

反应等离子体中尘埃空洞形成的实验研究^{*}

吴 静 张鹏云 宋巧丽 张家良 王德真[†]

(大连理工大学物理系, 三束材料改性国家重点实验室, 大连 116024)

(2005 年 1 月 27 日收到, 2005 年 3 月 14 日收到修改稿)

利用气体合成(乙烯和硅烷, 氩气是载气)的方法, 产生尘埃粒子, 并在此基础上研究了悬浮在射频等离子体鞘层上方的尘埃云及尘埃空洞. 实验结果给出了尘埃云和尘埃空洞与射频功率和气压等参数的关系曲线.

关键词: 尘埃等离子体, 尘埃空洞, 尘埃云

PACC: 5225Z, 5240K, 5280P

1. 引 言

尘埃等离子体, 是包含尘埃粒子的等离子体. 其中尘埃粒子带有大量的电子, 所以它们之间有很强的库仑相互作用, 这些作用导致库仑晶格的形成^[1-4]. 除此之外还有一些新的现象, 如尘埃等离子体中的波和不稳定性^[5-15]以及马赫锥实验^[16]等. 目前, 尘埃等离子体中的尘埃云及尘埃云中的空洞引起了广泛关注^[17-19]. 在近期的微重力实验^[20]中, 尘埃等离子体可以在大多数的实验条件下形成稳定的具有明显边界的尘埃空洞. 有人认为最初空洞的形成是起源于丝状模式^[18], 现在有许多人试图用某些机制来解释形成尘埃空洞的动力学过程. 在微重力系统^[19]中, 由于温度梯度的影响, 在尘埃粒子上存在一种热泳力(thermophoretic force), 还有一种离子拖曳力(ion drag force)^[18, 21, 22], 以及中性摩擦力, 它们导致了空洞的形成. 还有人们认为尘埃空洞的形成可能是由于离子和尘埃粒子与本底中性气体的碰撞^[23]而导致的电离不稳定性^[24-27]. 尘埃空洞的理论还很不完善, 进行实验研究是促进这些理论发展的好方法.

多数尘埃实验^[28]是利用投入尘埃粒子或溅射靶的方法产生尘埃粒子, 我们的实验是利用混合反应气体乙烯、硅烷和氩气在气相条件下来生成尘埃粒子, 这样与实际半导体工业中的情况较为符合. 在

此基础上我们研究了悬浮^[29]在射频鞘层上方的尘埃云中尘埃空洞的形成和演化, 并通过改变一些外部参数, 例如输入功率和通入的气体的压强等来研究尘埃云和尘埃空洞直径的变化, 得到了一些结论.

2. 实验装置

我们的实验装置如图 1 所示, 是一个容性耦合射频等离子体发生器, 这种装置为大多数尘埃等离子体研究者所采用. 放电室由 3 部分组成: 玻璃柱筒和两个不锈钢平板电极. 真空室高 120mm, 直径 280mm. 上电极直径 300mm, 接地; 下电极直径 50mm, 接 13.56MHz 匹配射频电源. 两电极间距 40mm. 下电极中心处放一直径 10mm, 深 6mm 的约束环, 所产生的势阱可以使尘埃粒子被约束在射频极板上.

图 1 中, 直径 20mm, 深 6mm 的约束环位于直径 50mm 下电极的中心. 尘埃粒子被捕获在约束环附近. 尘埃云用一束面状 He-Ne 激光束照亮. CCD 照相机用来在侧面和上方拍照记录实验数据.

在我们的实验中, 先抽真空到 10^{-1} Pa 以下, 然后按一定比率通入乙烯、硅烷和氩气的混合气体, 工作气压在 20—100Pa, 射频功率 10—60W. 由于约束环的作用, 这些尘埃粒子被约束在射频极板上方的鞘层中. 我们将 He-Ne 激光器产生的激光束扩成片光束来照亮尘埃粒子. 用 CCD 相机从真空室的上

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10275010)资助的课题.

