结果分析。通过在近代物理实验教学的经典实验内容外增设 Langmuir 探针测量低温等离子体参数特性创新综合实验,不仅加强学生对等离子体技术的认识和理解,还可以让学生接触真空的获得与测量,气体放电等实验内容。让学生了解科学技术进步,拓展学生视野,还有助于提高学生的创新能力,激发学生对物理实验的学习热情和兴趣。

本文设计的液位控制系统已经成功地应用于教学和实验中,取得了良好的教学效果。因此,该系统具有推广使用价值。

参考文献(References):

- [1] 张 铮,陈小桥. 虚拟仪器技术的工业液位仿真系统设计[J]. 实验室研究与探索 2003 22(5):87-88,138.
- [2] 曲学楼,王富昕,黄蔚. 嵌入式系统实验教学基地的建设与探索[J]. 实验室研究与探索 2006 25(12):1571-1573.
- [3] 深圳市英蓓特公司. ARM7 基础实验教程[M]. 深圳:英蓓特公司 2004.
- [4] 管凤旭,张爱筠. 嵌入式系统开发实验技术[M]. 哈尔滨:黑龙江人民出版社 2008.
- [5] 贾 丽,袁小平,陈 烨,等. 常用液位检测方法的研究[J]. 能源技术与管理 2009(1):120-122.
- [6] 洪志刚,杜维玲,周 玲. 超声波外测液位检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报 2007 21(4):46-49.
- [7] 宋 健. 基于 L298 的直流电动机 PWM 调速器[J]. 潍坊学院学报 2004 4(4):87-88,49.
- [8] 冯毅萍,乐嘉华. 计算机液位控制系统实验装置的研制[J]. 实验室研究与探索 2000,(2):78-80.
- [9] 王正林,郭阳宽. 过程控制与 Simulink 应用[M]. 北京:电子工业出版社 2006.

参考文献(References):

- [1] Zhan R J, Wen X H, Zhu X D, *et al.* Adjustment of electron temperature in ECR microwave plasma [J]. Vacuum, 2003, 70:499-503.
- [2] Fujiwara N, Sawai H, Yoneda M, *et al.* Determination of the EEDF by Langmuir probe diagnostics in a plasma excited at ECR above a multipolar magnetic field [J]. Plasma Sources Sci Technol, 2001, 10: 181-190.
- [3] Ikushima T, Tochitani G, Fujita H. Low-pressure deposition of diamond by electron cyclotron resonance microwave plasma chemical vapor deposition [J]. J Crystal Growth, 2000, 211: 216-219.
- [4] Silie Fu, Junfang Chen, Shejun Hu, *et al.* Study on the characteristics of ECR plasma spatial distribution [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2006, 15: 187-192.
- [5] 符斯列,陈俊芳. 等离子体参数诊断及其特性研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版) 2004(2):77-81.
- [6] 赵化侨. 等离子体化学与工艺[M]. 合肥:中国科技大学出版社, 1993: 3-8.
- [7] 李 定,陈银华,马锦绣,等. 等离子体物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006: 5-13.
- [8] 甄汉生. 等离子体加工技术[M]. 北京:清华大学出版社,1990: 66-70.