

# 磁镜场对射频等离子体中离子能量分布的影响\*

刘洪祥 魏合林 刘祖黎 刘艳红 王均震

(华中理工大学物理系, 武汉 430074)

(1999 年 10 月 3 日收到, 2000 年 1 月 15 日收到修改稿)

运用阻碍栅极型能量分析器, 在不同磁镜场参数下测量了低温等离子体中离子的能量分布. 结果表明, 在放电管中心处离子能量分布, 随磁镜场强度的增加而向低能方向偏移, 但离子能量分布宽度却没有明显的变化, 而随着磁镜比的增加离子能量分布却向高能方向偏移, 并且离子能量分布宽度也将变宽. 由此可见, 磁镜场参数对离子能量分布有很大影响.

关键词: 磁镜场, 辉光放电, 低温等离子体, 离子能量分布

PACC: 6855, 8115H, 5270

## 1 引 言

等离子体是一种含有足够能量的导电离子和电子而在宏观上又是中性的气体介质, 其产生方式通常是通过直流电场、射频电场和微波场来加速电子而把能量耦合引入等离子体中的<sup>[1]</sup>. 等离子体参数一般取决于一系列因素, 其中包括: 产生等离子体的方法、工艺参数、系统的几何参数以及其他一些因素. 磁场对等离子体运输过程的影响是等离子体研究的一个重要领域, 近年来, 磁场中放电等离子体越来越受到科研工作者的重视<sup>[2-4]</sup>. 由于电子在磁镜场中要受到洛仑兹力的作用而作螺旋径迹运动, 从而增加了电子在放电空间的运动路径, 即电子的自由步长增加, 致使电子与中性粒子的碰撞机会增加, 反应气体的电离就越容易发生, 即气体电离度增大, 并且由于磁镜场的位形特点, 带电粒子被大量约束在磁镜区域并在此空间被来回反射, 从而粒子之间相互碰撞的机会增加, 反应气体的电离过程就更容易发生, 从而就更加增大了等离子体的密度, 这很容易由气体辉光放电荧光的强度变化得到验证. 因此, 磁镜场参数的不同必将对等离子体中的粒子运输参数产生重要的影响. 虽然, 现在国内外已有一些科技工作者对低温等离子体中离子的能量分布做了大量

研究工作<sup>[5-8]</sup>, 但磁场对低温等离子体中输运参数有何影响的实验研究报道的很少, 特别是磁镜场对低温射频等离子体中离子能量分布规律的研究至今未见报道. 利用阻碍栅极型静电能量分析器测量和分析了在不同磁镜场强度和不同磁镜比的情况下, 放电室中心处离子能量的分布规律, 并观察到气体辉光放电的亮度发生了明显变化. 这将对今后运用增强型等离子体化学气相沉积方法, 制备优质薄膜选择适当的磁镜参数提供了有力的理论依据.

## 2 实验装置与实验原理

图 1 是我们自行设计和研制的管式射频等离子体辉光放电诊断装置图, 主要由放电室、进气系统、抽气系统、真空测量、射频电源、磁镜场以及静电离子能量分析器和双探针系统组成. 抽气系统由一级旋片式机械泵和电磁阀组成, 进气系统由气瓶、流量计和微调阀组成; 射频电源采用的是频率为 40.7 MHz 的超短波治疗仪, 磁镜场是由套在玻璃管外边间距可调的两电磁线圈产生的, 最强处的磁场强度可达到  $3 \times 10^{-2}$  T; 真空测量系统是由电阻式真空计和小型电磁阀组成, 这可通过关闭电磁阀来截断规管与放电室之间的通道, 来避免放电时射频对规管的干扰和有腐蚀性气体对规管的污染.

\* 国家自然科学基金(批准号: 19775016)资助的课题.

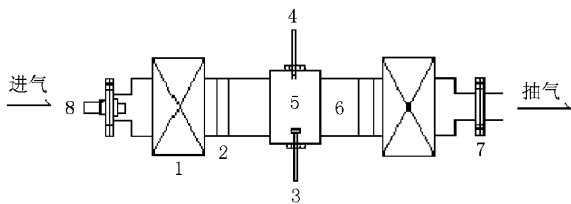


图1 射频等离子体诊断装置图 1. 电磁线圈 2. 射频电极 3. 能量探头 4. 探针 5. 聚四氟乙烯套管 6. 玻璃管 7. 法兰 8. 进气喷嘴

阻碍栅极型能量分析器(能量探头)是采用传统的结构,探头内部由两栅极  $g_1, g_2$  和收集盘  $p$  组成. 其中两栅极分别由 120 目和 60 目的铜网制成,而收集盘采用比较薄的紫铜片做成,它们被不锈钢管头绝缘的封装在一起,引线通过不锈钢管引出并用环氧树脂密封. 其结构原理及测量电路如图 2 所示.