[†] E-mail: wangdez@dlut.edu.cn

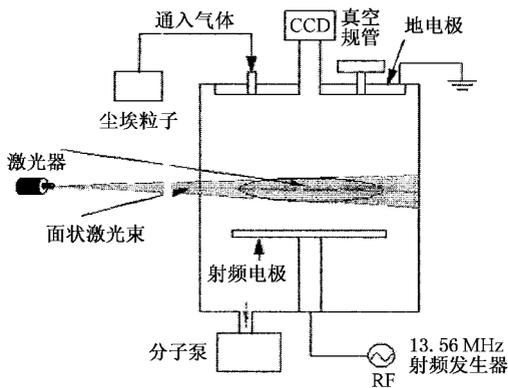


图 1 实验装置示意图

方和侧面观测尘埃云和尘埃空洞.混合气体注入系统在上极板上,分子泵系统位于放电室的下方.质量流量控制系统用来控制 3 种气体的通入比率,为 $n:1:1$,其中 n 为氩气比例,通过 n 可以调节气压的范围.

3. 实验结果和讨论

放电开始一分钟左右,尘埃粒子增长到可以观察到的大小(大约 $2\mu\text{m}$ 到 $5\mu\text{m}$).它们形成尘埃云悬浮在射频鞘层区域.在增长的过程中,有一些尘埃粒子脱离约束,而剩下的尘埃粒子被长期约束住.

在等离子体中,由于尘埃粒子带负电,所以相互间的排斥力可以使它们互不接触.同时,约束环产生的势阱将其约束在极板上方鞘层区域中,在一定的条件下可以形成稳定的库仑晶格结构.在尘埃云中,随着实验条件的变化,会形成一个中心对称的尘埃空洞.尘埃空洞形成没有比较固定的条件,但是我们观测到,气压对尘埃空洞形成的影响要比功率的影响大得多.尘埃空洞很清晰,并且有明显的边界.从图 2(a)和图 2(b)可以看到在我们的实验中拍摄的库仑晶格和尘埃空洞的照片.可以通过改变功率和气压改变尘埃空洞的大小.

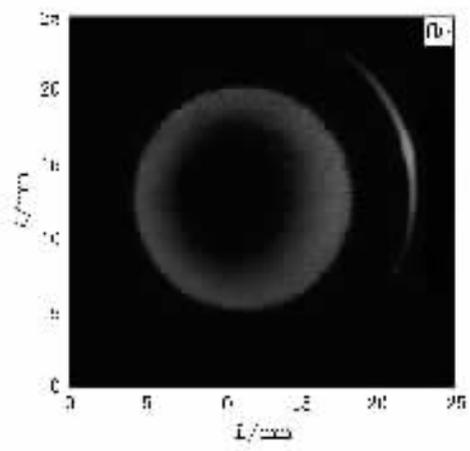
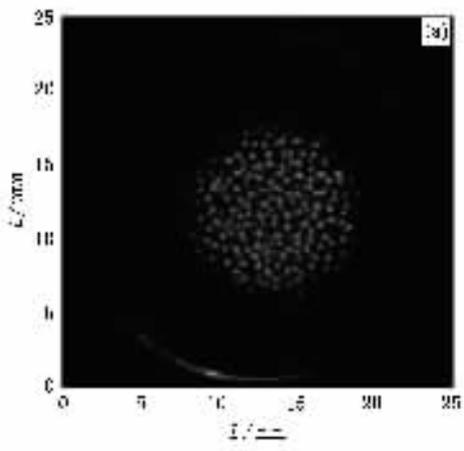


图 2 (a)在功率 16W,气压 35Pa 实验条件下的库仑晶格结构.(b)在功率 16W,气压 63Pa 实验条件下尘埃云中形成的中心对称,大约半径 10mm 的尘埃空洞.在外围我们可以看到一个明亮的环,这个是直径 20mm,深 8mm 的约束环.这两幅图是从实验系统的上方用 CCD 相机拍摄的

从侧面拍摄到的尘埃空洞是碗状的,如图 3 所示,在这里,尘埃粒子的大小和带电量都不相同,所以形成的尘埃空洞是碗状的.保持功率不变的情况下,随着气压的增加,尘埃空洞会变得更宽更深,在中心只有很浅的势阱,从侧面看到的碗状的锥角会变得钝一些.另外,由于气压的增加,鞘层会变薄,维持尘埃粒子向上的电场力会变弱,尘埃粒子会有一个小的下落,整个尘埃空洞会随着下降.

3.1. 对尘埃云体积的研究

图 4 给出了气压一定时尘埃云体积随功率的变化曲线.从中我们可以看出,尘埃云体积的变化趋势是随功率的增加而减少的,在功率达到一定值后,尘埃云的体积基本上保持不变.这是由于当气压一定时,参加反应的硅烷和乙烯的量也不变,尽管功率增加,但参与反应的气体的量不变.随着功率的增加,中心区出现空洞并且逐渐增加,尘埃云被从中心向

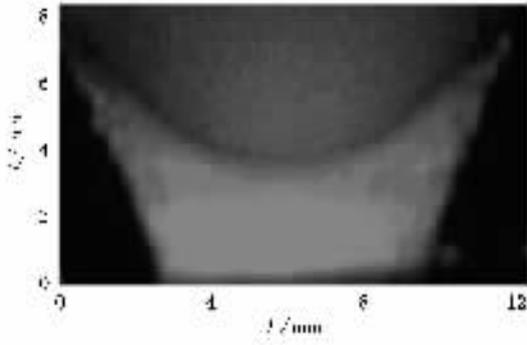


图3 气压48Pa,射频功率15W,约束环直径10mm,深6mm时的尘埃空洞的侧视图

四周压缩,所以尘埃云的体积会逐渐减小,当最终尘埃云被压缩成一个圆环时,就形成了一个稳定的空洞,所以尘埃云的体积也就不再随功率而发生变化了。

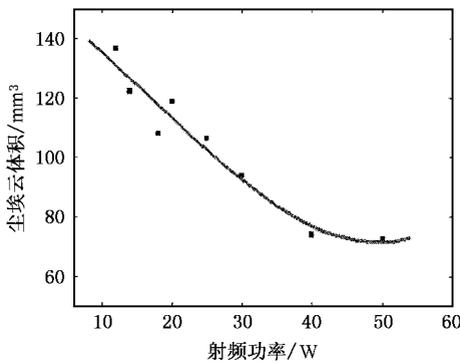


图4 气压一定(54Pa)时尘埃云体积随功率的变化曲线

图5给出了功率一定时尘埃云体积随气压的变化曲线,从中可以看到随气压的增加尘埃云的体积是增加的,但当气压达到一定值时,尘埃云的体积略有下降并基本上不随气压增加而变化。在初期,随着气压的增加,生成的尘埃粒子在不断增加,所以尘埃云的体积会增加,但是当气压增大到一定程度,尘埃云的体积就基本上接近稳定,这个时候在中心区域会形成稳定的尘埃空洞结构。

影响尘埃云的因素还包括射频驱动电极。在放电气压、射频功率和气体流量都不变的情况下,只改变射频电极的大小,尘埃的分布跟电极的大小有关。电极半径越大,生成的尘埃分布呈中间少,边缘多的特点,因此容易形成空洞。