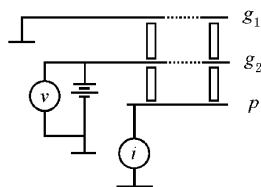


图2 能量分析器结构原理与测量电路图

将能量探头的栅极  $g_1$  接地,阻碍栅极  $g_2$  加以 0—2V 的幅度递增的斜波正偏压  $V_{g_2}$  (0—100V), 此栅极只允许离子能量大于  $eV_{g_2}$  的氩离子  $Ar^+$  通过栅极到达收集盘  $p$ . 由于信号很弱,采用精度为  $10^{-14}A$  的微电流计来测量由收集盘  $p$  获取的电流信号  $I_p$ . 这样就可以由静电离子能量分析器得到一条收集电流信号  $I_p$  随阻碍栅极所加的正偏压  $V_{g_2}$  变化的曲线如图 3 所示,而探头所在位置处的离子能量分布函数  $f(\epsilon)$  可由关系式

$$f(\epsilon) = K \frac{dI_p}{dV_{g_2}} \quad (1)$$

推出,其中  $K$  为比例系数,  $V_{g_2}$  为阻碍栅极的正偏压,  $I_p$  为收集盘的电流信号. 因此我们将实验测得的  $I_p-V_{g_2}$  伏安特性曲线再进行微分变换,即可得到相应的离子能量分布函数的一条曲线如图 4 所示,即为所需最终结果.

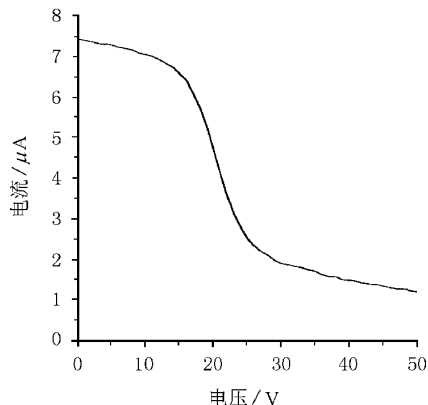


图3 由探头测得  $I_p-V_{g_2}$  伏安特性曲线(压强:7 Pa,放电电流:60 mA,磁镜比:5)

### 3 实验结果与分析

将能量探头径向放置于放电管的中心,放电管的尺寸为  $70\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ ,然后调节两静电线圈间距与电极间距,使其能量探头也同时处于磁镜场与两电极的中心位置上,并保持两电极间距为 7 cm 不变. 通过调节微调阀和气体流量计使放电室保持在 7 Pa 的工作压强下不变,然后通过改变磁镜场的磁场强度和磁镜比来测量氩气辉光放电室中心位置处的氩离子能量分布规律.

#### 3.1 磁镜场的磁感应强度对离子能量分布的影响

我们保持磁镜间距 22 cm 不变,即保持磁镜比不变,通过改变线圈的电流的大小来改变磁镜场的强度,放电室中心处的磁场强度依次为  $72 \times 10^{-4}$ ,  $54 \times 10^{-4}$ ,  $36 \times 10^{-4}$ ,  $18 \times 10^{-4}$ , 0 T. 由能量探头依次测得  $I_p-V_{g_2}$  伏安曲线,然后再对所有曲线进行微分变换即可得到相应的离子能量分布曲线如图 5 所示.

由图 5 发现,氩离子的能量分布随磁镜场的磁场强度的增加,而向能量低的方向偏移,但分布宽度却没有明显变化,并且我们还观察到气体放电的亮度也将随磁场强度的增加而增强. 这是因为,当磁场随时间缓慢变化时,磁矩  $\mu$  是一不变量,带电粒子的回旋半径  $r_L$  由下式给出,

$$r_L = \sqrt{\frac{2m\mu}{q^2B}} \quad (2)$$

其中  $q, m$  分别为粒子电荷与质量,  $B$  为磁场感应

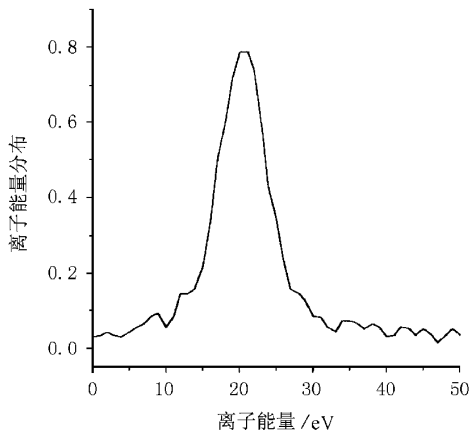


图4 氩离子能量分布曲线(压强 :7 Pa ;放电电流 :60 mA 磁镜比 5)