3.2. 对尘埃云和尘埃空洞直径的研究

图6给出了功率20W时尘埃云和尘埃空洞直

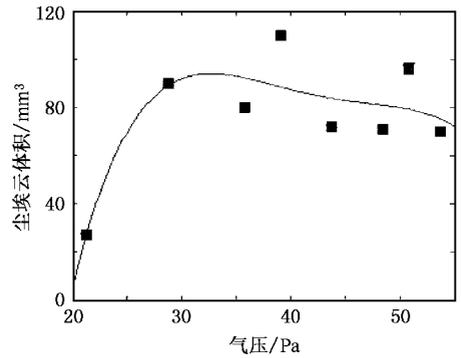


图5 功率一定(16W)时尘埃云体积随气压的变化曲线

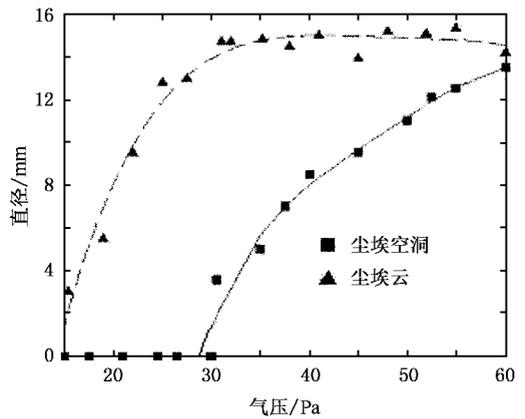


图6 功率20W时尘埃云和尘埃空洞直径随气压的变化曲线

径随气压的变化曲线。从图中可以看到,随气压的增加,尘埃云的直径刚开始增加得比较快,气压到一定值后,尘埃云的直径缓慢增加到饱和值。气压达到某一个值时就出现了尘埃空洞,尘埃空洞出现后,随着气压的增加,尘埃空洞的直径也在增大,当气压足够高时,空洞直径和尘埃云的直径基本上相等,此时尘埃粒子所占据的区域成为一个很细的圆环。

图7给出了尘埃云和尘埃空洞直径在气压一定的情况下随射频功率的变化曲线。从图中可以看出尘埃云和尘埃空洞的直径都是随着功率先增大然后减小。这是因为,在功率比较小时,反应气体供给充足,功率增加,能量耦合增加,反应增加,生成的尘埃粒子多,所以尘埃云和尘埃空洞的直径增大。但是当功率达到一定程度,反应气体充分反应,全部生成尘埃粒子,功率的增加,使尘埃粒子的颗粒增大,总数反而减少,尘埃云和尘埃空洞的直径随之变小。

另外,实验中在同一放电条件下(相同功率和气压)只改变约束环的大小,发现形成空洞的大小和约束环的直径有关系,随着约束环直径的变大,尘埃空

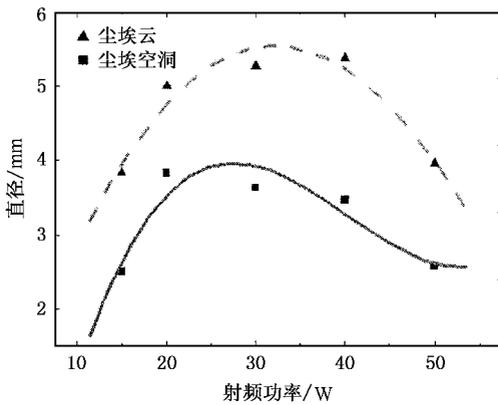


图 7 气压 63Pa 时尘埃云和尘埃空洞直径随射频频率的变化曲线

洞也在变大.约束环的形状(我们实验中设计了正方形、圆锥形、圆柱形)对尘埃空洞的形状影响不大,我们从放电室的上方观察到,尘埃空洞始终是圆形的.

4. 结 论

本文通过实验,得到了以下一些结论:尘埃云的体积随功率增加而减小,随气压的增加而增加,到一定值时尘埃云的体积达到稳定状态.尘埃云和尘埃空洞的直径随气压增大而增大,当气压达到一定值时,尘埃云被压缩为一细环,空洞进入稳定状态;尘埃云和尘埃空洞的直径随功率先增大后减小.尘埃云和尘埃空洞的形状与约束孔的形状关系不大,但是约束孔的大小影响着它们的大小,尘埃云和尘埃空洞的直径随电极上约束孔的直径的增大而变大.对实验结果,可以从离子拖拽力和电场约束力的平衡给出初步的定性解释,但还有一些解释不清的地方,另外还没有办法进行定量的解释,这需要进一步的工作.

- [1] Chu J H and Lin I 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 4009
- [2] Hayashi Y and Tachibana K 1994 *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** L804
- [3] Thomas H, Morfill G E, Demmel V, Goree J, Feuerbacher B and Mohlmann D 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 652
- [4] Melzer A, Trottenberg T and Piel A 1994 *Phys. Lett. A* **191** 301
- [5] Shukla P K 2001 *Phys. Plasmas* **8** 1791
- [6] Verheest F 2000 *Waves in Dusty Plasmas* (Dordrecht: Kluwer)
- [7] Shukla P K and Mammon A A 2002 *Introduction to Dusty Plasma Physics* (Bristol: Institute of Physics Publishing)
- [8] Rio N N, Shukla P K and Yu M Y 1990 *Planet. Space Sci.* **38** 543
- [9] Barman A, Merlin R L and Angelo N D 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3563
- [10] Shukla P K and Silin V P 1992 *Phys. Scr.* **45** 508
- [11] Barkan A, D'Angelo N and Merlin R L 1996 *Planet. Space Sci.* **44** 239
- [12] Melandsø F 1996 *Phys. Plasmas* **3** 3890
- [13] Homann A, Melzer M, Peters S and Piel A 1997 *Phys. Rev. E* **56** 7138
- [14] Rosenberg M 1996 *J. Vac. Sci. Technol.* **14** 631
- [15] Merlin R L, Barkan A, Thompson C and D'Angelo N 1998 *Phys. Plasmas* **5** 1607
- [16] Samsonov D, Goree J, Ma Z W, Bhattacharjee A, Thomas H and Morfill G E 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 3649
- [17] Dorier J L, Hollenstein C and Howling A 1995 *J. Vac. Sci. Technol. A* **13** 918
- [18] Samsonov R and Goree J 1999 *Phys. Rev. E* **59** 1047
- [19] Morfill G E, Thomas H, Konopka U, Rothermel H, Zuzic M, Ivlev A and Goree J 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 1598
- [20] Praburam G and Goree J 1996 *Phys. Plasmas* **3** 1212
- [21] Goree J, Morfill G E, Tsytovich V N and Vladimirov S V 1999 *Phys. Rev. E* **59** 7055
- [22] Tsytovich V N, Vladimirov S V, Morfill G E and Goree J 2001 *Phys. Rev. E* **63** 056609
- [23] Wang D Z and Ma T C 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2404 (in Chinese) [王德真、马腾才 2000 物理学报 **49** 2404]
- [24] D'Angelo N 1998 *Phys. Plasmas* **5** 3155
- [25] Ivlev A V *et al* 1999 *Phys. Plasmas* **6** 741
- [26] Avinash K 2001 *Phys. Plasmas* **8** 351
- [27] Wang X, Bhattacharjee A, Gou S K and Goree J 2001 *Phys. Plasmas* **8** 5018
- [28] Dahiya R P, Paeva G V, Stoffels W W, Stoffels E, Kroesen I G M W, Avinash I K and Bhattacharjee A 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 125001
- [29] Liu D Y, Wang D Z and Liu J Y 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1094 (in Chinese) [刘德泳、王德真、刘金远 2000 物理学报 **49** 1094]

Investigation of void in dust clouds in reactive plasma^{*}

Wu Jing , Zhang Peng-Yun , Song Qiao-Li , Zhang Jia-Liang , Wang De-Zhen[†]

(State Key Laboratory of Materials Modification by Laser , Ion and Electron Beams , Department of Physics , Dalian University of Technology , Dalian 116024 , China)

(Received 27 January 2005 ; revised manuscript received 14 March 2005)

Abstract

The void in the sheath of a radio-frequency(rf) dusty plasma is investigated experimentally . Dust particles in our experiment are created *in situ* using mixed reactive gases silane and ethane . Dust particles in radio frequency discharges form crystalline structure and display instabilities under certain conditions . The behaviour of the dust void as a function of rf power and gas pressure is studied .

Keywords : dust plasma , dust void , dust clouds

PACC : 5225Z , 5240K , 5280P

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10275010).

[†] E-mail : wangdez@dlut.edu.cn