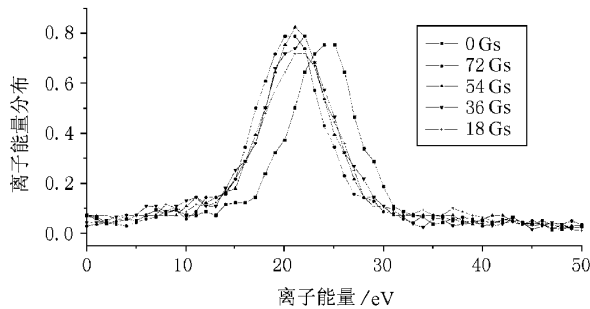


图5 不同磁场强度时的氩离子能量分布(压强 :7 Pa ;放电电流 :60 mA 磁镜比 5)

强度.由(2)式可知,随磁场强度的增加,带电粒子的螺旋半径减小,带电粒子被压缩在磁镜区域中,使其区域内的带电粒子密度增加,这相当磁镜区域的气压增大了,这样粒子间相互碰撞的概率就大大增加了.我们知道,碰撞过程分弹性碰撞、激发碰撞和电离碰撞,由于弹性碰撞不损失能量且也不能产生新的粒子,可不给予考虑,这里仅考虑激发碰撞和电离碰撞两种过程.由于磁镜区域内带电粒子密度的增加,由电子与中性粒子电离碰撞所产生的离子,与其他粒子参与碰撞的概率增加了,其中一部分能量较高的离子由于碰撞损失能量而变成了低能离子,同时由于电子参与碰撞概率的增加,大部分高能电子也由于损失了能量而变成了低能电子,由此导致低能离子增多而高能离子减少,所以离子能量分布随磁场强度的增大而向低能方向偏移.

同时,还观察到等离子体由于磁镜场的存在而被有效地约束在磁镜区域内,随着磁镜场的磁场强度的增加氩气辉光放电的亮度增强了.这是因为,由

于磁镜场位型的特点,使大量的电子被束缚在磁镜区域内,从而使其区域内的电子密度增加,电子与中性粒子电离碰撞次数也随着增加,使得电离产生的二次电子增多,这必然使得电子密度大大增加了,从而电离密度就越大<sup>[9]</sup>.由于电子密度的增加,电子与中性粒子的碰撞就越频繁,其中电子与中性粒子激发碰撞发生的概率就越大,由此而产生的处于激发态的粒子就越多,从而由激发碰撞而导致的氩气辉光放电亮度就越强.

### 3.2 磁镜场的磁镜比对离子能量分布的影响

通过保持线圈的电流为 1A 不变,而通过调节磁镜间距来改变磁镜比,依此测得  $I_p-V_{g_2}$  伏安特性曲线,然后再对所有曲线进行微分变换就得到了相应的氩离子能量分布如图 6 所示.

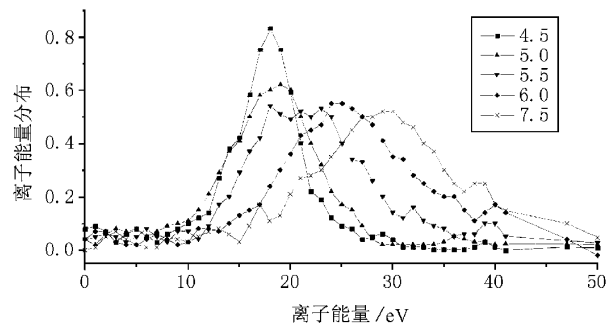


图6 不同磁镜比时的氩离子能量分布(压强 :7 Pa ;放电电流 :60 mA 线圈电流 :1 A)

由图 6 发现,随着磁镜比的增加,离子能量分布向高能方向偏移,且能量分布宽度也相应变宽.我们知道,磁镜位型的特点是磁场强度从其中间到两端逐渐加强,中间处磁场最弱而两端磁场最强.而磁镜比

$$R_M = \frac{B_M}{B_0} \quad (3)$$

是用来描述磁镜位型特点的一个非常重要的参数,其中  $B_M$  表示磁镜两端处最强的磁感应强度,  $B_0$  表示其中间处最弱的磁感应强度.由于带电粒子在磁场中受到洛伦兹力的作用,大量的带电粒子被约束在磁镜区域内,并且被磁镜两端来回反射,而只有那些到达磁镜两端磁场最强处时,与磁场方向平行的速度分量不为零的粒子,才能逃离磁镜区域.而逃逸粒子数目的多少往往用损失锥来表示,损失锥越小,表示逃逸的粒子数目就越少.我们知道,损失锥与磁镜比的关系是,磁镜比越大,损失锥反而就越小.当

我们保持磁镜线圈的电流不变,即保持磁镜两端的磁感应强度  $B_M$  不变时,通过改变磁镜间距,也就是改变了磁镜中间的磁感应强度  $B_0$ ,由(3)式可知,磁镜比  $R_M$  也会随之改变.当增加磁镜的间距时,中间处的磁感应强度  $B_0$  就越小,那么磁镜比  $R_M$  就越大,而损失锥就越小,那么逃逸的粒子数就越少.而我们知道,逃逸的粒子绝大多数恰恰就是那些高能电子和高能离子,而那些能量较低的带电粒子却被约束在磁镜区域内.当磁镜比较小时,我们实际测到的离子就是这些能量分布宽度较窄的低能离子.反之磁镜比增加,损失锥的锥角变小,那么进入损失锥的高能离子就减少,因此我们实际测到的是那些能量分布范围较宽的离子,其中既有低能离子、次高能离子又有高能离子,所以随着磁镜比的增加,等离子体损失的能量就越小,离子能量分布将向高能方向偏移且分布宽度也将变宽.但随着磁镜比的继续增加,离子能量分布变化将很不明显,这是因为,在等离子体中高能粒子所占的比例非常少,随着磁镜比的进一步增加,进入损失锥的高能粒子很少,几乎没有什么变化,当磁镜比达到一定值时,如再增加磁镜比那将失去意义.

## 4 结 论

我们利用自行设计和研制的实验仪器,测量了

磁镜场对氩气辉光放电射频等离子体中离子能量分布的影响.得到以下结论:在其他参数不变的情况下,1)离子能量分布将随磁镜的磁场强度的增加而向低能方向偏移,离子能量分布宽度没有明显的变化,等离子体的密度增加,辉光放电的亮度增强;2)离子能量分布将随着磁镜比的增大而向高能方向偏移,并且离子能量分布宽度也将变宽,但随着磁镜比的继续增加,离子能量分布变化将很不明显.这将对我们今后运用增强型等离子体化学气相沉积方法,制备优质薄膜选择适当的磁镜参数提供了有力的理论依据.

- [1] B. Chapman, *Glow Discharge Processes* (Wiley, Newyork, 1980).
- [2] G. Jellison, C. R. Parsons, *Phys. Fluids.*, **26**(1983),1171.
- [3] K. D. Bonin, T. G. Msdon, *Phys. Rev.*, **A43**(1990),3005.
- [4] O. Fukumasa, H. Nation, S. Sakiyama, *J. Appl. Phys.*, **74**(1993),848.
- [5] J. Hopwood, *Appl. Phys. Lett.*, **62**(1993),940.
- [6] Ute Flendert, K. Wlesemann, *J. Phys. D:Appl. Phys.*, **27**(1994),509.
- [7] J. Liu, G. L. Huppert, H. H. Sawin, *J. Appl. Phys.*, **68**(1990),3916.
- [8] J. R. Woodworth, M. E. Riley, P. A Miller, G. A Hebner, *J. Appl. Phys.*, **81**(1997),5950.
- [9] He-Lin Wei *et al.*, *Acta Physica Sinica*, **44**(1995),225( in Chinese ] 魏合林等, *物理学报* **44**(1995)225 ]

# EFFECT OF THE MAGNETIC MIRROR FIELD ON THE ION ENERGY DISTRIBUTIONS IN A RADIO FREQUENCY PLASMA \*

LIU HONG-XIANG WEI HE-LIN LIU ZU-LI LIU YAN-HONG WANG JUN-ZHEN  
(*Department of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 3 October 1999; revised manuscript received 15 January 2000)

## ABSTRACT

In this article, using the retarding grid energy analyzer, we have measured the ion energy distributions in a low temperature radio frequency plasma under the condition of different magnetic mirror parameters. At the centre of discharge cell, the ion energy distributions displace in the direction of low energy with the increase of the magnetic density without evident variation in the ion energy distribution width. With the increase of the magnetic mirror ratio, the ion energy distribution displaces in the direction of high energy, and the width of ion energy distribution became wider. So the magnetic mirror parameters have significant effect on the ion energy distributions.

**Keywords** : magnetic mirror field, glow discharge, low-temperature plasma, ion energy distribution

**PACC** : 6855, 8115H, 5270

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19775016).